



# ЗБОРНИК РАДОВА

## 21. симпозијум CIGRE Србија 2024 УПРАВЉАЊЕ И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ У ЕЕС

Врњачка Бања, хотел Врњачке терме  
30.10 – 02.11.2024.

---

Организатори Симпозијума CIGRE Србија 2024:  
СТК Ц2 | Управљање и експлоатација ЕЕС  
СТК Д2 | Информациони системи и телекомуникације

## Покровитељи



**ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА  
СРБИЈЕ**



МЈЕШОВИТИ ХОЛДИНГ  
"ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА РЕПУБЛИКЕ СРПСКЕ"  
Матично предузеће, акционарско друштво Требиње

MIXED HOLDING  
"POWER UTILITY OF THE REPUBLIC OF SRPSKA"  
Parent Joint-stock Company Trebinje



## Велики спонзори



## Спонзори



ELEKTROENERGETSKI  
KOORDINACIONI CENTAR d.o.o.  
ELECTRICITY  
COORDINATING CENTER Ltd.

## Спонзор мобилне апликације



## Спонзор УСБ-а



## Донатор







Студијски комитети  
СТК Ц2 - Управљање и експлоатација ЕЕС  
СТК Д2 - Информациони системи и телекомуникације

# ЗБОРНИК РАДОВА

21. симпозијум CIGRE Србија 2024  
УПРАВЉАЊЕ И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ У ЕЕС

Врњачка Бања, хотел Врњачке терме  
30.10 – 02.11.2024.

Издавач: Српски национални комитет Међународног савета за велике електричне мреже | CIGRE Србија  
Београд, Војводе Степе 412  
тел/фах: +381 11 3971 056  
е-маил: [office@cigresrbija.rs](mailto:office@cigresrbija.rs), [www.cigresrbija.rs](http://www.cigresrbija.rs)

Главни и одговорни уредник: Небојша Петровић

Технички уредници: Небојша Петровић  
Данило Лаловић  
Никола Обрадовић  
Татјана Домнић Томашевић

Дизајн и продукција: BBN Congress Management d.o.o. Београд

Година: 2025

Место издавања: Београд

Тираж: 150

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

621.31-52(082)(0.034.2)  
621.31:004(082)(0.034.2)  
621.31:621.39(082)(0.034.2)

СИМПОЗИЈУМ Управљање и телекомуникације у ЕЕС (21 ; 2024 ; Врњачка Бања)

Зборник радова [Електронски извор] / 21. Симпозијум ЦИГРЕ Србија 2024 Управљање и телекомуникације у ЕЕС, Врњачка Бања, 30.10 – 02.11.2024. ; [организатори] СТК Ц2 - Управљање и експлоатација ЕЕС [и] СТК Д2 - Информациони системи и телекомуникације ; [главни и одговорни уредник Небојша Петровић]. - Београд : Српски национални комитет Међународног савета за велике електричне мреже CIGRE Србија, 2025 (Београд : BBN Congress Management). - 1 USB флеш меморија ; 1 x 2 x 6 cm

Системски захтеви: Нису наведени. - Насл. са насловне стране документа. - Текст ћир. и лат. - Тираж 150. - Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-86-82317-91-3

а) Електроенергетски системи -- Управљање -- Зборници б) Електроенергетски системи -- Информациона технологија -- Зборници в) Електропривреда -- Телекомуникациони системи -- Зборници

## САДРЖАЈ

### СТК Ц2 – УПРАВЉАЊЕ И ЕКСПЛОАТАЦИЈА ЕЕС

Председник: **мр Никола Обрадовић**, АД Електроурежа Србије

Р Ц2 00 .....	7
<b>ИЗВЕШТАЈ СТРУЧНИХ ИЗВЕСТИЛАЦА</b>	
Р Ц2 01 .....	28
<b>ИЗАЗОВИ ПОВЕЗАНИ СА МАСОВНИМ УВОЂЕЊЕМ ОБНОВЉИВИХ ИЗВОРА ЕНЕРГИЈЕ И ЊИХОВОМ ИНТЕГРАЦИЈОМ СА МРЕЖОМ</b> Нинел Чукалевски	
Р Ц2 02 .....	43
<b>ПРОГНОЗА ПРОИЗВОДЊЕ ОБНОВЉИВИХ ИЗВОРА ЕНЕРГИЈЕ - ПЕТОГОДИШЊЕ ИСКУСТВО ОПЕРАТОРА ПРЕНОСНОГ СИСТЕМА</b> Петар Петровић, Марија Ђорђевић, Срђан Младеновић	
Р Ц2 03 .....	54
<b>АПЛИКАЦИЈА ЗА ПРОРАЧУН МОГУЋНОСТИ ОПТЕРЕЂЕЊА ТРАНСФОРМАТОРА</b> Павле Лучић, Милош Стојић, Горан Јакуповић, Совјетка Крстонијевић	
Р Ц2 04 .....	67
<b>СИМУЛАТОР И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ГРУПНОГ РЕГУЛАТОРА РЕАКТИВНЕ СНАГЕ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ ЂЕРДАП 1</b> Милан Јосифовић, Горан Јакуповић, Милан Бједов, Жељко Дамљановић, Никола Васиљевић, Нинел Чукалевски, Владан Гемаљевић	
Р Ц2 05 .....	81
<b>ПРИМЕНА ГЕНЕТИЧКОГ АЛГОРИТМА (ГА) КОД ИЗБОРА АГРЕГАТА ЗА ПРОИЗВОДЊУ НА ХЕ ПЕРУЋИЦА</b> Радомир Стаматовић, Гојко Благојевић, Предраг Илић, Милена Круљевић, Марија Савић	
Р Ц2 06 .....	95
<b>ДЕТЕКЦИЈА АНОМАЛИЈА У ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИМ СИСТЕМИМА КОРИШЋЕЊЕМ ПМУ ПОДАТАКА: ПРИМЕНА СТАТИСТИЧКИХ МЕТОДА И АЛГОРИТАМА МАШИНСКОГ УЧЕЊА</b> Владимир Бечејац, Александар Георгијев, Милош Јовановић	
Р Ц2 07 .....	112
<b>ОПТИМИЗАЦИЈА ПОСТАВЉАЊА ПМУ УРЕЂАЈА ЗА ПОБОЉШАЊУ ОПСЕРВАБИЛНОСТ МРЕЖЕ КОРИШЋЕЊЕМ МАТЛАБ-А</b> Владимир Бечејац	



Р Ц2 08 .....	126
<b>УТИЦАЈ НЕКОМПЛЕТНИХ СКУПОВА ПОДАТАКА НА МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА У ЕНЕРГЕТИЦИ</b>	
Драган Мариновић, Горан Јовановић, Бојан Ракић, Петар Николић, Жарко Несторовић, Слободан Стаменов	
Р Ц2 09 .....	137
<b>ПРИМЕНА ИЗОЛОВАНИХ ОКРУЖЕЊА И ДИГИТАЛНИХ БЛИЗАНАЦА У ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦИ НА ПРИМЕРУ ТЕХНИЧКИХ РЕШЕЊА ХОРИЗОН ЕУРОПЕ ПРОЈЕКТА Р<sup>2</sup>Д<sup>2</sup></b>	
Горан Јакуповић, Марија Поповић, Игор Бундало, Милан Јосифовић, Душан Прешић, Немања Вукојичић	
Р Ц2 10 .....	154
<b>ПРЕДЛОГ НАЧИНА РАСПОДЕЛЕ ТРОШКОВА КОРЕКТИВНИХ МЕРА СА ПРЕКОГРАНИЧНИМ УТИЦАЈЕМ</b>	
Срђан Суботић, Јулијана Вићовац, Милица Нектаријевић, Александар Војиновић	
Р Ц2 11 .....	165
<b>АПЛИКАЦИЈА ЗА АУТОМАТСКУ ИЗРАДУ ТОПОЛОШКОГ ФАЈЛА ПОТРЕБНОГ ЗА КРЕИРАЊЕ МРЕЖНИХ МОДЕЛА</b>	
Јулијана Вићовац, Марија Миљуш, Ненад Јанковић, Срђан Суботић, Јасмина Ђорђевић, Јелена Ђурђевић, Милош Мићић, Александра Миковић	
Р Ц2 12 .....	176
<b>ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ЕНТСО-Е ПРАВИЛА ЗА ПОРЕМЕЋЕНИ ПОГОН И ПОНОВНО УСПОСТАВЉАЊЕ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА ЗА СЛУЧАЈ ПОДЕЛЕ СИСТЕМА</b>	
Игор Бундало, Горан Јакуповић, Марија Поповић, Срђан Суботић, Кристина Јаношевић, Предраг Симић, Душан Прешић	
Р Ц2 13 .....	190
<b>МЕТОДА ЗА МОДЕЛОВАЊЕ ИЗВОРА БУКЕ, ПРОРАЧУН И ОЦЕНУ НИВОА БУКЕ УСЛЕД КОРОНЕ У ОКОЛИНИ НАДЗЕМНОГ ВОДА</b>	
Ива Салом, Дејан Тодоровић, Миленко Кабовић, Владимир Челебић, Марко Ралић, Небојша Петровић, Нада Цуровић	
Р Ц2 14 .....	205
<b>МОДЕЛИ ПРИМЕНЕ ЕКО-ДИЗАЈН ПРИСТУПА У УПРАВЉАЊУ ЕФЕКТОМ КОРОНЕ НА ВИСОКОНАПОНСКИМ НАДЗЕМНИМ ВОДОВИМА</b>	
Нада Цуровић, Ива Салом, Небојша Петровић, Миленко Кабовић, Владимир Челебић, Дејан Тодоровић	
Р Ц2 15 .....	222
<b>ПРИМЕНА СНИМАКА ВИДЕО НАДЗОРА ДАЉИНСКИ УПРАВЉАНИХ ПОСТРОЈЕНА ЕМС АД У АНАЛИЗИ УЗРОКА И ПОСЛЕДИЦА ИСПАДА ПО СТАЊЕ ПРИМАРНЕ ОПРЕМЕ</b>	
Христина Јовановић, Горан Марић, Милош Јаћовић, Душан Стојковић	

Р Ц2 16 ..... 235  
**УПРАВЉАЊЕ ОДРЖАВАЊЕМ ЕЛЕКТРОПРЕНОСНЕ МРЕЖЕ ПРИМЈЕНОМ  
ИНТЕЛИГЕНТНИХ ЗЕМЉИШНИХ КАРАТА**  
Анђела Крљаш, Маја Антић, Тијана Миловановић, Христина Шарац

Р Ц2 17 ..... 251  
**ПРИМЕНА СОФТВЕРСКИХ АЛАТА ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ АССЕТ  
МАНАГЕМЕНТ СИСТЕМА У ЕЕС**  
Бранко Ђорђевић, Маја Адамовић, Владимир М. Илић, Владимир Илић, Мирко  
Боровић

Р Ц2 18 ..... 261  
**ДИГИТАЛИЗАЦИЈА ВН ПОСТРОЈЕЊА - ИЗАЗОВИ ВЕЛИКЕ КОЛИЧИНЕ  
ПОДАТАКА**  
Срђан Мијушковић

## **СТК Д2 – ИНФОРМАЦИОНИ СИСТЕМИ И ТЕЛЕКОМУНИКАЦИЈЕ**

Председник: **мр Данило Лаловић**, АД Електропривреда Србије

Р Д2 00 ..... 270  
**ИЗВЕШТАЈ СТРУЧНИХ ИЗВЕСТИЛАЦА**

*Рад по позиву:*

Р Д2 01 ..... 276  
**ПРИМЕНА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ ЗА ОБРАДУ ИЦ СЛИКА У  
ДАЉИНСКОМ МОНИТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРЕ**  
Саша Д. Милић, Миша Кожицић

Р Д2 02 ..... 287  
**СТАНДАРДИ СЕРИЈЕ ИСО 22300 И ОБЕЗБЕЂЕЊЕ КОНТИНУИТЕТА  
ПОСЛОВАЊА У ЕЛЕКТРОПРИВЕДНИМ СИСТЕМИМА**  
Радослав Раковић

Р Д2 03 ..... 298  
**ЗАШТИТА ЛИЧНИХ ПОДАТАКА КРОЗ ИМПЛЕМЕНТАЦИЈУ ПОЛИТИКЕ О  
БЕЗБИЈЕДНОСТИ И ОРГАНИЗАЦИЈУ ИКТ СИСТЕМА НА ХАРДВЕРСКОМ И  
АПЛИКАТИВНОМ НИВОУ**  
Милкица Петровић Рикић, Драган Рикић, Тихомир Дабовић, Жељко Марковић

Р Д2 04 ..... 307  
**ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА УНУТРАШЊЕГ И СПОЉНОГ ПАРА ФАЈЕРВОЛА ЗА  
ПОВЕЋАЊЕ СИГУРНОСТИ СЦАДА СИСТЕМА**  
Предраг Илић, Радомир Стаматовић, Гордан Конечни, Иван Гојковић

Р Д2 05 ..... 317  
**ДИГИТАЛИЗАЦИЈА ВН ПОСТРОЈЕЊА - КОНЦЕПТИ ВИРТУЕЛИЗАЦИЈЕ**  
Срђан Мијушковић, Адис Ловић

Р Д2 06 .....	328
<b>СОФТВЕРСКИ МОДУЛ ЗА ПРИКАЗ И АНАЛИЗУ ВИБРАЦИЈА</b>	
Бојана Милић, Радомир Стаматовић, Гордан Конечни, Жељко Аћимовић, Горан Стефановић	
Р Д2 07 .....	337
<b>ПРИМЈЕР УВОЂЕЊА СОЛАРНИХ ЕЛЕКТРАНА У СИСТЕМ ДАЉИНСКОГ НАДЗОРА И УПРАВЉАЊА</b>	
Елведин Церница, Демо Боровина, Енсар Пашић	
Р Д2 08 .....	352
<b>ДИГИТАЛНА ТРАНСФОРМАЦИЈА КРОЗ ИМПЛЕМЕНТАЦИЈЕ СИГУРНОСНИХ И БЕЗБЕДНОСНИХ СТАНДАРДА У ДОМЕНУ ОПЕРАЦИОНИХ ТЕХНОЛОГИЈА</b>	
Владан Ђокић	
Р Д2 09 .....	364
<b>ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ИСМС У УПРАВИ ЕПС АД У СКЛАДУ СА ЗАХТЕВИМА СТАНДАРДА ИСО 27001; ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА КОРПОРАТИВНОГ ОКВИРА И СТВАРАЊЕ ПРЕДУСЛОВА ЗА ПОВЕЗИВАЊЕ СА ОГРАНЦИМА</b>	
Љубодраг Јосиповић, Јасна Марковић-Петровић, Ацо Арсенијевић, Игор Ћика	
Р Д2 10 .....	375
<b>ЕЛЕКТРОПРИВРЕДНЕ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОНЕ МРЕЖЕ: РАЗВОЈ, ОДРЖАВАЊЕ И ЉУДСКИ ФАКТОР</b>	
Драган Богојевић	
Р Д2 11 .....	387
<b>АПЛИКАЦИЈЕ ЗА ДИЈАГНОСТИКУ И МОНИТОРИНГ РАДИО СИСТЕМА ЗА ПОТРЕБЕ УПРАВЉАЊА СРЕДЊЕ НАПОНСКОМ ДИСТРИБУТИВНОМ МРЕЖОМ НА ТЕРИТОРИЈИ БЕОГРАДА</b>	
Милија Маринковић, Тамара Томић, Предраг Шејат, Сања Јовановић	
Р Д2 12 .....	398
<b>ПРИМЕНА ВРЕМЕНСКЕ СИНХРОНИЗАЦИЈЕ ИЕЕЕ 1588 ПРИ КОРИШЋЕЊУ СТАНДАРДА ИЕЦ 61850 У ТЕЛЕЗАШТИТНИМ УРЕЂАЈИМА</b>	
Анка Кабовић, Миленко Кабовић, Владимир Челебић, Ива Салом, Срђан Митровић	
Р Д2 13 .....	414
<b>ПРИМЕНА ИП МПЛС МРЕЖЕ ЕПС-А ЗА ОБЕЗБЕЂИВАЊЕ КОМУНИКАЦИОНИХ ПОТРЕБА</b>	
Данило Лаловић, Весна Вукићевић, Иван Вукадиновић, Златко Митровић, Миодраг Јевтић, Далибор Митић	





**C2 00**

## **ГРУПА Ц2: УПРАВЉАЊЕ И ЕКСПЛОАТАЦИЈА ЕЕС**

### **ИЗВЕШТАЈ СТРУЧНОГ ИЗВЕСТИОЦА**

**Горан ЈАКУПОВИЋ, Институт „Михајло Пупин“  
и рецензенти радова**

**Београд  
СРБИЈА**

#### ***I ОПШТЕ***

За 21. Симпозијум Управљање и Телекомуникације у ЕЕС *CIGRE* Србија утврђене су следеће преференцијалне теме Студијског комитета Ц2:

1. Обезбеђивање сигурног рада електроенергетског система при високом уделу обновљивих извора, планирање рада, обезбеђивање адекватности и флексибилности, помоћне услуге.
2. Савремене технологије и рачунарски алати за управљање и подршку одлучивању у електроенергетском систему, примена машинског учења, вештачке интелигенције. Утицај cyber security процедура и решења на управљање електроенергетским системом.
3. Унапређење координације рада TSO-DSO, дистрибурана производња, управљање потрошњом.
4. Унапређење и изазови локалних система управљања електрана, трансформаторских станица и разводних постројења.
5. Преглед, транспоновање и примена међународне регулативе на рад електроенергетског система Србије.

За 21. Симпозијум пријављено је 26 реферата, а достављено је 19 радова за рецензију. Од достављених радова за излагање је прихваћено 18 радова, а за један рад није достављена коригована верзија после рецензије.

По преференцијалним темама структура прихваћених радова је следећа: за тему 1 прихваћена су 4 рада, за тему 2 је прихваћено 11 радова, за тему 3 није било пријављених радова, за тему 4 прихваћена су 2 рада и за тему 5 је прихваћен 1 рад.

**Р Ц 01      ИЗАЗОВИ ПОВЕЗАНИ СА МАСОВНИМ УВОЂЕЊЕМ  
ОБНОВЉИВИХ ИЗВОРА ЕНЕРГИЈЕ И ЊИХОВОМ  
ИНТЕГРАЦИЈОМ СА МРЕЖОМ**

**Нинел ЧУКАЛЕВСКИ**  
*Независни консултант*

**Кратак садржај**

Данашња енергетска трансформација је у значајној мери базирана на масовном укључењу обновљивих извора енергије (ОИЕ) у производни портфолио енергетских компанија, али и променама код потрошача. Као последица присуства уређаја енергетске електронике, јављају се проблеми, како у сфери енергија/снага, тако и у сфери техничких перформанси система. Техничка питања у домену регулације учестаности, напона, кратких спојева, стабилности и квалитета напона су адресирана и решавана путем истраживања и развоја технологије, али и унапређењем тржишно- регулаторних механизма. У овом раду ће пажња бити сконцентрисана на техничке проблеме који прате високо % учешће ОИЕ, посебно оне који резултирају појавом несигурних режима, и поремећајима ЕЕС. Постојеће студије прикључења ОИЕ на мрежу, нису стандардизоване, а изазови све комплекснијих модела и симулација нису увек адекватно третирани, на шта указују догађаји у експлоатацији. На проблематику различитих категорија модела и потребних симулационих платформи, посебно оних у реалном времену за системе управљања и заштите, ће се у раду посебно обратити пажња. На крају, као илустрација ће се приказати примери релевантних поремећаја у неколико иностраних ЕЕС са значајним уделом ОИЕ. Међународно искуство указује да постојећи фазорски модели и конвенционални алати анализе стабилности ЕЕС често нису били у стању да укажу на раније описане феномене (који карактеришу масовну примену IBR) због поједностављења која су својствена тим алатима, што је водило ка стању у коме захтеви за прикључење нису довољно обухватни и прецизни. Последица наведених пропуста да се довољно рано укаже на проблеме, обично доводи до тога да се СО са њима по први пут срећу током реалног погона ЕЕС, са обично скупим последицама. У низу развијених земаља, са брзим порастом удела ОИЕ, наведено је препознато и повезана легислатива унапређена, кроз захтеве да ЕМТ моделе елемената ОИЕ+HV AC/DC система њихов испоручилац обавезно доставља довољно рано, и да се студије прикључења раде обухватније, а не локално као до сада, као и низ других мера. На крају су дате препоруке за наше услове.

*Питања за дискусију:*

- 1. Које мере по вашем мишљењу оператор система може да предузме да обезбеди адекватност система у условима високог нивоа интеграције варијабилних ОИЕ у ЕЕС?*
- 2. Шта мислите о најновијим уведеним мерама везаним за постојање обавезне регулационе резерве уз објекте за производњу из варијабилних ОИЕ уколико анализа адекватности покаже да за тим постоји потреба?*
- 3. Како по вама треба да се развија производни микс Републике Србије у будућности како би била обезбедјено сигурно снабдевање и енергетска независност?*

**Р Ц2 02      ПРОГНОЗА ПРОИЗВОДЊЕ ОБНОВЉИВИХ ИЗВОРА ЕНЕРГИЈЕ -  
ПЕТОГОДИШЊЕ ИСКУСТВО ОПЕРАТОРА ПРЕНОСНОГ  
СИСТЕМА**

**Петар ПЕТРОВИЋ, Марија ЂОРЂЕВИЋ, Срђан МЛАДЕНОВИЋ**  
*АД Електро mreжа Србије*

**Кратак садржај**

Оператор преносног система је дужан да обезбеди баланс између потрошње и производње у сваком тренутку. Са повећањем инсталисаних снаге варијантних, обнављајућих извора енергије у систему, расте потреба за већим количинама балансне енергије која ће пружати сигуран и уздан рад електроенергетског система. ЕМС АД свакодневно спроводи процес прогнозе производње из обнављајућих извора електричне енергије. У раду су представљена искуства током петогодишњег рада са освртом на квалитет грешке добијене из различитих извора прогнозе ОИЕ. Дат је кратак осврт на регулаторни оквир и веза са четвртим Енергетским пакетом Европске комисије. У раду је приказана хронологија укључивања ветроелектрана у ЕЕС Србије. Рад презентује сервисе и алата који се користе у ЕМС АД у изради прогнозе производње у оперативном планирању рада преносног система.

Дат је осврт на утицај грешке прогнозе на друге процесе, а пре свега из перспективе будућих очекиваних укључења ОИЕ у електроенергетски систем Републике Србије.

*Питања за дискусију:*

- 1. Да ли аутори могу да дају упоредни приказ тачности прогноза добијених коришћењем описаних софтверских пакета и прогноза које достављају произвођачи (нпр. средње дневне или средње сатне грешке)?*
- 2. Да ли су аутори разматрали могућност употребе изведених прогноза, које би се креирале на бази прогноза добијених од произвођача и прогноза алата којима располаже ЕМС? Да ли неки од алата који користи ЕМС има могућност генерисања изведених прогноза?*
- 3. Да ли су аутори на бази искуства у раду са описаним алатима дошли до закључака како би се евентуално могла унапредити функционалност ових алата?*

**Р Ц2 03      АПЛИКАЦИЈА ЗА ПРОРАЧУН МОГУЋНОСТИ ОПТЕРЕЂЕЊА  
ТРАНСФОРМАТОРА**

**Павле ЛУЧИЋ, Милош СТОЈИЋ, Горан ЈАКУПОВИЋ,**  
**Совјетка КРСТОНИЈЕВИЋ**  
*Институт Михајло Пупин – ИМП Аутоматика*

**Кратак садржај**

Апликација за прорачун могућности оптерећења трансформатора (ПМОТ) омогућава сагледавање могућег струјног оптерећивања појединих трансформатора, са циљем њихове ефикасније употребе у склопу планирања управљања електроенергетским системом. Апликација се базира на термичком моделу трансформатора. Основна функција апликације је да, за претпостављене услове оптерећивања трансформатора у будућности, рачуна



вредности и трајање могућих оптерећења у односу на ограничење температуре расхладног уља. Апликација пружа увид у реално температурно стање трансформатора и путем корисничког интерфејса омогућава процену преоптерећења за будући временски период од интереса. Улазни подаци за прорачун преузимају се из конфигурационих датотека генерисаних из Апликативне базе података (АБП). Резултати прорачуна доступни су кориснику путем графичког интерфејса, у XML излазним датотекама и у облику извештаја о извршеном прорачуну. Апликација нуди два режима рада: прорачун максималне дозвољене струје за задати временски период и прорачун температуре трансформатора за задати временски период и задату струју. Апликација је развијана у тандему са Апликацијом за прорачун могућности оптерећења далековода (ПМОДВ). Планирана је њихова заједничка интеграција са Апликацијом за диспечерске токове снага (DPF). У студијском режиму биће омогућене „what-if“ анализе о могућности искоришћења и преоптерећења далековода и трансформатора у режимима рада који се добијају на бази претпостављених будућих уклопних стања у мрежи и других параметара који се задају у апликацији DPF. У овом раду биће дате основе коришћеног математичког модела, приказ архитектуре система, аспекти софтверске имплементације и, на крају, правци даљег развоја.

#### Питања за дискусију:

1. *Да ли је процењена тачност резултата прорачуна ПМОТ апликације са подацима добијеним из реалног окружења? Овде се мисли на упоредну анализу резултата прорачуна и податка добијених са трансформатора у раду на мрежи?*
2. *Да ли постоји ограничење примене ПМОТ апликације у зависности од типа трансформатора као и преносног односа и да ли и како ова два фактора утичу на тачност прорачуна?*
3. *Да ли интеграција ПМОТ апликације са SCADA системом и њен рад у пуној функционалности подразумева проширење стандардне SCADA инфраструктуре?*

#### **Р Ц 04 СИМУЛАТОР И ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ГРУПНОГ РЕГУЛАТОРА РЕАКТИВНЕ СНАГЕ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ ЂЕРДАП 1**

**Милан ЈОСИФОВИЋ, Горан ЈАКУПОВИЋ,  
Милан БЈЕДОВ, Жељко ДАМЉАНОВИЋ,  
Никола ВАСИЉЕВИЋ, Нинел ЧУКАЛЕВСКИ**  
*Институт Михајло Пупин – ИМП Аутоматика*

**Владан ГЕМАЉЕВИЋ**  
*GEMA PLC CONTROL*

#### **Кратак садржај**

У овом раду је прво описан алгоритам који је тестиран у оквиру софтверског симулатор рада групног регулатора реактивне снаге (ГРПС) електране, реализован у MATLAB/Simulink окружењу. Симулатор је развијен у циљу верификације алгоритма пре реалне имплементације на ХЕ Ђердап 1. На почетку је дат кратак опис функција ГРПС електране који обавља расподелу захтеване производње реактивне снаге електране или захтеваног напона на сабирници на агрегате ангажоване у вишеагрегатним електранама. Референца (захтев) се задаје као реактивна снага или жељени напон на сабирници који се даље прослеђује на обраду и расподелу по агрегатима који су у том

тренутку укључени у групну регулацију на тој сабирници. Затим је описана функција групног регулатора која је задужена за одржавање статизма реактивне снаге електране у зависности од напона. Посебна пажња усмерена је на подешавање карактеристике и граница статизма реактивне снаге у зависности од напона постројења и могућност задавања референци од стране оператора електране или из удаљеног центра. У наставку рада је дат и преглед регулатора у виду поједностављене шеме групног регулатора за један систем сабирница са пратећим описима величина. Такође, објашњена је расподела снаге по агрегатима прикључених на исту сабирницу, као и провера лимита. У раду је представљен специфичан начин рада ГРПС електране са смањеним бројем агрегата који се могу увести/уклонити из заједничког управљања групног регулатора, док ће агрегати повезани на раздвојене сабирнице радити независно. Затим су приказани структура симулатора као и део добијених резултата симулације. На крају је дат приказ архитектуре имплементираних система, као и резултати тестирања на реалном систему (на објекту ХЕ Ђердап 1) у режиму рада регулације реактивне снаге, као и за режим регулације напона.

#### Питања за дискусију:

1. *Да ли се аутоматски регулатори напона појединачних агрегата у режиму регулације напона или реактивне снаге када су укључени у ГРПС, пошто је на структурној шеми приказано да се импулсним управљањем задаје промена реактивне снаге агрегата?*
2. *Колика промена реактивне снаге одговара једном задатом импулсу и да ли вредност промене реактивне снаге зависи од параметара мреже на коју је прикључен агрегат?*
3. *У раду је приказана архитектура имплементираних система. Како је ГРПС имплементиран на постојећем групном регулатору активне снаге (ГРАС), јасно је постоји веза између оператора система и уређаја на коме је имплементирана функција ГРПС. Да ли постоји могућност директног управљања оператора система уређајем ГРПС?*

## **Р Ц 2 05      ПРИМЕНА ГЕНЕТИЧКОГ АЛГОРИТМА (GA) КОД ИЗБОРА АГРЕГАТА ЗА ПРОИЗВОДЊУ НА ХЕ ПЕРУЋИЦА**

**Радомир СТАМАТОВИЋ, Гојко БЛАГОЈЕВИЋ, Предраг ИЛИЋ,  
Милена КРУЉЕВИЋ, Марија САВИЋ**

*Институт Михајло Пупин – ИМП Аутоматика*

### **Кратак садржај**

Због што бољег искоришћења потенцијала воде и обезбеђења балансне резерве за потребе регулације енергетског система, неопходно је оптимално испланирати рад хидроелектране.

Вредности производње хидроелектране су задате у дефинисаним временским интервалима на основу краткорочног планирања добијеног оптимизацијом производног микса од балансно одговорне стране, а познати су и подаци о водним ресурсима и расположивости агрегата. При овим условима треба предвидети оптимално коришћење агрегата и расположиве количине воде из акумулација.

Код ХЕ са више агрегата, избор агрегата зависи од губитака у цевоводима, механичких губитака на турбинама, електричних губитака на генераторима итд. Циљ планирања треба да буде оптимално коришћење потенцијала воде и коришћења агрегата, а резултат оптимизације су протоци по агрегатима и цевоводима, такви да се обезбеди задата производња хидроелектране. Овај циљ је описан циљном функцијом, која је дефинисана нелинеарном везом више варијабли, у овом случају степена искоришћења и протока сваког агрегата понаособ.

Добијени резултати за протоке представљају улазне податке за даље планирање, углавном за планирање обезбеђивања довољне количине воде у улазној грађевини, за производњу електране а то практично значи одржавање коте улазне грађевине у задатом опсегу.

У раду је приказан поступак добијања и решавања циљне функције помоћу генетичког алгорита (ГА), уз најједноставнија ограничења улазних варијабли. Принцип генетичког алгорита састоји се из процене, селекције, укрштања и мутације унутар једне популације. Кроз итеративан поступак ова четири принципа, кроз неколико генерација, добија се решење циљне функције.

#### Питања за дискусију:

- 1. С обзиром да је у овом показном примеру занемарена физичка зависност протока и степена корисности, да ли аутори сматрају да би коришћење свих нелинеарних зависности ове две величине (ишлокасти дијаграми, зависност губитака у цевоводу од протока, промена нето пада у зависности од протока), са циљном функцијом максимизације степена корисности, толико усложнило прорачун да би се употребљивост ГА у том случају довела у питање?*
- 2. Да ли је поред задате енергије у почетне услове могуће уврстити и неопходну балансну резерву по електрани? Које би све делове кода требало изменити да би се и балансна резерва узела у обзир?*
- 3. С обзиром на ограничен број комбинација агрегата који могу да обезбеде одређену задату снагу, да ли аутори сматрају да је боље да при оптимизацији (максимизацији) степена корисности електране, сам ГА користи методе за укључење/искључење агрегата (као што је описано у раду), или је боље да се софтвер реализује тако да се ГА понавља на унапред дефинисаним комбинацијама агрегата које могу да обезбеде задату снагу, а да се потом врши одабир најбољег решења по комбинацији? Суштина питања је да ли методом која је описана у раду ГА може да се "заглави" у неком локалном минимуму?*



**Владимир БЕЧЕЈАЦ, Александар ГЕОРГИЈЕВ,  
Милош ЈОВАНОВИЋ**  
*АД Електромрежа Србије*

### **Кратак садржај**

Овај рад испитује методе за детекцију аномалија у електроенергетским системима коришћењем података прикупљених са *Phasor Measurement Units* (PMU) уређаја. PMU уређаји омогућавају прецизна мерења фазора напона и струје у реалном времену, што пружа увид у стање мреже у сваком тренутку. Фокус је на препознавању одступања у угловима напона, која могу указивати на потенцијалне кварове или нестабилности у систему.

У раду се примењују статистичке методе и алгоритми машинског учења, као што су *Isolation Forest* и *autoencoders*, за анализу великих количина података. Ови алгоритми омогућавају идентификацију аномалија које би могле проћи неопажено традиционалним методама детекције. *Isolation Forest* користи насумично генерисана стабла за изолацију података, где је дужина путање кроз стабло кључна за препознавање аномалија. С друге стране, *autoencoders* су неуронске мреже које уче да реконструишу улазне податке, а велика разлика између оригиналног и реконструисаног податка може указивати на аномалију.

Резултати показују да обе методе могу ефикасно идентификовати аномалије у електроенергетским системима, омогућавајући оператерима да реагују превентивно и предузму мере које ће побољшати стабилност система. *Isolation Forest* алгоритам се показао као робустан за детекцију одступања чак и у ситуацијама где су аномалије релативно ретке. *Autoencoder* алгоритми су посебно ефикасни у раду са високодимензионалним подацима, где су односи између варијабли сложени и тешко их је моделовати традиционалним техникама.

Ово истраживање пружа основу за унапређење система за надзор и одржавање мрежа, чиме се смањује ризик од каскадних кварова и повећава поузданост електроенергетских система.

### Питања за дискусију:

1. Да ли су аутори анализирали колика је покривеност система ПМУ уређајима потребна да би описани алгоритми могли бити ефикасно и поуздано примењени?
2. Да ли су аутори разматрали могућност унапређења и проширења описаних механизма у смислу могућности давања статистичке процене да ли је детектована аномалија резултат аномалног стања у систему или аномалне (неисправне) телеметрије?

## Р Ц2 07 ОПТИМИЗАЦИЈА ПОСТАВЉАЊА ПМУ УРЕЂАЈА ЗА ПОБОЉШАНУ ОПСЕРВАБИЛНОСТ МРЕЖЕ КОРИШЋЕЊЕМ MATLAB-A

Владимир БЕЧЕЈАЦ  
АД Електромрежа Србије

### Кратак садржај

Овај рад се бави проблематиком оптималног постављања фазорских мерних јединица (ПМУ) у електроенергетским системима, користећи MATLAB апликацију која је развијена за ту сврху. ПМУ уређаји представљају кључну технологију за праћење и контролу модерних електроенергетских мрежа јер омогућавају прецизно и синхронизовано мерење електричних величина као што су напон, струја и фазни угао. Главни циљ ове апликације је да идентификује оптималне локације за постављање ПМУ уређаја, максимизујући поузданост и ефикасност надзора система, уз обезбеђивање потпуне тополошке опсервабилности мреже.

У раду се користи комбинација класичних и напредних оптимизационих метода, укључујући *Particle Swarm Optimization* (PSO), за решавање проблема оптималне инсталације ПМУ уређаја. PSO алгоритам је имплементиран у апликацији са циљем да минимизира број ПМУ уређаја потребних за потпуну опсервабилност мреже, уз истовремено задовољавање техничких и оперативних ограничења електроенергетског система. Апликација такође узима у обзир Н-1 анализе и постојеће ПМУ уређаје, што додатно побољшава процес одлучивања и омогућава операторима мреже да планирају оптималну конфигурацију са високом отпорношћу на кварове.

Апликација је развијена у MATLAB окружењу, пружајући кориснички интерфејс који омогућава унос података о топологији мреже и конфигурацији система. Кроз интерфејс, корисници могу изабрати различите сценарије анализе, као што су основни прорачун, Н-1 прорачун и анализа са већ постојећим ПМУ уређајима. Имплементација алгоритама за оптимизацију, као и паралелна обрада података, омогућава ефикасно решавање проблема и за веће мреже.

Резултати симулација показују да развијена апликација успешно идентификује оптималне локације за ПМУ уређаје, чиме се постиже потпуно посматрање система са минималним бројем уређаја. Поред тога, апликација израчунава *System Observability Redundancy Index* (SORI) како би квантитативно оценила квалитет сваког решења. Решења са највећим SORI индексом представљају оптималну конфигурацију за постављање ПМУ уређаја, пружајући оператерима електроенергетског система могућност да побољшају стабилност и надзор мреже.

Овај рад је спроведен у оквиру европског пројекта *Horizon Europe* под називом "*Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>*". У будућности, предложени приступ може бити проширен и на друге мреже различитих величина и конфигурација, уз додатне анализе које укључују варијације оптерећења и интеграцију обновљивих извора енергије.

### Питања за дискусију:

1. Да ли су PSO методом рађене анализе на моделу преносног система EMC-a? Ако јесу, какви су резултати у погледу оквирног броја ПМУ-а које би требало

*поставити како би комплетан преносни систем био опсервабилан коришћењем ПМУ-а?*

- 2. На основу досадашњег искуства у оперативном раду, може ли аутор да наведе неки пример када је опсервабилност мреже преко ПМУ-а спречила критичну ситуацију у мрежи преносног система ЕМС-а?*
- 3. Колико ПМУ-ова тренутно постоји у преносном систему ЕМС-а и где се налазе?*

## **Р Ц 2 08 УТИЦАЈ НЕКОМПЛЕТНИХ СКУПОВА ПОДАТАКА НА МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА У ЕНЕРГЕТИЦИ**

**Драган МАРИНОВИЋ, Горан ЈОВАНОВИЋ, Бојан РАКИЋ,  
Петар НИКОЛИЋ, Жарко НЕСТОРОВИЋ**

*ЕПС АД Београд, Огранак Ђердап Кладово*

### **Кратак садржај**

Процеси у електроиндустрији прате се на основу података појединих параметара који представљају дискретне вредности у времену. Скупови дискретних података могу заузимати велику количину меморије и представљати значајан проблем при обради података или брзом доношењу одлука. Такође, поједини процеси могу захтевати анализу постојећег дискретног скупа података који због свог обима може резултирати или значајним интервалом времена потребним за анализу или потенцијално погрешним закључцима. Са друге стране, моделирање процеса односно налажење функције која на најбољи начин апроксимира посматрани процес може довести до значајних одступања добијених резултата мерења у односу на модел. Наведени разлози мотивисали су истраживање утицаја некомплетних скупова података на моделирање појединих процеса у енергетици. Под некомплетним скупом података подразумевамо подскуп скупа података који описују посматрани процес а који се користи за моделирање посматраног процеса. Како је при великом броју података практично немогуће обрадити све могуће комбинације са елиминацијом података у овом истраживању елиминисани су поједини подаци и одређен модел применом полиномне регресије шестог степена. Након дефинисања методе истраживања прихваћени метод примењен је на податке о промени температуре водећег лежаја турбине агрегата А6 на ХЕ Ђердап 1. На узорку од 60 резултата мерења температуре водећег лежаја агрегата А6 извршено је моделирање по методи најмањих квадрата за полином шестог степена и добијена су одступања мања од 0.6 °C. Затим су из скупа података елиминисани поједини подаци по избору аутора и добијени су различити коефицијенти за полином шестог степена. У даљем истраживању ови коефицијенти су коришћени за израчунавање различитих функција и израчуната су одступања за сваку од функција у односу на податке добијене мерењем. Добијени резултати указују на могућност да и редуковани (некомплетни) скупови могу резултирати сличним односно статистички једнаким моделима. Ова чињеница указује на могућност добијања модела који описују процесе на задовољавајућем нивоу поузданости и уз повећану ефикасност. Добијени резултати указују да постоји могућност статистички доброг слагања резултата добијених мерењем и моделирањем.

### Питања за дискусију:

- 1. Који софтверски алат је коришћен за процену температуре водећег лежаја методом описаном у раду и да ли се планира развој софтвера за ширу употребу у пракси?*

2. Да ли постоје параметри или спољни фактори који могу значајно да утичу на варијације температуре водећег лежаја као и на тачност процене температуре методом описаном у раду?
3. У раду је наведено да би у даљим истраживањима требало користити узорке већег обима. Да ли постоји претпоставка колики број узорака би дао задовољавајуће резултате утицаја на процес анализе обзиром да превелик обим података може отежати анализу?

**Р Ц2 09 ПРИМЕНА ИЗОЛОВАНИХ ОКРУЖЕЊА И ДИГИТАЛНИХ БЛИЗАНАЦА У ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦИ НА ПРИМЕРУ ТЕХНИЧКИХ РЕШЕЊА HORIZON EUROPE ПРОЈЕКТА R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>**

**Горан ЈАКУПОВИЋ, Марија ПОПОВИЋ, Игор БУНДАЛО,  
Милан ЈОСИФОВИЋ**  
*Институт Михајло Пупин*  
**Душан ПРЕШИЋ**  
*Центар за Координацију Сигурности -СЦЦ*  
**Немања ВУКОЈИЧИЋ**  
*АД Електромрежа Србије*

**Кратак садржај**

У овом раду су прво описани основни концепти дигиталних близанаца („*digital twin*“) и изолованих окружења („*sandboxing*“), са посебним освртом на примене у електроенергетици и SCADA/EMS системима. Изоловано окружење је скуп сајбер безбедносних мера која подразумевају креирање окружења, познатог као „*sandbox*“, у којем је могуће покретати, тестирати и анализирати код или апликацију без утицаја на остатак апликације, друге апликације, системе или мреже. Дигитални близанац подразумева стварање виртуелног окружења које одражава понашање физичког система, омогућавајући тестирање и анализу без утицаја на стварни физички систем. Концепт и термин дигитални близанац користи се од почетка овог века. Примена термина дигитални близанац у технологији електроенергетских система постала је врло популарна у последњих неколико година, међутим то не значи да су дигитални близанци потпуно нови концепт у технологији електроенергетских система, будући да модели електроенергетских система који се широко користе у апликацијама за електроенергетске системе (EMS) често, али не увек, представљају дигиталне близанце физичког електроенергетског система. У оквиру овог рада је дат преглед и опис примене изолованих окружења и дигиталних близанаца у оквиру техничких решења и радних пакета *Horizon Europe* пројекта „*Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>*“ (Grant agreement ID: 101075714).

Питања за дискусију:

1. Где би, по мишљењу аутора, ЕПС и ЕМС могли прво применити технику дигиталних близанаца?
2. Да ли аутор може ближе описати како систем помаже диспечеру приликом поновног успостављања система након раздвајања?

## **Р Ц 2 10      ПРЕДЛОГ НАЧИНА РАСПОДЕЛЕ ТРОШКОВА КОРЕКТИВНИХ МЕРА СА ПРЕКОГРАНИЧНИМ УТИЦАЈЕМ**

**Срђан СУБОТИЋ, Јулијана ВИЋОВАЦ,  
Милица НЕКТАРИЈЕВИЋ, Александар ВОЈИНОВИЋ**  
*АД Електромрежа Србије*

### **Кратак садржај**

Расподела трошкова корективних мера (ремедијалних акција) са прекограничним утицајем је саставни део процеса обезбеђивања сигурности рада преносног система на регионалном нивоу.

Европска Уредба о успостављању смерница за рад система за пренос електричне енергије 1485/2017 [1] која је прилагођена за примену у уговорним странама Енергетске заједнице, у члану 75. предвиђа усвајање методологије за координацију анализа оперативне сигурности. Даље, члан 76. уређује начин доношења и садржај ове методологије и наводи да је њен саставни део и расподела трошкова корективних мера. Такође, ова регулатива наводи да у принципу, трошкове загушења са прекограничним утицајем сноси оператори преносних система сразмерно негативном утицају размене енергије између предметних контролних области на загушени елемент мреже. Приметимо да оваква формулација дозвољава и друге начине за расподелу трошкова корективних мера, што је искоришћено да се у оквиру европског пројекта *Reliability, Resilience and Defence technology for the Grid (R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>)* разради расподела трошкова која је објашњена у овом раду.

У региону Западног Балкана, оператори преносног система су израдили методологију за координисане анализе оперативне сигурности, али без расподеле трошкова, и она се примењује код корисника услуга регионалног координационог центра СЦЦ, Београд. За разлику од других региона, загушења у мрежи нису толико честа појава, али је приметно да се њихов број повећава, те питање расподеле трошкова корективних мера постаје хитно за решавање.

Постоји неколико приступа код расподеле трошкова. На пример, трошкове може да сноси оператор који активира корективну меру (што одговара тренутном стању у нашем региону без договора о подели трошкова). Други приступ је да трошкове сноси оператор који захтева покретање корективне мере. Трећи приступ одговара наведеном пасусу из уредбе 2017/1485 – овакав приступ неки називају и "загађивач плаћа".

Предлог расподеле трошкова који је представљен у овом раду полази од чињенице да корективне мере могу проузроковати високе трошкове, па би у нашем региону више одговарао принцип извесне социјализације трошкова, тј. равномернија расподела између укључених оператора. Такође, замишљено је да се расподела трошкова примењује на све корективне мере са прекограничним утицајем које су резултат оптимизације трошкова и договора оператора преносних система у региону.

### Питања за дискусију:

1. *Код објашњавања техничког дела предложене методологије да ли је могуће осим текстуалног описа поља матрица: MatrixXNECoverloadCNT, MatrixXNECRApdf,*

*MatrixXNECRAquadrant i MatrixAllCNT на језгровитију (математички) начин написати како се оне формирају?*

- 2. Које су предности и мане предложене методологије са социјализацијом трошкова тј. равномернијом расподелом трошкова између укључених оператора преносног система у односу на остале методологије за расподелу трошкова корективних акција са прекограничним утицајем?*

## **Р Ц 2 11      АПЛИКАЦИЈА ЗА АУТОМАТСКУ ИЗРАДУ ТОПОЛОШКОГ ФАЈЛА ПОТРЕБНОГ ЗА КРЕИРАЊЕ МРЕЖНИХ МОДЕЛА**

**Јулијана ВИЋОВАЦ, Марија МИЉУШ, Ненад ЈАНКОВИЋ,  
Срђан СУБОТИЋ, Јасмина ЂОРЂЕВИЋ, Јелена ЂУРЂЕВИЋ,  
Милош МИЋИЋ, Александра МИКОВИЋ**  
*АД Електромрежа Србије*

### **Кратак садржај**

Оператор преносног система ЕМС АД свакодневно израђује мрежне моделе за дан унапред (D1CF), два дана унапред (D2CF) и унутар дана (IDCF) према захтевима ENTSO-E. Са циљем даљег унапређења, у ENTSO-E се све више инсистира како на повећању тачности мрежних модела, тако и на изради додатних модела. Тренутни циљ је да се у блиској будућности мрежни модели, поред досадашњих, свакодневно израђују и за 24 сата за седам дана унапред, као и сваког сата унутар дана за све преостале сате текућег дана (уместо на сваких 8 сати како је тренутно).

Како се за креирање мрежних модела користе четири улазна фајла (подаци о потрошњи, производњи, размени и топологији) јавља се потреба за аутоматизацијом њиховог креирања у циљу испуњења свих захтева које намеће ЕНТСО-Е, што подразумева смањење утицаја људских грешака и повећање ефикасности процеса израде ових модела.

Најкомплекснији фајл који се користи за израду мрежних модела представља планирана топологија система и он садржи тополошки статус (укључен/искључен) елеманата мреже, односно високонапонских водова, трансформатора и спојних поља. У нашем систему, највећи број промена топологије система узрокован је планираним радовима у преносном систему, те је ове податке неопходно укључити у тополошки фајл на одговарајући начин.

У овом раду дат је преглед свих активности које су спроведене како би се успоставило аутоматско креирање тополошког фајла. Описане активности су спроведене кроз европски *Horizon Europe* пројекат *Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid - R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>*. Поред израде саме апликације за аутоматско креирање тополошког фајла, дат је и осврт и на проширење модела у бази техничког информационог система, за све категорисане елементе (високонапонске водове, трансформаторе, далеководна поља, трансформаторска поља, кабловска поља, сабирнице, сабирничке растављаче) и мапирање са јединственим simID, као и проширење већ постојеће апликације за одобравање искључења у преносном систему, што је све било неопходно како би се аутоматизовала израда тополошких фајлова. Апликација ГТА је осмишљена тако да се на сваких сат времена аутоматски креира тополошки фајл са свим подацима који су унети кроз апликацију „Радови“. На тај начин сви одобрени радови у систему су одмах видљиви у тополошком фајлу.

Креирање тополошког фајла преко апликације ТТА омогућава да се успостави израда модела на сваких сат времена, као и спремност ЕМС АД да у тренутку покретања израде модела за седам дана унапред буде у могућности да у најкраћем року испуни захтеве које прописује ENTSO-E.

Питања за дискусију:

1. На који начин се врши креирање *simID* за категорисане елементе?
2. Да ли постоје планови за додатну аутоматизацију израде мрежних модела?
3. Да ли аутори имају сазнања у којој мери је аутоматизовано креирање израде мрежног модела у ТСО-овима у окружењу?

**Р Ц 2 12      ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ENTSO-E ПРАВИЛА ЗА ПОРЕМЕЋЕНИ  
ПОГОН И ПОНОВНО УСПОСТАВЉАЊЕ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА ЗА СЛУЧАЈ ПОДЕЛЕ  
СИСТЕМА**

**Игор БУНДАЛО, Горан ЈАКУПОВИЋ, Марија ПОПОВИЋ**

*Институт Михајло Пупин*

**Срђан СУБОТИЋ, Кристина ЈАНОШЕВИЋ**

*АД Електромрежа Србије*

**Предраг СИМИЋ, Душан ПРЕШИЋ**

*Центар за координацију сигурности SCC д. о. о. Београд*

**Кратак садржај**

Један од стратешких циљева Европске уније у домену енергетике је унапређење отпорности и поузданости електроенергетског система (ЕЕС) узимајући у обзир све већи број претњи које могу утицати на тако критичну инфраструктуру. *Horizon Europe* пројекат “*Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R2D2*” (Grant agreement ID: 101075714), између осталог, бави се овим изазовом кроз развој специјализованих производа намењених превенцији, заштити и обнови ЕЕС-а у различитим сценаријима поремећаја. Један од таквих производа је Resilience Suite for TSO & DSO у оквиру којег је развијен *Emergency & Restoration – System Split* модул. Он обухвата апликацију за детекцију поделе електроенергетског система која праћењем промене топологије мреже у реалном времену и прецизних мерења фреквенције добијених од Phasor Measurement Unit (PMU) уређаја, детектује поделу система и линију поделе. Други део модула је компонента за координацију која усмерава комуникацију на регионалном нивоу у југоисточној Европи, пратећи унапред дефинисане сценарије, и олакшава доношење оперативних одлука на основу утврђених правила и процедура. Кроз овај модул је тако операционализована обавеза регионалног координационог центра и оператора преносних система из истог региона у вези са регионалном координацијом током великих поремећаја, као и примена сложених правила која важе за интерконекцију Континенталне Европе у случају њеног распада на подсистеме. У овом раду је описана архитектура Emergency & Restoration – System Split модула и поједине компоненте, а акценат је стављен на опис компоненте за координацију. Најзначајније компоненте у оквиру архитектуре система су: SCADA систем, апликативни сервер на ком се налази апликација за детекцију поделе система и координациона платформа. Интеграција је извршена за VIEW4 SCADA системом али могућа је интеграција са било којим стандардним SCADA системом коришћењем адекватног апликативног програмског интерфејса. Апликација за детекцију поделе система је развијена



на Linux платформи, коришћењем програмског језика C++. Као платформа за чување модела система и других података користи се релациона *MySQL* база података. Координациона платформа се заснива на платформи *OperatorFabric* која је развијена од стране Linux фондације и садржи код који је јавно доступан..

Питања за дискусију:

1. Који су конкретни изазови у имплементацији "Emergency & Restoration – System Split" модула у стварном окружењу и како су решени током процеса интеграције са СЦАДА системом?
2. На који начин систем реагује на потенцијалне грешке (или нерасположивост) у ПМУ подацима или SCADA телеметрији, и да ли постоји план за унапређење тачности алгоритма за детекцију поделе система?
3. Да ли постоје планови за тестирање модула у различитим регионалним мрежама и како планирате да евалуирате његову ефикасност у стварним условима?

**Р Ц 13      МЕТОДА ЗА МОДЕЛОВАЊЕ ИЗВОРА БУКЕ, ПРОРАЧУН И  
ОЦЕНУ НИВОА БУКЕ УСЛЕД КОРОНЕ У ОКОЛИНИ  
НАДЗЕМНОГ ВОДА**

**Ива САЛОМ**

*Институт Михајло Пупин*

**Дејан ТОДОРОВИЋ**

*DIRIGENT ACOUSTICS*

**Миленко КАБОВИЋ, Владимир ЧЕЛЕБИЋ, Марко РАЛИЋ**

*Институт Михајло Пупин*

**Небојша ПЕТРОВИЋ, Нада ЦУРОВИЋ**

*АД Електромрежа Србије*

**Кратак садржај**

Са индустријским и технолошким развојем расте потреба за електричном енергијом, као и за што ефикаснијим преносом, што је условило развој мреже преноса на вишим напонским нивоима, али и донело нове проблеме, који се, између осталог, односе се и на утицај електроенергетског система и његових појединих делова на животну средину. Овакви проблеми су постали посебно значајни са повећањем глобалне еколошке свести. У том смислу, надземни водови данас могу да представљају угрожавајуће структуре. Стога је приликом пројектовања нових водова потребно водити рачуна о утицају на животну средину.

Једна од појава, која је најдоминантија на надземним водовима је корона. Највећи број ефеката, који су последица короне, има негативан утицај како на рад електроенергетског система, тако и на животну средину. Поред нејонизујућег зрачења, бука од ефекта короне је основни параметар утицаја високонапонских водова на животну средину, који постаје значајан за водове напонских нивоа од 400 kV навише. Услед све већег приближавања насеља надземним водовима на вишим напонским нивоима, проблем буке и мере умањења буке постали су актуелна тема на глобалном нивоу.

У складу са тим, у оквиру Електромреже Србије спроведена је студија утицаја буке коју стварају високонапонски надземни водови на животну средину, у оквиру које су спроведена

опсежна истраживања, укључујући и велики број мерења нивоа буке, са циљем да се, полазећи од самог ефекта са теоријске и практичне стране, испитају и сумирају утицаји различитих параметара надземног вода на ниво буке. Битан резултат студије је развијена методологија прорачуна и оцене нивоа буке, која ће се користити приликом пројектовања високонапонских надземних водова у оквиру посебног елабората заштите од буке, а верификована је кроз мерења на стандардним реалним конфигурацијама надземних водова система преноса Републике Србије. Додатно, приказаном методологијом могуће је извршити анализу и сагледавања метода умањења нивоа буке на постојећим надземним водовима, како би се у свим будућим ситуацијама захтева за умањење буке, систематски могло поступати и бирати оптимална решења.

У овом раду биће приказана развијена методологија предикције звучног поља у околини надземног вода и процене нивоа буке која потиче од ефекта короне. Методологија је заснована на мапирању буке (ен. *noise map*) коришћењем једног од софтверских алата који испуњавају услове за прорачуне буке у животној средини – *SoundPlan*.

#### Питања за дискусију:

1. *Колико далеко од 400 kV далековода треба да буде насеље, нпр у Војводини, да би се задовољили захтеви везани за буку?*
2. *Колико се у ЕМС одмакло у примени описане методологије?*

## **Р Ц 2 14      МОДЕЛИ ПРИМЕНЕ ЕКО-ДИЗАЈН ПРИСТУПА У УПРАВЉАЊУ ЕФЕКТОМ КОРОНЕ НА ВИСОКОНАПОНСКИМ НАДЗЕМНИМ ВОДОВИМА**

**Нада ЦУРОВИЋ, Небојша ПЕТРОВИЋ**

*АД Електромрежа Србије*

**Ива САЛОМ, Миленко КАБОВИЋ, Владимир ЧЕЛЕБИЋ**

*Институт Михајло Пупин*

**Дејан ТОДОРОВИЋ**

*DIRIGENT ACOUSTICS*

### **Кратак садржај**

Енергетски системи данас осим основних базних принципа поузданости и безбедности, као један од примарних критеријума морају да укључе хармонизацију инфраструктуре са еколошким аспектима окружења. При конципирању и дизајну нових објеката изузетно важан услов су параметри и перформансе система које дефинишу мере утицаја на животну средину. У том смислу савремене технологије еко-дизајн приступа укључују се у најранијој фази развоја пројекта и морају испратити како имплементацију, тако и мониторинг током експлоатације и одржавања објеката.

Ефекат короне на високонапонским надземним водовима је значајан утицај који водови могу имати на окружење, посебно када трасе пролазе кроз урбана или делом насељена подручја. Примене еко-дизајн мера на водовима изузетно су корисни и важни како за нове водове, тако и за постојеће. Посебно треба имати на уму водове који су некада грађени на потпуно празним просторима, а са развојем насеља се сада налазе у сасвим другачијем окружењу него када су пројектовани. Додатни ефекат је и чињеница да се о ефекту короне, у тренутку када су ти водови грађени у прошлом веку, није водило рачуна.

Развијање модела еко-дизајн приступа није идентичан за нове и постојеће објекте, и сасвим је другачији приступ, као и технологија поступања.

Када се одредимо за примену модела еко-дизајн у управљању ефектом короне, бирамо један од два понуђена модела у зависности да ли се ради о новим објектима или о активностима на постојећим објектима. У раду су приказани предлози ова два модела. Модели примене еко-дизајн приступа у управљању ефектом короне на високонапонским надземним водовима су пример развоја нових технологија и систематизације активности хармонизације високонапонских водова са окружењем, али и све строжим нормативима и условима животне средине. Важно је имати систематски приступ и благовремено решавати ситуације, не само због унапредјења, већ често и као алат за одбрану од неоправданих захтева. Сагледавање техничких параметара и проактивност у приступу, омогућавају управљачима да благовремено доносе одлуке, планирају активности и у сваком тренутку примењују најбољу доступну инжењерску праксу. За квалитетну примену модела неопходна је константна инжењерска активност и праћење технолошког развоја у области водова, како би се и мере перманентно иновирале. Област високонапонских водова је у овом тренутку у вероватно најизазовнијим околностима у последњих 50 година. Захтеви за новим капацитетима и интеграцијом нових извора енергије су огромни. Са друге стране неприхватљивост од стране јавности из године у годину све озбиљнија. Да ли је реално да се у кратким временским оквирима може одговорити на све постављене захтеве и планове зелене транзиције за преносне водове, тешко је потврдити. Али развој нових технологија приступа и управљања системима и перформансама по принципу еко-дизајна, свакако јесу један од алата који треба да обезбеди одржив развој, без успорења инвестиција, али уз умањење утицаја на окружење.

Питања за дискусију:

1. Да ли ЕМС користи Еко дизајн приступ?
2. Које мере Еко дизајна се у ЕМС најчешће примењују код постојећих далековаода?
3. Како у кратку у ЕМС изгледа процес од тренутка када стигне жалба становништва на буку до примене мера за смањење буке?

**Р Ц 2 15      ПРИМЕНА СНИМАКА ВИДЕО НАДЗОРА ДАЉИНСКИ  
УПРАВЉАНИХ ПОСТРОЈЕНА ЕМС АД У АНАЛИЗИ УЗРОКА И  
ПОСЛЕДИЦА ИСПАДА ПО СТАЊЕ ПРИМАРНЕ ОПРЕМЕ**

**Христина ЈОВАНОВИЋ**

*АД Електро mreжа Србије*

**Горан МАРИЋ**

*ЦИП*

**Милош ЈАЋОВИЋ, Душан СТОЈКОВИЋ**

*АД Електро mreжа Србије*

**Кратак садржај**

Видео надзор у даљински управљаним трансформаторским станицама донео је оперативном особљу регионалних диспечерских центара ЕМС-а реално надзирање расклопне опреме којом диспечери практично управљају делом преносног система, било променом уклопног стања и токовима снага, било управљањем напонским приликама.

Оваквим концептом избегнути су безбедоносни ризици, пре свега у комуникацији са руковоцем а сами руковаоци су постављени у много безбедније зоне при манипулацијама. Овако дизајниран квалитетан видео надзор постројења уз примену апликативног софтвера даје на видео зиду управљачких центара различите кадрове постројења, било да се ради о камерама које покривају расклопну опрему у специфицираним пољима, било да се ради о панорамским камерама које дају свеобухватније кадрирање постројења.

Особље оперативних центара сада је у могућности да користећи апликативни софтвер и само задаје ново кадрирање, позицију и ротацију превасходно панорамских камера. На тај начин добила се могућност да се део или цело постројење посматра из више кадрова и перспектива.

Поред основне функције управљања камерама апликативни софтвер даје огромне могућност архивирања фотографија и видео записа према изабраним критеријумима. Са новостеченим искуствима у примени софтвера први пут је снимљен сами транутак испада елемената у постројењу и забележен на видео запису из више углова што је омогућило документовање самог испада.

Апликација је омогућила и документовање тренутка када птица из обрушавајућег лета испушта из кљуна парче жице на сабирнице постројења као прави бомбардер.

Приликом следећег испада панорамске камере су успеле да сниме распростирање пренапонског таласа по проводницима изнад кваром погођеног поља и његов утицај на изолаторске ланце на њима. Јасно се уочава различит интензитет интеракције пренапонског таласа и изолаторског ланца. Такође се види до којих ланаца се простире талас и који ланци су, према интензитету варничења угроженији.

Експлозија напонских трансформатора током ноћи у незапоседнутом постројењу посматрана из различитих углова доноси слику до којих делова може доспети запаљено уље и до које висине се простире пламен.

На овим примерима врло различитих испада се уочава колико је овај софтвер напредан и колико користи диспечерима у управљачким центрима, јер даје могућност приказа и појашњења ситуације у постројењу у тренуцима када руковалац није присутан на објекту, односно када објекат није поседнут. Време до доласка руковоца на објекат, поред анализе SCADA сигнала, може се искористити за кратку анализу снимљеног материјала са камера. Ово је од веома велике важности јер омогућава диспечерима, колико је то могуће, да сагледају узрок квара и анализирајући новонасталу ситуацију у постројењу добију смернице деловања док се трансформаторска станица не поседне.

#### Питања за дискусију:

1. У тачки 2.6 КВАР ОБРТНОГ МЕХАНИЗМА РАСТАВЉАЧА је наглашено да је СЦАДА систем приказивао нетачно стање расклопне опреме. Како је до ове грешке дошло будући да су сигнали расклопне опреме двобинарни и имају могућност приказивања статуса "квар" или "грешка" слањем две 1 из управљачког уређаја?
2. На који SCADA систем се мисли у текст за тачку 2.6, локални на објекту или у регионалном диспечерском центру?

3. *Да ли је примећена разлика у статусима опреме на та два различита контролна нивоа и да ли се зна статус опреме за наведени случај у SCADA систему Националног диспечерског центра, за случај описан у 2.6?*

**Р Ц 2 16      УПРАВЉАЊЕ ОДРЖАВАЊЕМ ЕЛЕКТРОПРЕНОСНЕ МРЕЖЕ  
ПРИМЈЕНОМ ИНТЕЛИГЕНТНИХ ЗЕМЉИШНИХ КАРТА**

**Анђела КРЉАШ**

*Центар за координацију сигурности СЦЦ д. о. о. Београд*

**Маја АНТИЋ**

*Електропренос БиХ а. д. Бања Лука, ОП Сарајево*

**Тијана МИЛОВАНОВИЋ**

*Центар за координацију сигурности СЦЦ д. о. о. Београд*

**Христина ШАРАЦ**

*Независни оператор система БиХ, Сарајево*

**Кратак садржај**

У овом раду је предложена иновативна метода управљања одржавањем електропреносне мреже заснована на примјени интелигентних земљишних карата, супротно постојећим традиционалним приступима одржавању. Описан је поступак креирања интелигентних земљишних карата, начин прикупљања, обраде, анализе и приказа дигиталних података од интереса за одржавање електропреносне мреже. Сагледани су релевантни аспекти примјене географског информационог система (ГИС) за интеграцију географије са другим релевантним подацима попут техничких података, усклађености са прописима и техничким препорукама, увида у евиденције о раду, визуелног прегледа и резултата фотографских и термовизијских снимања. На основу расположивих података описан је начин на који се врши процјена хитности интервенције на појединим елементима као и предикција потенцијалних слабих тачака. За анализу примјене ГИС-а изабран је дио електропреносног система Босне и Херцеговине (БиХ) те је формирана јединствена база атрибутних, просторних, техничких и тополошких података о далеководима, електранама и трансформаторским станицама како би се добио систем потпуно способан за анализу погонске спремности електроенергетских објеката.

У раду су описани ризици и недостаци које са собом носи традиционални приступ одржавању. Прелазак на дигиталне системе за управљање подацима и одржавањем постаје све важнији у модерним електропреносним мрежама, јер омогућава ефикаснији рад, бољу анализу и минимизацију негативних ефеката традиционалног приступа.

Успостављањем геореференциране базе података и јединственог модела интелигентне карте обезбјеђен је моћан интерфејс за вишеструко разумијевање проблематике одржавања ЕЕО-а. Креираним интелигентним картама се лако приступа, подацима се може једноставно манипулисати у складу са корисничким потребама, а креирани извјештаји и карте су врло читљиви и једноставни за анализу. Интелигентне карте су посредник којим се долази до интегрисаног система одржавања који успјешно повезује максимум свих расположивих ресурса: људи, знања, опреме, финансија и информација те представљају добар основ за економично и ефикасно анализирање перформанси електроенергетске мреже.

## Питања за дискусију:

1. Како рад говори о системском мењању приступа одржавању, огроман је број тема које се могу отворити. У наставку је издвојено неколико области о којима аутори могу дати свој коментар при презентацији рада:
  - **Изазови и опасности:** Најбитније је увек при уводјењу нових система бити свестан слабих тачака и потенцијалних опасности. Превелики број информација некавалитетно организованих и пласираних једна је од опасности која прати дигитализацију. Како аутори сагледавају ову проблематику? Како се решавају проблеми сигурности података, осетљивости и изложеност опасностима, како се ради дисперзија ризика и на који начин се чувају и праве бацкуп-ови, сигурносне копије?
  - **Техничка документација и папирна база пројеката:** Квалитетна техничка документација, била дигитална или папирна, једнако је максимално битна за квалитетно управљање процесом одржавања. На који начин се реализује управљање пројектном документацијом у новим околностима? Пројектна документација мреже за највећи део елемената није дигитална. Објекти стари педесет и више година имају своју пројектну документацију у папирној форми и вероватно ће бити у употреби још десетине година. Да ли се пројектни дигитализују у потпуности и везују за елементе мреже, да ли се само парцијално дигитализују уз рестриктивни унос без нерелевантих података, или се само успоставља релације и информације о њима?
  - **Примена базе за нетехничке области:** Евидентно је да просторна прецизност и геореференциране мапе водова изузетно могу да унапреде правне послове у области далековода. Квалитет процеса експропријације, успостављања права службености, одређивања сече растиња и одређивање правичних накнада, могу се изузетно унапредити. Како аутори виде могућности повезивања и уводјења нетехничких сектора као корисника ГИС система у преносним системима?
  - **Унапредјење заштите животне средине:** Коридори високонапонских водова се морају што је могуће више хармонизовати са окружењем и колико је могуће мање негативно утицати на животну средину. Посебно је одговорност за то велика у региону у коме живимо у коме је биодиверзитет вероватно једно од највећих богатстава које имамо. Регион је веома богат биљним и животињским врстама, међу којима су и бројне ендемске. Такво богатство обавезује да се у овом региону додатни напори усмере према заштити биодиверзитета и екосистема. Процентни врста које живе на овим просторима (посебно птица и сисара – 70% свих европских врста) указују на обавезу оних који заузимају простор и утичу на природу, да највише о њој морају водити рачуна. Уводјење ГИС система у управљање одржавањем, и расположивост нових технологија дигитализације у енергетици, отвара и нове могућности унапређења перформанси одрживог развоја и унапређења односа према животnoj средини.
2. На који начин аутори сагледавају могућност примене технологија у овој области?
3. Дати осврт на *Vegetation management*, израде мапа осетљивости и идентификације простора и коридора од посебног значаја за биодиверзитет.

## Р Ц2 17 ПРИМЕНА СОФТВЕРСКИХ АЛАТА ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ ASSET MANAGEMENT СИСТЕМА У ЕЕС

**Бранко ЂОРЂЕВИЋ, Маја АДАМОВИЋ, Владимир М. ИЛИЋ,  
Владимир ИЛИЋ, Мирко БОРОВИЋ**  
*АД Електромрежа Србије*

### Кратак садржај

Овај рад описује различите алате за управљање електроенергетском имовином (*Asset Management*) у преносном систему, с посебним освртом на примену софтверских пакета базираних на ГИС (географски информациони систем) подлогама. Ефикасна примена *Asset Management*-а у преносном систему је кључна за одржавање поузданости и стабилности електричне мреже, смањење оперативних трошкова и повећање животног века инфраструктурних елемената.

Самим тим, непосредна примена конкретног софтвера којима се врши детекција атмосферских пражњења у близини далековода, или софтвера којим се приказује расподела температуре у кабловским водовима, или пак софтвера којим се евидентира положај нелегално изграђених објеката који угрожавају поуздан рад далековода, свака на свој начин убрзава време проналажења квара односно смањује време испада елемента односно вероватноћу могућег нежељеног догађаја у експлоатацији објеката смањује на минимум и може се користити за анализу стања или процену угрожености односно поузданости система.

У раду су представљени резултати имплементације ових технологија на стварним примерима из праксе. Анализирани су њихови ефекти на ефикасност *Asset Management*-а, као и потенцијални изазови и будуће могућности развоја. Закључци приказују значај интеграције ових алата у стандардне процедуре управљања ЕЕС, као и на потребу за континуираним унапређењем софтверских решења како би ишли у корак са све комплекснијим приступима *Asset Management*-а модерних електроенергетских мрежа.

### Питања за дискусију:

1. Да ли аутори могу да опишу неки пример примене технологије интернета ствари (IoT) у домену управљања електроенергетском имовином? Које би биле предности примене умрежених сензора путем IoT у односу на класичне системе аквизиције (SCADA) у домену управљања електроенергетском имовином?
2. Да ли и који софтверски системи за праћење електроенергетске имовине у ЕМС АД садрже параметарске податке основне електроенергетске опреме (као што су импедансе, преносни односи трансформатора, и слично)? Ако ти подаци постоје, да ли постоје механизми за јединствену идентификацију опреме који се могу користити за идентификацију и интеграцију са другим системима, нпр. са EMS апликацијама у склопу SCADA/EMS?
3. Да ли се у ЕМС користе алати за предиктивно одржавање електроенергетске опреме (нпр. алати за прорачун старења прекидача на бази информација о одржавању и прекидању струја кратких спојева и/или други слични алати)?



## Р Ц2 18 ДИГИТАЛИЗАЦИЈА ВН ПОСТРОЈЕЊА - ИЗАЗОВИ ВЕЛИКЕ КОЛИЧИНЕ ПОДАТАКА

Срђан МИЈУШКОВИЋ  
WSP UK

### Кратак садржај

ВН постројења су кључни елементи преносног дела електроенергетског система, који с једне стране повезују изворе енергије значајних инсталисаних снага и с друге разноврсне потрошаче електричне енергије. Постојећа електроенергетска мрежа је осетљива на приметан број извора обновљиве енергије заснованим на инвертерима. На другој страни спектра, структура потрошача се неумитно мења. Све је више малих потрошача којима је неопходно непрекидно напајање (рад од куће) и потрошача који су повремено и произвођачи мањих количина електричне енергије (прозјумери). Координација и управљање непредвидивих и несталних извора енергије с једне и изузетно разноликих и захтевних потрошача с друге стране, представља веома сложен задатак, за чију успешну функционалност је неопходно прикупљање и обрада велике количине података, често и у реалном времену. Дигитализација путем IEC 61850 Стандарда је процес који би требао да омогући и реши наведене захтеве, посебно комуникациони аспект. Може се рећи да је сада и много више од Стандарда - дигитална платформа, солуција која омогућава да Smart Grid постане реалан и одржив циљ. Уколико се наведеним изазовима придода и потреба за изузетно прецизним и брзим реакцијама на промене у систему, примена вештачке интелигенције – Artificial Intelligence (AI) и машинског учења - Machine Learning (ML) се намеће као сврсисходна опција. Описана количина и тип података важних параметара се дефинише као Big Data и могућности овог решења, као и анализе и истраживања на ту тему, су у приметној експанзији. Размена тако значајне количине информација у вишеструким правцима, такође захтева и робусну и високопоуздану комуникациону мрежу. Пажљиво планирање софистицираних комуникационих система применом адекватних дигиталних уређаја, уз уважавање принципа рачунарске безбедности и применом постојећих стандарда, чини наведени процес изузетно динамичним и захтевним. Постоји више праваца одговора на наведене и повезане изазове, стога је њихово разумевање кључно за садашњост и будућност електроенергетске мреже.

### Питања за дискусију:

- 1. Увођење мерних узорака (SV) у процес често подразумева коришћење комерцијалног stand alone merging unit-a (SAMU). За постизање жељене тачности нужно је да SAMU буде калибрисан. На бази чега (стандарди?) треба вршити калибрацију и који калибрациони тестови су од интереса?*
- 2. У светлу даље дигитализације ЕЕС, посебно ТС, како остварити ‘везу’ модела података IEC 61850 и IEC CIM (модел на нивоу целог система/центра управљања), тј. хармонизовати наведене стандарде?*



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.028C](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.028C)

C2 01

## IZAZOVI POVEZANI SA MASOVNIM UVOĐENJEM OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE I NJIHOVOM INTEGRACIJOM SA MREŽOM

NINEL ČUKALEVSKI\*  
NEZAVISNI KONSULTANT

BEOGRAD

SRBIJA

**Kratak sadržaj** — Današnja energetska transformacija je u značajnoj meri bazirana na masovnom uključenju obnovljivih izvora energije (OIE) u proizvodni portfolio energetske kompanije, ali i promenama kod potrošača. Kao posledica prisustva uređaja energetske elektronike, javljaju se problemi, kako u sferi energija/snaga, tako i u sferi tehničkih performansi sistema. Tehnička pitanja u domenu regulacije učestanosti, napona, kratkih spojeva, stabilnosti i kvaliteta napona su analizirana i rešavana putem istraživanja i razvoja tehnologije, ali i unapređenjem tržišno-regulatornih mehanizama. U ovom radu će pažnja biti skoncentrisana na tehničke probleme koji prate visoko % učešće OIE, posebno one koji rezultiraju pojavom nestabilnosti, nesigurnih režima, i poremećajima u EES. Postojeće studije priključenja OIE na mrežu, uglavnom nisu standardizovane, a izazovi sve kompleksnijih modela i simulacija nisu uvek adekvatno tretirani, na šta ukazuju događaji u eksploataciji. Na problematiku različitih kategorija modela i potrebnih simulacionih platformi, posebno onih u realnom vremenu za sisteme upravljanja i zaštite, će se u radu posebno obratiti pažnja. Na kraju, kao ilustracija će se prikazati nekoliko krupnih poremećaja u inostranim EES sa značajnim udelom OIE, i dati odgovarajuće opštije preporuke za naše uslove.

**Ključne reči** — integracija obnovljivih izvora; studije priključenja; izazovi upravljanja sistemima sa velikim udelom uređaja energetske elektronike; balansiranje; stabilnost; analize elektromagnetnih prelaznih procesa.

---

\* Volgina 15, Beograd, [ninelc@afrodita.rcub.bg.ac.rs](mailto:ninelc@afrodita.rcub.bg.ac.rs)

## 1. UVOD

Aktuelna energetska transformacija elektro energetskog (EE) sektora je u svetu započeta pre više godina sa osnovnim ciljem da se obezbedi održivi razvoj energetike a kroz dekarbonizaciju, tj. smanjenja upotrebe fosilnih goriva sa ciljem smanjenja emisije gasova staklene bašte (engl. GHG, tj. CO<sub>2</sub> i dr.). Dekarbonizacija se sprovodi kroz masovno uvođenje obnovljivih izvora energije (OIE) u proizvodnju električne energije, pre svega vetro (engl. WPP-wind power plant) i solarnih (engl. PV-photo voltaic) elektrana, ali i kroz dalju elektrifikaciju transporta, industrije i komunalne sfere i povećanje energetske efikasnosti kod svih potrošača. U Evropskoj uniji je 2019 godine objavljen "Evropski zeleni dogovor" (engl. The European Green Deal) [1] u okviru koga je dekarbonizacija jedan od ključnih elemenata, i koji zahteva smanjenje emisije GHG (u odnosu na 1990) za 55% (do 2030.) i 100% (do 2050.), te se stoga često naziva i "zelenom tranzicijom". U okviru EU napora očekuje se gradnja oko 200 GW vetro elektrana do 2030, odnosno oko 300 GW do 2050, kao i gradnju 750 GW (do 2030) solarnih (PV) elektrana, odnosno 4700 GW do 8800 GW (do 2050) [2]. Posledično EC smatra da su do 2030 nužne nove investicije od € 584 bn (miliardi) potrebne samo za modernizaciju Evropske mreže [3]. Napomenimo da se posle početne "euforije", u svetskoj stručnoj javnosti polako pojavljuju stavovi, koji osporavaju potrebu i realnost navedenih ciljeva, iz brojnih razloga, od klimatskih i ekoloških do ekonomskih i resursnih. Međutim, oni nisu predmet ovoga rada.

Masovno uvođenje obnovljivih izvora energije (engl. RES) u EES ima brojne posledice, energetske i tehničke, koje su tim izraženije koliko je veće % učešće OIE u ukupnoj proizvodnji sistema. Pri tome je uticaj OIE na tehničke performanse EES pre svega posledica njihovog priključenja na mrežu (prenosnu i/ili distributivnu) putem konvertora, uređaja energetske elektronike koji se pojavljuje kao interfejs između savremenih OIE uređaja i prenosne i/ili distributivne mreže. Složenost i veliki broj ovih uređaja (engl. PEID-power electronic interfaced devices) mogu dovesti i dovode do brojnih tehničkih izazova koji se manifestuju novim dinamičkim fenomenima i narušavanjem stabilnosti, što može dovesti do krupnih sistemskih poremećaja. Istraživanja i razvoj sprovedeni do sada od strane akademije i industrije [4,5] u oblasti integracije OIE u EES su značajno unapredili mogućnosti njihove primene sa tehničke i ekonomske strane. Pri tome konkretna situacija u različitim regijama sveta može biti bitno različita, kako po obimu tako i primenjenim rešenjima. Kako je činjenica da su u mnogim zemljama donete odluke da se poveća udeo proizvodnje iz OIE, odnosno da već postoji značajan kapacitet OIE, smatramo da je od velikog značaja analizirati tuđa iskustva u integraciji OIE u mrežu, i na bazi njih formulisati "dobre prakse" koje treba primenjivati i kod nas.

U ovom radu, posle uvoda, u odeljku 2 se identifikuju i analiziraju izazovi integracije OIE u EES i to, kako sa aspektat snage i energije, tako i sa aspekta tehničkih performansi, posebno u oblasti dinamike i stabilnosti. Tu su uočeni i prikazani operativni aspekti integracije OIE u EES, posebno za slučaj njihovog visokog učešća u ukupnoj proizvodnji, koji su sa svoje strane uticali na potrebu i obuhvat različitih studija integracije, čija je izrada obično zahtevana od strane lokalnog regulatora, koje se razmatraju u odeljku 3 rada. Navedene studije su povezane sa brojnim matematičkim modelima i algoritmima simulacije, čiji se aktuelni i perspektivni izazovi, na bazi aktuelne literature, i međunarodnih iskustava, analiziraju u odeljku 4. Konkretni primeri krupnih poremećaja koji su povezani sa svojstvima OIE, ali i nepotpunim studijama integracije, kao i mogući načini njihovog prevazilaženja su dati u odeljku 5. Konačno na kraju rada, u odeljku 6 se nalaze zaključci i sugestije u vezi sa

pristupom i prevazilaženjem izazova i problema vezanih sa integracijom OIE, u sistemima sa visokim udelom OIE, kao i lista korišćenih referenci.

## 2. IZAZOVI INTEGRACIJE OIE SA EES

### 2.1 Svojstva OIE

Obnovljivi izvori energije (pre svega vetro i solarne PV elektrane) koji se danas vide kao osnovni "zamenski" kapacitet u procesu dekarbonizacije proizvodnje električne energije karakteriše visoka varijabilnost i neodređenost proizvodnje, a kao posledica prirodnih promena (brzine vetra, iradijacije) primarne energije. Sa druge strane, njihov kapacitet, lokacija (na kopnu ili moru) i udaljenost do potrošača su obično različiti a udaljenost, posebno kod OWF, značajna. Posebno je značajno da je njihova veza sa ostatkom EES je putem uređaja energetske elektronike (PEID/PEIG). Često se koristi i nešto širi pojam IBR (engl. Inverter Based Resources).

Dugogodišnja primena i stalni razvoj OIE su povećali razumevanje karakteristika varijabilne generacije, kao i posledica i dobrobiti njihovog priključenje na EES. U početnoj etapi masovnije primene (uslovno 2000-2015) OIE su bili praktično ne kontrolabilni, bez mogućnosti da podrže mrežu i njenu stabilnost. U aktuelnoj etapi (2016-2024) OIE su postali "dispatch"-abilni i sa mogućnostima za obezbeđenje podrške mreži (raznim servisima). Navedeno je rezultat bolje prognoze proizvodnje, unapređenih sistema upravljanja konvertorima, kao i povećanom fleksibilnošću EES, putem akumulatora/baterija (različitog tipa) i upravljanja snagom potrošača (tipa DR/DSM). Sa druge strane, navedeno je u velikoj meri rezultat progressa u oblasti modeliranja i simulacionih analiza, koje prate projekte savremenih OIE.

Sa ciljem uspešne integracije značajnog kapaciteta OIE sa EES potrebno je analizirati niz aspekata vezanih za:

1. Dizajn i pogon EES i rezervne kapacitete
2. Infrastrukturu EES (mreža)
3. Priključenje na mrežu
4. Dizajn tržišta
5. Regulatorna pitanja

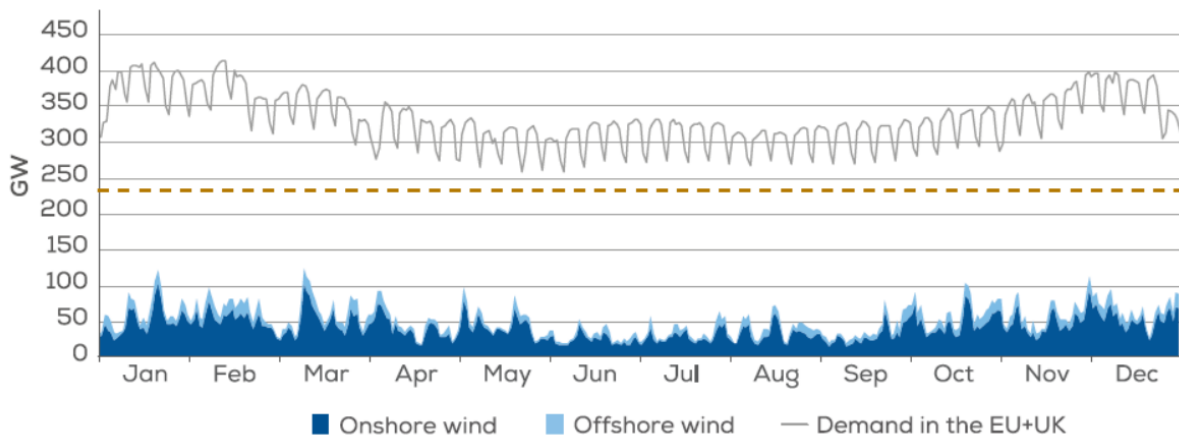
U svetlu značajne varijabilnosti proizvodnje OIE, nužno je unapred razjasniti, ko i kako obezbeđuje neophodne rezervne kapacitete, sa čime su tesno povezani aspekti dizajna tržišta i regulative koja, mada značajna, nisu predmet ovoga rada. Aspekti dizajna i pogona OIE se razmatraju u odeljku 2.3. Aspekti infrastrukture mreže, odnosno procena njenih mogućnosti prenosa energije planiranih kapaciteta OIE su tehnički problemi, koji se analiziraju u integracionim studijama odgovarajuće faze projekta i detaljnije se razmatraju u odeljku 3. Ukoliko postojeća infrastruktura EES nije odgovarajuća za planiranu integraciju, problem postaje ne samo tehnički nego i plansko, investicioni. Važni aspekti priključenja OIE na mrežu putem PEID se razmatraju u odeljcima 3 i 4.

### 2.2 Aspekti snage i energije pri integraciji OIE

Kao što je navedeno u svojstvima obnovljivih izvora (WPP, PVPP), varijabilnost i neodređenost sa jedne, geografski diverzitet OIE i udaljenost od potrošnje, sa druge strane, generišu osnovni energetski problem povezan sa OIE, balansiranje sistema, odnosno održavanje stalne ravnoteže proizvodnje i potrošnje. Navedeno zahteva rezervu, čiji ne

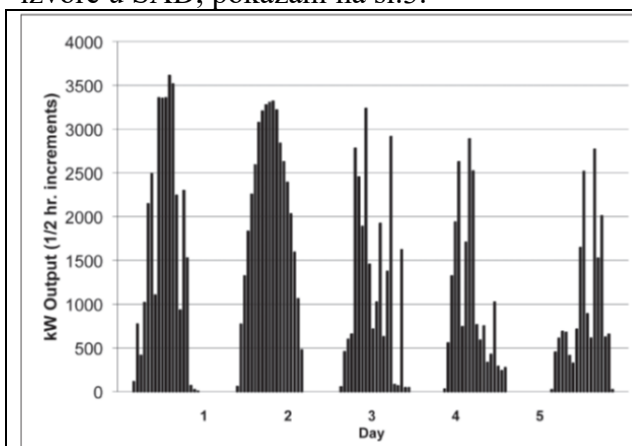
zanemarljivi (realni) troškovi bitno utiču na troškove eksploatacije takvih EES, i samo uslovno i administrativno se mogu dekuplovati od OIE. U ove aspekte se može uključiti i sposobnost OIE, posebno savremenih i perspektivnih sa konvertorima VSC (voltage source converter) tipa, da obezbede različite systemske servise (detaljnije u odeljku 2.3) koji imaju bitnu ulogu u pogonu EES. Danas potrošač može sa OIE zaključiti tzv. standardizovani ugovori o nabavci (engl. PPA-Power Purchase Agreement) koji je tipično višegodišnji i sa ugovorenom cenom, ali koji osim prednosti imaju i nedostatke. U delu tržišnih izazova, može se uočiti da donošenje tržišnih pravila obično kasni za uvođenjem novih energetske tehnologije kakve su DER (distributed energy resources), DR/DSM, systemski servisi, i dr. koje prate OIE. Slično tome, fragmentarnost relevantnih standarda i regulatornog nadzora su prepreka za razvoj regulatornih politika i standarda, koji će obezbediti pouzdanost, ekonomičnost i žilavost ukupne nacionalne elektroenergetske infrastrukture.

Aktuelni izazovi u domenu snage i energije koji prate masovno uvođenje OIE mogu se ilustrovati skorašnjim dijagramom snage (WPP i OFW) i potrošnje u EU i UK tokom 2021 godine, datom na sl.1, sa koje se uočava da je pri instalisanoj naznačenoj snazi svih vetro elektrana od 236 GW, maksimalno ostvarena godišnja generacija iznosila samo 103 GW (23.3.2021), a proizvedena energija čini samo 15% ukupnog konzuma.

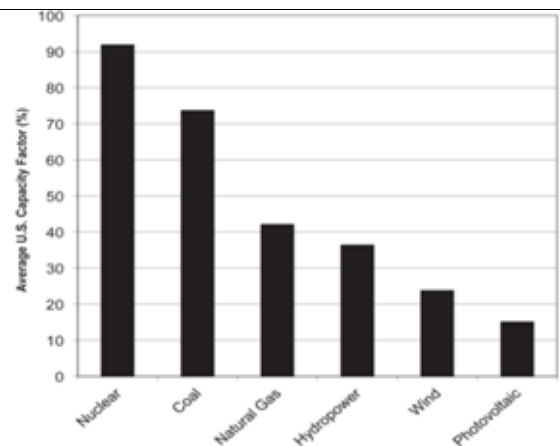


Slika 1. Konzum i proizvodnja vetro elektrana u EU i UK tokom 2021. (Source: WindEurope)

Što se tiče PV elektrana, tipične mogućnosti njihove proizvodnje, odnosno izgleda dnevnog dijagrama proizvodnje sa lokacije u Arizoni (SAD), su prikazane na sl.2, dok su faktori kapaciteta, na godišnjem nivou, kao ključni energetski pokazatelj svakog izvora, pa i OIE, za izvore u SAD, pokazani na sl.3.



Slika 2. Proizvodnja (u kW) velikog PV Sistema u Springer ville, Arizona, USA (Source: Tuscon EPC)



Slika 3. Faktori kapaciteta raznih izvora u SAD (Source: DOE)

Danas se često postavljaju veoma visoki zahtevi za dekarbonizaciju proizvodnje, sa % udelom OIE od 50%, 75%, pa čak i 100%. Analize su pokazale da su zahtevi za učešće OIE do reda 40-50% dostižni, dok su oni iznad toga mogući samo na nekim mestima i naravno ne stalno (ne na godišnjem nivou). Osnovna prepreka, koja se često previđa, je relativno nizak faktor kapaciteta (sl.3), koji se za WPP kreće u opsegu od 15-34%, a za PV PP je 10-20%, a posledica je fizike, tj. male gustine primarne energije. Rezultat se može popraviti korišćenjem baterija (ili druge akumulacije) velikog kapaciteta. Međutim, analize rađene u Velikoj Britaniji za visoka ciljna učešća OIE (100%), ukazuju da scenariji razvoja sa baterijama imaju problem u globalnom nedostatku kritičnih mineralnih sirovina (Li, Co, CdTe, Cu, Al) [6] .

### 2.3 Tehnički i operativni aspekti integracije OIE

Porast udela OIE, kao i smanjenje učešća tradicionalnih izvora (sa sinhronim generatorima), dovode do promene dinamičkog ponašanja sistema, kao i do pojave novih fenomena koji značajno proširuju opseg relevantne dinamike. Odnosno, od tradicionalne dinamike, gde su od interesa samo dinamički procesi srednjeg i dugog trajanja (tj. elektro-mehanički i termodinamički fenomeni), do dinamike kratkog i vrlo kratkog trajanja (elektro-magnetni i talasni fenomeni) koju određuju konvertori i njihove interakcije, kako unutrašnje tako i sa drugim spoljnim elementima sistema. Od posebnog interesa za operatore sistema su sledeći fenomeni:

- Odstupanje frekvencije
- Velika odstupanja napona povezana sa prolaznim kvarovima i pre naponima u mreži
- Mala, ali dugotrajna, odstupanja napona
- Oscilacije i njihovo prigušenje
- Nenamernog ostrvskog rada

Posledično se pogoršavaju problemi povezani sa svim tipovima stabilnosti, i onih tradicionalnih (učestanosti, napona i ugla rotora) i novih tipova (konvertorska, rezonantna stabilnost) [7]. U svetlu navedenih promena karakteristika i ponašanja izvora u EES, kao i promena u ponašanju i pogonu same mreže, mogući su brojni tehnički i operativni izazovi skopčani sa integracijom OIE u EES, i to vezani za:

1. debalans aktivne snage/učestanost (manja inercija, veći gradijent i propad frekvencije, veće varijacije frekvencije, teškoće procene iznosa potrebne rezerve)
2. naponsko/reaktivnu podršku (veći propadi napona, balansiranje reaktivne snage)
3. smanjenje struje/snage kratkog spoja (problemi sa distantnom i prekostrujnom zaštitom, širenje propada napona)
4. stabilnost (pogoršanje tranzijentne/ugaone stabilnosti, manje prigušenje, NF oscilacije, sub sinhrona interakcija između regulatora)
5. kvalitet (harmonici, fliker)
6. operativne izazove (ispadi konvertora, upravljanje zagušenjem, obnavljanje pogona, observabilnost, kontrolabilnost, TSO-DSO koordinacija)

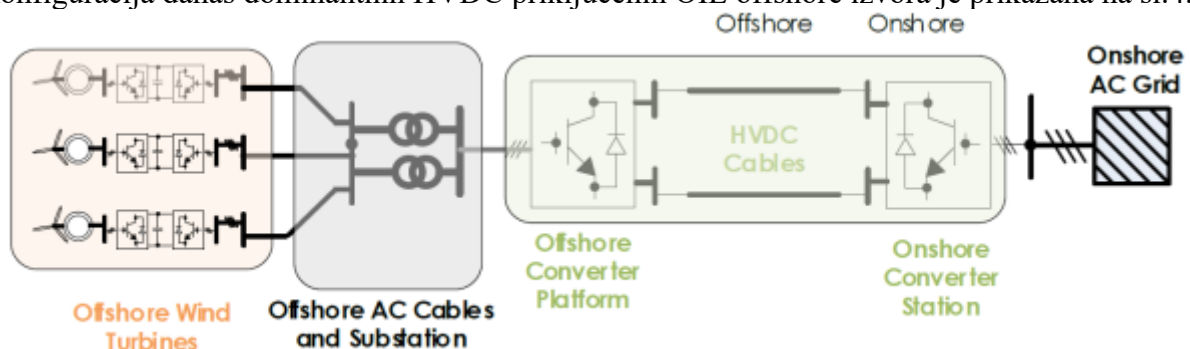
sa detaljima u odgovarajućoj literaturi. Pri tome, izraženost i posledice u značajnoj meri zavise od toga da li je udeo proizvodnje OIE u EES mali (10-15%), srednji (20-30%) ili veliki (>50%).

U početnoj etapi masovnog uvođenja OIE (uslovno 2000-2015) je funkcionalnost konvertora (PEIG/IBG) bila bitno ograničena, pa su i prethodno navedeni problemi (posebno ispadi konvertora za slučaj bliskih kvarova) bili izraženi, a uloga OIE u EES bila ograničena na isporuku energije, na principu "kada i koliko ima". Kako funkcionalnost konvertora zavisi pre svega od njegovog sistema upravljanja (obično hijerarhijski sa dva nivoa), evolucija zahteva sistem operatora i drugih korisnika sistema se odvijala kroz dogradnju odgovarajućeg

mrežnog koda, čija upotreba doprinosi sigurnosti sistema. Isporučiocu su ove nove zahteve u vezi konvertora PEIG postupno realizovali tokom savremene etape razvoja (2016-2024), omogućavajući brojne unapređene, osnovne i dopunske funkcije, odnosno sposobnosti PEIG u pogledu:

- snage mrežnog priključka
- operativnih opsega napona i učestanosti
- regulacije učestanosti i aktivne snage
- regulacije napona i reaktivne snage
- prolaska kroz sniženi napon (engl. LVRT)
- dinamičke podrške napona tokom kvara
- prigušenja oscilacija
- ostrvskog rada
- sposobnosti "black-starta"
- brzog odziva frekvencije
- smanjenje napona harmonika

Naravno danas, uključivanje baterija u sisteme sa PEIG i HVDC, može poboljšati neke od postojećih funkcija ili omogućiti nove (npr. sintetička inercija). Detaljniji zahtevi u vezi navedenih funkcija i karakteristika PEIG su dati u odgovarajućem EU mrežnom kodu [8]. U svetu se za IBR takođe koriste tehnički minimalni zahtevi dati u IEEE standardu (IEEE 2800-2022). Ukoliko je PEIG povezan na AC mrežu (a u skoroj perspektivi i na DC mrežu, za slučaj multi terminalnih DC vodova) posredstvom HVDC sistema (tzv. HVDC PPM-power park module) zahtevi za povezivanje su formulisani u drugom mrežnom kodu [9]. Tipična konfiguracija danas dominantnih HVDC priključenih OIE offshore izvora je prikazana na sl.4.



Slika 4 Priklučenje "offshore" vetro parka na mrežu pomoću VSC HVDC linka [10]

Zahtevi koji su obavezujući za aplikabilni mrežni kod moraju biti potvrđeni u procesu testiranja i prihvatanja novog sistema.

### 3. STUDIJE INTEGRACIJE OIE SA EES

U svjetlu kompleksnosti današnjih EES ali i OIE koje treba integrisati, tokom životnog ciklusa perspektivnog projekta (tipa PEIG+HVDC) potrebno je uraditi brojne simulacione studije, posebno u fazi planiranja i projektovanja novog sistema, ali i tokom njene kasnije eksploatacije.

U fazi planiranja, sa ciljem dobijanja informacija potrebnih za izradu tehničke specifikacije projekta, rade se tipično sledeće studije:

- Adekvatnosti sistema (tokovi snaga)
- Proračuna kratkih spojeva



- Dinamičke stabilnosti
- Harmonika

sa detaljima u [11]. Posle zaključenja ugovora o realizaciji OIE projekta obično se rade tri grupe studija, i to:

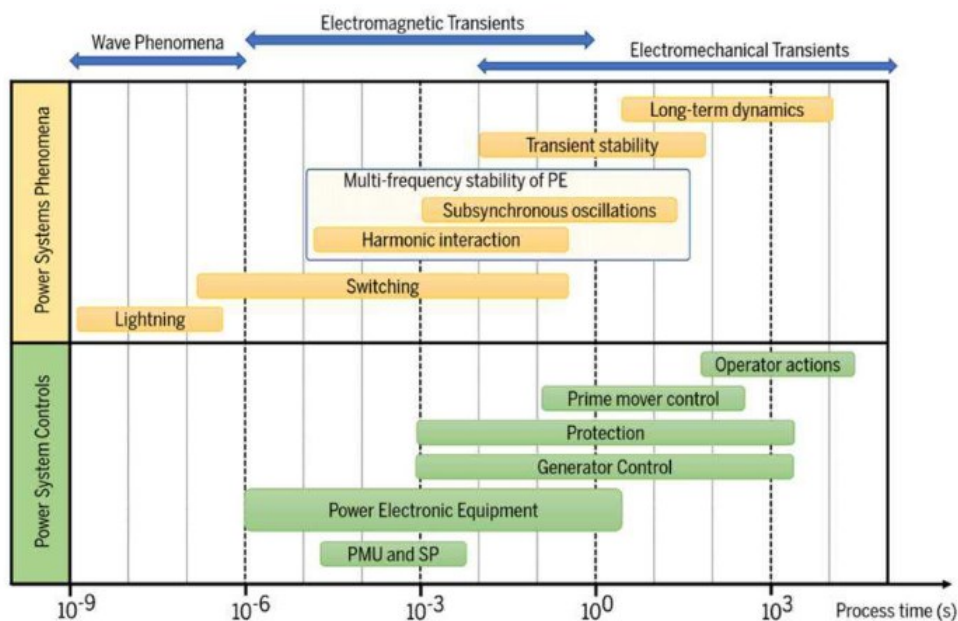
- Studije dizajna i dimenzionisanja opreme
- Studije integracije sistema
- Studije povezane sa fabričkim testiranjem (FAT)

Sve one se rade sa osnovnim ciljem da se sistem dizajnira prema tehničkim specifikacijama i da se pokaže njegova usaglašenost sa zahtevima iz mrežnog koda i standarda. U okviru studije dizajna i dimenzionisanja se za razne radne uslove PEIG/HVDC sistema dolazi do konačnog dizajna stvarne opreme, uključujući i koordinaciju izolacije.

Posebno su od interesa studije integracije koje treba da pokažu kako će konvertori (PEIG/HVDC) interagovati sa AC i DC mrežom. Navedeno uključuje podešavanje, optimizaciju i integraciju internog sistema upravljanja konvertora. U sastavu ove grupe su obično i sledeće studije:

1. **Dinamičkih performansi**-cilj ove studije je da potvrdi dinamičke performanse sistema upravljanja AC/DC sistemom u normalnim i poremećenim uslovima rada, odnosno da validira da su dinamičke performanse sistema u skladu sa specifikacijama.
2. **Stabilnosti** (statičke, tranzijentne)-sa ciljem njihove provere i podešavanja regulacije višeg nivoa (npr. regulacija učestanosti, POD).
3. **Harmonijske analize, flikera i subsinhronih interakcija**-sa ciljem utvrđivanja nivoa harmonijske emisije i flikera, ali i mogućnosti subsinhronih (4-40 Hz) oscilacija.
4. **Visoko frekventne stabilnosti**-kako bi se utvrdila mogućnost pojave oscilacija uzrokovanih međusobnim uticajem regulatora konvertora, na frekvencijama do 2,5 kHz.

Stabilnosti PEID pod t.3 i 4 se ponekad u literaturi alternativno naziva, multi frekventna stabilnost, čiji je vremenski okviri i pozicija prema drugim fenomenima, prikazana na sl.5 [12].



Slika 5. Tipični vremenski okviri različitih dinamičkih fenomena

#### 4. IZAZOVI MODELIRANJA I SIMULACIJE

Zavisno od specifičnosti studija koje se moraju uraditi tokom OIE+HVAC/DC projekta, koriste se matematički modeli različitih tipova, koji zahtevaju različite procedure (algoritme) rešavanja i računarske simulacione alate/platforme (simulatore). Razumljivo je da zbog širine obuhvata ovih studija, ne postoji jedinstveni softverski alat za tu namenu ili prihvaćen standard za skup alata. Kako bi se studirale mreže OIE+HVAC/DC, kao i njihova interakcija sa AC mrežama, zavisno od tipa analiziranog fenomena u mreži, na raspolaganju su PDT (engl. Phasor Domain Transients) i EMT (Electromagnetic Transients) modeli. Modeli tranzijentata u fazorskom domenu koji se često nazivaju i elektro mehanički modeli, obezbeđuju/koriste efektivne vrednosti (engl. RMS-Root Mean Square) i pozitivni redosled kada se koriste u alatima simulacije elektro mehaničkih procesa u sistemu. Modeli tranzijentata u elektromagnetnom domenu obezbeđuju/koriste vremenski promenljive trenutne vrednosti u trofaznim talasnim formama.

Većina prethodno navedenih studija se može raditi korišćenjem modela elemenata sistema iz oba domena (PDT i EMT). Međutim, tačnost i upotrebljivost rezultata u velikoj meri zavise od tipa fenomena koji se analizira, pa prema njima treba i vršiti izbor tipa (i detaljnosti) modela. Logično je da za sporije pojave, i to u mreži, preferišu PDT (RMS) modeli, dok se za analizu pojava unutar konvertora (uključivo njihove sisteme upravljanja), ili u mreži ali pri većim učestanostima, preferišu EMT modeli.

Porast učešća OIE i ne angažovanja tradicionalne generacije (sa SG) dovode do značajnih promena u "čvrstoći" sistema (kvantifikovana odnosom SCR-short circuit ratio), inerciji i prigušenju malih oscilacija, rezultiraju većom brigom za frekventni odziv, dinamičku stabilnost, interakciju regulatora i kvalitet. Navedeno može rezultirati krupnim poremećajima napajanja kakvi su raspad, posebno ako se navedeni fenomeni nedovoljno razumeju i adekvatno reše, što se ilustruje u odeljku 5. Kako se smanjuje odnos sinhrona i asinhrona generacije, tako se obično smanjuje i tačnost tradicionalnih fazorskih (PDT) modela. Navedeno je posledica brzih upravljačkih sistema konvertora PEIG, čija se dinamika ne može adekvatno predstaviti i analizirati putem PDT modela i simulacionih alata.

Posledično, primena EMT modela i simulacionih alata je sve potrebija i češća za analizu onih fenomena, na strani generatora, mreže i potrošača, čija se dinamika razlikuje od osnovne učestanosti (50Hz), i kada je snižena "čvrstoća" (sposobnost sistema da održava napon, u normalnom i u stanju sa kvarom) EES. Stoga se danas za analizu PEIG/IBR priključenih na EES [13], sve šire koriste sledeće aplikacije EMT tipa:

1. Integracija IBR u mreže sa niskom čvrstoćom ( $SCR < 2,0-1,5$ )
2. Sub sinhrona rezonansa i interakcija regulatora (objekta sa mrežom)
3. Interakcije sistema upravljanja IBR (objekat sa objektom i unutar objekta)
4. Stabilnost sistema upravljanja IBR (mali i veliki poremećaji)
5. Upoređivanje dinamičkih modela pozitivnog redosleda sa standardom
6. Sposobnost i performanse IBR za prolazak kroz oblast ne nominalnog napona i učestanosti
7. Analiza struje kratkog spoja IBR
8. Funkcionisanje zaštite
9. Studije kvaliteta napona (harmonici, brza promena napona)

Treba zapaziti da EMT simulacije nisu predviđene da zamene one bazirane na PDT modelima, nego za dopunu istih, jer obezbeđuju novi nivo detalja za brojne analize potrebne u današnjim uslovima. Imajući u vidu veoma male veličine vremenskog koraka simulacije, od

reda nekoliko (ili desetina) mikro sekundi, do sada je obuhvat mreže analiziran putem EMT bio veoma ograničen. Isti se svodio na novo priključeni objekat i njegovo neposredno mrežno okruženje, ili odgovarajući ekvivalent. Kao posledica znatne detaljnosti EMT modela i malog vremenskog koraka, EMT simulacije su računski (pa time i vremenski) veoma intenzivne, te su se stoga obično izvodile u off-line režimu.

Niz velikih poremećaja koji su se odigrali poslednjih godina u nizu EES (Australija, Teksas, Kalifornija), posebno u sistemima sa ostrvskom strukturom ili slabim interkonekcijama, a visokim učešćem OIE, su ukazali na neophodnost da se integracione studije sa EMT modelima rade ne samo lokalno, već i na nivou celog (ili većeg dela) sistema, što zahteva razvoj EMT modela širokog područja (ili celog) EES. Navedeno, zbog povećanja dimenzionalnosti modela produžava vreme simulacije, ali savremena računarska oprema omogućava izbalansirano rešenje. Na liniji sa tim je i rastuća potreba validacije (svih) korišćenih modela i definisanih zahteva i procedura u tom smislu, kao i obezbeđenja potrebnih podataka i parametara modela. Problem podataka potrebnih za model upravljačkih i zaštitnih uređaja/podsistema (engl. C&P-control and protection) PEIG+HVAC/DC je posebno složen, a može se rešiti na više nivoa, od korišćenja generičkih EMT modela, do (preferabilno) korišćenja EMT modela za konkretnu opremu.

Obezbeđenje EMT modela za C&P podsistem je od ključnog značaja za kvalitet ukupnog modela i dobijenih zaključaka. Zavisno od načina uvažavanja pitanja vezanih za intelektualnu svojinu, pitanje modela C&P može se rešiti na nekoliko načina, ali je najbolje raspolagati modelom koji je kopija realnog softvera C&P podsistema konvertora OIE. Konačno, verifikacija funkcija i performansi C&P podsistema u toku simulacionih studija ali i testa prihvata se obično vrši korišćenjem Real Time Simulatora (RTS), obično u HIL (Hardware-in-the-Loop) varijanti.

Na bazi dosadašnjih iskustava, brojne razvijene elektroenergetske kompanije/elektroprivrede, su donele regulativu koja zahteva izradu integracionih EMT studija na nivou EES, kao i obezbeđenje EMT modela za isporučenu opremu (željene kompleksnosti) u fazi isporuke sistema.

## **5. PRIMERI VELIKIH POREMEĆAJA SA UČEŠĆEM OIE**

### **5.1 Australija**

Proces energetske tranzicije se u Australiji odvija brzim tempom, sa značajnim obimom obnovljivih resursa (WPP, PVPP) koji se priključuju na mrežu svake godine. Skoro svi ovi resursi su asinhronog tipa koji su na mrežu priključeni preko konvertora (PEIG). Kao posledica korišćenja tradicionalnih PDT modela, u eksploataciji se pojavio niz prethodno ne otkrivenih fenomena, koji su u periodu od 2016 – 2021, posebno u Južnoj Australiji, uzrokovali brojne poremećaje, praćene oscilacijama. Južnu Australiju karakteriše visoko učešće OIE koji su locirani daleko od centara potrošnje, u čijoj su blizini i tradicionalni izvori sa SG, tj. izvori inercije i "čvrstoće" sistema. U uslovima visoke proizvodnje OIE, i isključivanja SG dolazi do smanjenja inercije i čvrstoće u sistemu, pa često kvar i/ili gubitak voda prouzrokuje trajne oscilacije (u opsegu 5-10 Hz) [14]. Postupno rešenje problema je nađeno kroz sistematične akcije na više nivoa, i to:

1. Formiran je regionalni EMT model EES, čijim korišćenjem je operativno moguće odrediti minimalno potrebno (sa aspekta sigurnosti) angažovanje tradicionalnih generatora u sistemu.

2. Ograničavanja broja on-line invertora na 50% od broja instaliranih ima značajan efekat na smanjenje oscilacija.
3. Ugradnje sinhronih kompenzatora u blizini selektovanih IBR.
4. Analiza je pokazala da je originalno podešenje regulatora invertora bilo ne adekvatno, i kao takvo doprinosilo oscilacijama.

Međutim, po mišljenju autora ovoga rada, ključna mera, sa dalekosežnim posledicama, je razvoj i validacija EMT modela područja regiona, i to za sve regione u Australiji (ukupni EES je sastavljen od 5 regiona) i odgovarajuće računarske simulacione platforme (simulatora), sa brojnim aplikacijama potrebnim za studije priključenja, donošenje operativnih odluka, analizu događaja i dugoročno planiranje.

### **5.2 SAD-Kalifornija**

Događaj od 9.10.2017 u Južnoj Kaliforniji [15], do koga je došlo kao posledica Canyon 2 požara koji je uzrokovao ispad dva dalekovoda u blizini TS Serrano istočno od Los Anđelesa. Prvi kvar je bio među fazni kratki spoj na 220 kV vodu koji je normalno eliminisan dejstvom zaštite, dok je drugi kvar (dva minuta kasnije) bio među fazni spoj na 500 kV vodu, takođe uspešno eliminisan. Iako su kvarovi bili uspešno eliminisani sistem je izgubio oko 900 MW PV generacije na širem području Južne Kalifornije. Većina ispada PV invertora (koji su bili izvedeni u skladu sa IEEE Standardom 1547-2004) je bila uzrokovana vrlo kratkim (sub periodnim) prolaznim pre naponima i trenutnim dejstvom zaštite invertora koja ih je isključila sa mreže. Takođe, značajan broj invertora je ušao u stanje "trenutnog isključenja struje" tokom i nakon kvarova. NERC je posle analize zaključio da kod PV invertora ne treba koristiti zaštitnu funkciju "trenutnog isključenja struje" (tj. prekid injektiranja struje u mrežu tokom kvara, ali bez isključenja), kako kod novih IBR tako i kod postojećih. Slično, naponska zaštita invertora treba da bude bazirana na fizičkim ograničenjima opreme, a ne samo na bazi karakteristike o "prolaska" kroz niski napon (LVRT), sadržane u FERC/NERC preporuci PRC-024-2.

### **5.3 SAD-Teksas**

Događaji 2021 i 2022 u Teksasu [16], gde je rast udela IBR (vetar, sunce) u potrošnji sistema (2021-oko 28% godišnje energije) doveo do sniženja čvrstoće sistema. Stariji invertori imaju lošu karakteristike prolaska kroz sniženi napon i/ili učestanost, što je dovelo do niza krupnih raspada, uz gubitak 1700 MW PV generacije (npr. 2022 Odessa poremećaj 4.6.2022), koji su se pri tome ponavljali. Zajednička (NERC+Texas RE) analiza je pokazala postojanje samo generičkih modela invertora, koji nisu bili validirani. NERC je zahtevao od svake proizvodne kompanije da obezbede EMT modele i reše uočene probleme sa zaštitom, ali sa slabim progresom (na bazi mišljenja samog NERC-a). Kao rezultat, NERC je uključio zahteve u vezi obezbeđenja EMT modela i njihove validacije u glavne nacionalne/regionalne standarde pouzdanosti [17].

## **6. ZAKLJUČAK I SUGESTIJE**

Međunarodno iskustvo ukazuje da postojeći fazorski modeli i konvencionalni alati analize stabilnosti EES često nisu bili u stanju da ukažu na ranije opisane fenomene (koji karakterišu masovnu primenu IBR) zbog pojednostavljenja koja su svojstvena tim alatima, što je vodilo ka stanju u kome zahtevi za priključenje nisu dovoljno obuhvatni i precizni. Posledica navedenih propusta da se dovoljno rano ukaže na probleme, obično dovodi do toga da se SO sa njima po prvi put sreću tokom realnog pogona EES, sa obično skupim posledicama.

U nizu razvijenih zemalja, sa brzim porastom udela OIE, navedeno je prepoznato i povezana legislativa unapređena, kroz zahteve da EMT modele elemenata OIE+HVAC/DC sistema njihov isporučilac obavezno dostavlja dovoljno rano, i da se studije priključenja rade obuhvatnije, a ne lokalno kao do sada, kao i niz drugih mera.

U našim uslovima, u svetlu verovatnog rasta udela OIE, ključno je na vreme prepoznati potencijalne probleme integracije, uraditi uvodnu studiju i mapu puta masovnog uvođenja OIE, na bazi koje (i donetih odluka) započeti formiranje odgovarajućih EMT modela i simulacione platforme za ceo EES Srbije. Time bi se uz angažovanje relevantnih institucija i za sada nevelikog broja stručnjaka, na vreme stvorili neophodni uslovi (pre svega kadrovski) za masovnije uvođenje OIE i njihovu sigurnu i pouzdanu eksploataciju, uz izbegavanje problema uočenih i opisanih u radu.

## LITERATURA

- [1] EC-The European Green Deal, Brussels, 11.12.2019, COM (2019) 640 final
- [2] Wind Europe+ <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2023-statistics-and-the-outlook-for-2024-2030/>+  
<https://www.windpowermonthly.com/article/1860637/europe-connect-nearly-500gw-offshore-renewables-2050> +  
[https://api.solarpowereurope.org/uploads/EMD\\_implementation\\_guidance\\_final\\_e5a3aee317.pdf?updated\\_at=2024-07-16T13:32:58.173Z](https://api.solarpowereurope.org/uploads/EMD_implementation_guidance_final_e5a3aee317.pdf?updated_at=2024-07-16T13:32:58.173Z) +  
<https://www.apren.pt/contents/publicationsothers/solarpower-europe-100-percent-renewable-europe.pdf>
- [3] EC-Grids, the missing link-An EU Action Plan for Grids, Brussels, 28.11.2023 COM(2023) 757fin
- [4] B. Badrzadeh, et al, The Need for Enhanced Power System Modeling Techniques and Simulation Tools, CIGRE S&E, No17, February, 2020
- [5] Abhimanyu Kaushal, Dirk Van Hertem, An Overview of Ancillary Services and HVDC Systems in European Context, Energies 2019, 12, 3481; doi:10.3390/en12183481
- [6] Richard Herrington, Adrian Boyce, et al, Leading scientists set out resource challenge of meeting net zero emissions in the UK by 2050, 5 June 2019.  
<https://www.nhm.ac.uk/press-office/press-releases/leading-scientists-set-out-resource-challenge-of-meeting-net-zero.html>
- [7] Nikos Hatziargyriou, Jovica Milanovic, et al, Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 36, NO. 4, JULY 2021, pp.3271-3281
- [8] COMMISSION REGULATION (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators, 27.4.2016. pp.1-68.
- [9] COMMISSION REGULATION (EU) 2016/1447 of 26 August 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of high voltage direct current systems and direct current-connected power park modules, 8.9.2016, pp.1-65.
- [10] National HVDC Center- <https://www.hvdccentre.com/>
- [11] CIGRE Technical Brochure 563, Modelling and Simulation Studies to be performed during the lifecycle of HVDC Systems, 2013.
- [12] Chandana Karawita, Łukasz Kocewiak, Marta Val Escudero and Genevieve Lietz, Dealing with interactions in modern power electronics dominated power systems, CIGRE ELECTRA, N°335 August 2024, pp.51-57.
- [13] IEEE PES TR113, Simulation methods, models, and analysis techniques to represent the behavior of bulk power system connected inverter-based resources, September 2023.

- [14] AEMO, West Murray Zone Power System Oscillations 2020-2021, February 2023
- [15] Southern California Event: October 9, 2017, NERC/WECC Staff Report, February 2018
- [16] 2022 Odessa Disturbance, Texas Event: June 4, 2022, Joint NERC and Texas RE Staff Report, December 2022.
- [17] NERC Reliability guideline: EMT modeling for BPS-connected IBR-Recommended model requirements and verification practices, May 2023

# THE CHALLENGES ASSOCIATED WITH THE MASSIVE PENETRATION AND INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES WITH A NETWORK

NINEL ČUKALEVSKI\*  
INDEPENDENT CONSULTANT

BELGRADE

SERBIA

*Abstract* — Today's energy transformation is based to a significant extent on the massive introduction of renewable energy sources (RES) in the generation portfolio of energy companies, but also on changes on the consumer side. Due to the presence of power electronics devices, problems arise, both in the domain of energy/power and the domain of system technical performance. Technical issues in the domain of regulation of frequency, voltage, short circuits, stability, and quality of voltage are addressed and solved through research and development of technology, but also by improving market-regulatory mechanisms. In this paper, the attention will be focused on the technical problems that accompany the high % participation of RES, especially those that result in the emergence of unsecured states, and system disturbances. The existing studies of RES connection to the grid are not standardized, and the challenges of increasingly complex models and simulations are not always adequately understood and treated, as indicated by the events in operation. Special attention will be paid to the problem of different types and categories of models and the required simulation platforms, especially those in real-time for control and protection systems. Finally, as an illustration, several examples of a foreign EES with a significant share of RES will be presented, and corresponding more general recommendations will be given.

*Key words* —Renewable energy sources integration; Connection studies; Systems with the high share of power electronic devices control challenges; Balancing; Stability; Electromagnetic transient processes analysis.

---

\* Volgina 15, Beograd, [ninelc@afrodita.rcub.bg.ac.rs](mailto:ninelc@afrodita.rcub.bg.ac.rs)



**IZAZOVI POVEZANI SA MASOVNIM UVOĐENJEM OBNOVLJIVIH IZVORA  
ENERGIJE I NJHOVOM INTEGRACIJOM SA MREŽOM**

**THE CHALLENGES ASSOCIATED WITH THE MASSIVE PENETRATION AND  
INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES WITH A NETWORK**

**NINEL ČUKALEVSKI\*  
NEZAVISNI KONSULTANT**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj - Današnja energetska transformacija je u značajnoj meri bazirana na masovnom uključenju obnovljivih izvora energije (OIE) u proizvodni portfolio energetskih kompanija, ali i promenama kod potrošača. Kao posledica prisustva uređaja energetske elektronike, javljaju se problemi, kako u sferi energija/snaga, tako i u sferi tehničkih performansi sistema. Tehnička pitanja u domenu regulacije učestanosti, napona, kratkih spojeva, stabilnosti i kvaliteta napona su adresirana i rešavana putem istraživanja i razvoja tehnologije, ali i unapređenjem tržišno- regulatornih mehanizama. U ovom radu će pažnja biti skoncentrisana na tehničke probleme koji prate visoko % učešće OIE, posebno one koji rezultiraju pojavom nesigurnih režima, i poremećajima EES. Postojeće studije priključenja OIE na mrežu, nisu standardizovane, a izazovi sve kompleksnijih modela i simulacija nisu uvek adekvatno tretirani, na šta ukazuju događaji u eksploataciji. Na problematiku različitih kategorija modela i potrebnih simulacionih platformi, posebno onih u realnom vremenu za sisteme upravljanja i zaštite, će se u radu posebno obratiti pažnja. Na kraju, kao ilustracija će se prikazati primeri relevantnih poremećaja u nekoliko inostranih EES sa značajnim udelom OIE. Međunarodno iskustvo ukazuje da postojeći fazorski modeli i konvencionalni alati analize stabilnosti EES često nisu bili u stanju da ukažu na ranije opisane fenomene (koji karakterišu masovnu primenu IBR) zbog pojednostavljenja koja su svojstvena tim alatima, što je vodilo ka stanju u kome zahtevi za priključenje nisu dovoljno obuhvatni i precizni. Posledica navedenih propusta da se dovoljno rano ukaže na probleme, obično dovodi do toga da se SO sa njima po prvi put sreću tokom realnog pogona EES, sa obično skupim posledicama. U nizu razvijenih zemalja, sa brzim porastom udela OIE, navedeno je prepoznato i povezana legislativa unapređena, kroz zahteve da EMT modele elemenata OIE+HV AC/DC sistema njihov isporučilac obavezno dostavlja dovoljno rano, i da se studije priključenja rade obuhvatnije, a ne lokalno kao do sada, kao i niz drugih mera. Na kraju su date preporuke za naše uslove.*

---

\* Volgina 15, Beograd, [ninelc@afrodita.rcub.bg.ac.rs](mailto:ninelc@afrodita.rcub.bg.ac.rs)

***Ključne reči*** – integracija obnovljivih izvora; studije priključenja; izazovi upravljanja sistemima sa velikim udelom uređaja energetske elektronike; balansiranje; stabilnost; analize elektromagnetnih prelaznih procesa.



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.043P](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.043P)

C2 02

**ПРОГНОЗА ПРОИЗВОДЊЕ ОБНОВЉИВИХ ИЗВОРА ЕНЕРГИЈЕ –  
ПЕТОГОДИШЊЕ ИСКУСТВО ОПЕРАТОРА ПРНОСНОГ СИСТЕМА**

**ПЕТАР ПЕТРОВИЋ, МАРИЈА ЂОРЂЕВИЋ, СРЂАН МЛАДЕНОВИЋ  
АД ЕЛЕКТРОМРЕЖА СРБИЈЕ**

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

*Кратак садржај* – Оператор преносног система је дужан да обезбеђује баланс између потрошње и производње у сваком тренутку. Са повећањем инсталисане снаге варијабилних, обновљивих извора енергије у систему, расте потреба за већим количинама балансне енергије која ће пружати сигуран и поуздан рад електроенергетског система. ЕМС АД свакодневно спроводи процес прогнозе производње из обновљивих извора електричне енергије. У раду су представљена искуства током петогодишњег рада са освртом на квалитет грешке добијене из различитих извора прогнозе ОИЕ. Дат је осврт на утицај грешке прогнозе на друге процесе, а пре свега из перспективе будућих очекиваних прикључења ОИЕ у електроенергетски систем Републике Србије.

*Кључне речи* – прогноза производње из ОИЕ, средња апсолутна грешка, планирање рада ЕЕС, балансна одговорност;

## 1 УВОД

ЕМС АД као оператор преносног система у Републици Србији, задужен је за пренос електричне енергије путем високонапонске мреже, сигуран рад система, обезбеђивање системских услуга, балансирање и администрацију тржишта електричне енергије. Како би се лакше предвиделе и оптимизовале потребе за резервом, потребна је квалитетна прогноза производње из обновљивих извора, пре свега из ветроелектрана. У раду је приказан кратак историјат прикључења ветроелектрана на преносни систем, са посебним освртом на успостављање процеса прогнозе из ОИЕ, и софтверима који се користе у ЕМС АД. У раду је приказан значај тачности прогнозе из ОИЕ који се рефлектује на целокупан процес оперативног планирања и анализе рада ЕЕС-а.

## 2 РЕГУЛАТОРНИ ОКВИР

Обновљиви извори енергије (ОИЕ) постају све важнији део глобалног енергетског система, захваљујући потребама за смањењем емисија CO<sub>2</sub> и преласком на одрживије изворе енергије. Имплементација ОИЕ на преносни систем показује додатне изазове при управљању системом. Њихова интеграција захтева прилагођавање постојећих инфраструктурних решења, као и развој нових технологија које омогућавају ефикасно управљање варијабилном производњом. У многим случајевима, ово подразумева унапређење преносне мреже како би се омогућила већа флексибилност и оперативна отпорност у смислу комбиновања различитих извора енергије.

У складу са Законом о енергетици ЕМС АД доноси Правила о раду преносног система која у себи садрже одређене одредбе, првенствено техничке услове, везано за обновљиве изворе. Суочени смо са изазовом проналажења најбољег и најпримеренијег начина на који се нови обновљиви извори (првенствено ветроелектране) могу повезати на националну мрежу као и са њиховим утицајем на рад и сигурност националне (али и регионалне) електроенергетске мреже. Да би се прилагодили интеграцији обновљивих извора енергије, потребно је континуално пратити светске/европске тенденције у процени производње из обновљивих извора, како енергије ветра, тако и сунца. Важно је истаћи напредовање технологија ветрогенератора, смањење цене, појаву технологије везане за „storage“ великих снага. У европским земљама ветроелектране значајно учествују у регулацији, односно балансирању система у складу са новим тенденцијама развоја тржишта електричне енергије.

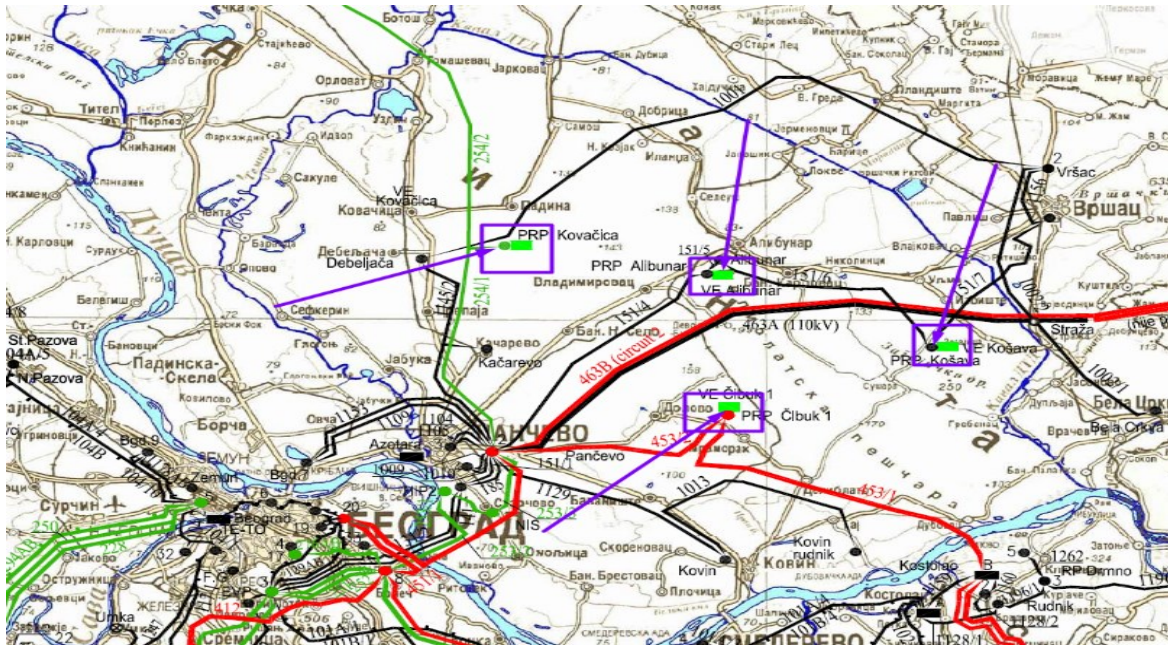
Важно је истаћи да се Трећим, а нарочито четвртим Енергетским пакетом Европске комисије („Зелена енергија за све Европљане“) на свим нивоима подстиче производња из обновљивих извора електричне енергије.

## 3 ХРОНОЛОГИЈА ПРИКЉУЧИВАЊА ВЕ НА ПРЕНОСНИ СИСТЕМ

Током 2018. године и почетком 2019. године на преносни систем Републике Србије прикључена су 4 ветропарка, а крајем 2023. године на преносни систем прикључена је пета по реду ветроелектрана Кривача. Тренутно на преносном систему Србије прикључено је 477.26 MW:

- ВЕ Чибук 1 - са 57 генератора укупне инсталисане снаге 158.46 MW, прикључен на напонски ниво 400kV
- ВЕ Ковачица - са 38 генератора укупне инсталисане снаге 104.5 MW, прикључен на напонски ниво 220kV
- ВЕ Алибунар - са 21 генератора укупне инсталисане снаге 42 MW, прикључен на напонски ниво 110kV

- ВЕ Кошава - са 20 генератора укупне инсталисане снаге 69 MW, прикључен на напонски ниво 110kV
- ВЕ Кривача - са 22 генератора укупне инсталисане снаге 103,3 MW, прикључен на напонски ниво 110kV



Слика 1: Локација ветроелектрана у ЕЕС Србије

Прве 4 поменуте ветроелектране су концентрисане у северноисточном региону Србије, а ВЕ Кривача у источном региону. Прикључењем наведених ветропаркова ЕМС АД је стекао одређена искуства у планирању и прогнози енергије ветра, као и искуства везано за проверу усаглашености обновљивих извора према дефинисаним параметрима из Правила о раду преносног система.

Ветроелектране су прикључиване секвенцијално на преносни систем. Све ветроелектране су организоване по струјним круговима и тако су и пуштане у рад.

Процес прикључења ветроелектрана на преносни систем Србије започет је првим струјним кругом са шест генератора у ветроелектрани Чибуку 1, 6. августа 2018.

У наредном периоду, редом су пуштене у рад и остале ветроелектране. Најпре у ВЕ Чибуку 1, прикључена су сва три струјна круга, а потом у ВЕ Алибунар, 23. новембра 2018., укупно 21 ветрогенератор инсталисане снаге од 42 MW. У 2019. на преносни систем Србије су прикључене још две ветроелектране, ВЕ Ковачица и ВЕ Кошава, а крајем 2023. на преносни систем прикључена је ВЕ Кривача.

Прецизна хронологија прикључивања ВЕ на систем Србије дата је у табели 1.

Табела 1: Хронологија прикључивања ветроелектрана на преносни систем Србије

Назив ВЕ	Локација (општина)	Укупна инсталисана снага (MW)	Напон прикључења (kV)	Број турбина	У погону од	Инсталисана снага појединачног WTG(MW)
Чибук 1	Долово, Панчево	157	400	57	Август, 2018	2.75
Ковачица	Ковачица, Јужнобанатски округ	104.5	220	38	Децембар, 2019	2.75
Кошава	Вршац	69	110	20	Мај, 2019	3.45
Алибунар	Алибунар, Вршац	42	110	21	Новембар, 2018	2.08
Кривача	Кривача, Голубац	103,3	110	22	Новембар, 2023	4,8
Укупна снага		477.26 MW:				

#### 4 ПРОГНОЗА ПРОИЗВОДЊЕ ИЗ ВЕТРОЕЛЕКТРАНА

Оператор преносног система одговоран је за поуздан и сигуран рад преносне мреже. Како би се лакше предвиделе и оптимизовале потребе за резервом, потребна је квалитетна прогноза производње из обновљивих извора, пре свега из ветроелектрана.

Прогноза производње ОИЕ игра кључну улогу у ефикасном управљању преносним електроенергетским системом. Тачне и правовремене прогнозе омогућавају операторима преносних система да унапреде планирање и оперативне одлуке, што је посебно важно за балансирање у преносном систему. На пример, када се очекује висок ниво производње из соларних панела током сунчаних дана, оператори могу унапред приказати и прилагодити производњу. Поред тога, прецизне прогнозе могу помоћи у смањивању трошкова и оптимизацији планирања неопходне резерве за управљање у преносном систему.

Један од већих изазова са којим се ЕМС АД суочио, доласком и интеграцијом ветропаркова у преносни систем Србије је да на што квалитетнији начин прогнозира енергију којом ће обновљиви извори партиципирати у миксу производње у наредном периоду. У Центру за оперативно планирање и анализу рада преносног система, кренуло се са процесом израде прогнозе производње из ветра. Начин на који смо одлучили да организујемо процесе у великој мери је био предодређен вишедеценијским искуством многобројних европских оператора преносних система.

Наиме, већина оператора набавља прогнозе производње од неколико независних пружаоца услуга. Добијене прогнозе се уважавају са различитим тежинским факторима, стеченим на основу искуства, чиме се долази до финалне прогнозе што веће тачности. Ово је био велики изазов за инжењере у Сектору за планирање и анализу рада преносног система, који су преузели одговорност да прогнозирају енергију из ветра. Не треба занемарити чињеницу, да су прве четири ветроелектране са око 370 MW снаге, у веома кратком временском интервалу, прикључене на преносни систем Србије. У претходном периоду ЕМС АД се бавио импелментацијом различитих софтвера, апликација и услуга за коришћење података о ветроелектранама, услед потребе за што бољом прогнозом производње из обновљивих извора. Користећи методе машинског учења и анализе података, могуће је уочити образце у временским условима



и унапред одредити производњу енергије из обновљивих извора, што може значајно побољшати ефикасност целог система.

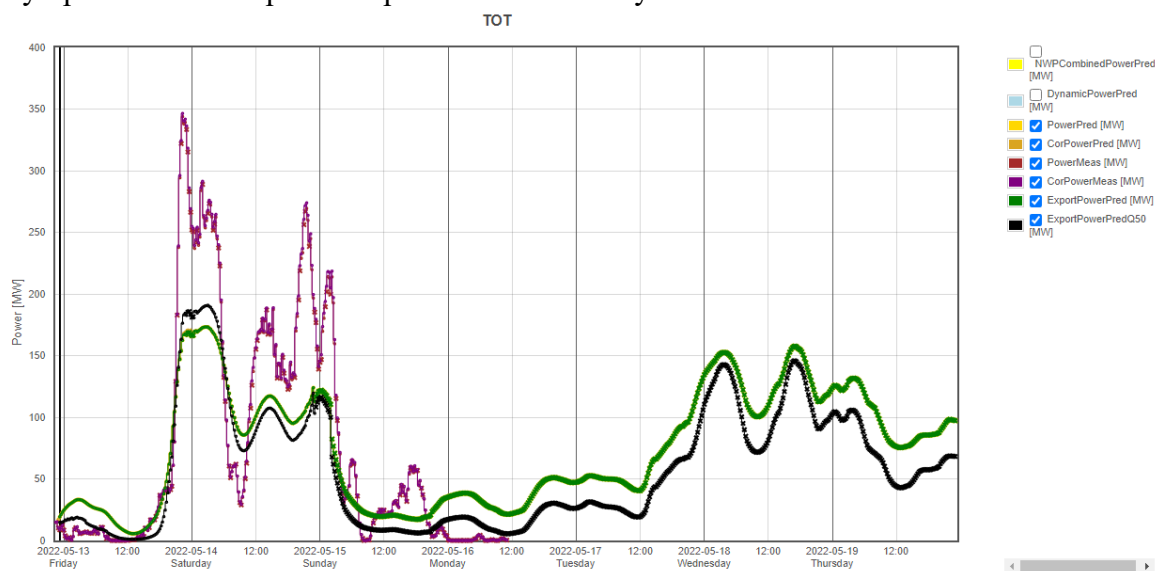
У ЕМС АД тренутно се користи неколико различитих извора прогнозе производње из обновљивих извора енергије. Како су тренутно на наш систем прикључене само ветроелектране, израђује се прогноза производње из ветроелектрана, али са плановима да се овај процес прошири и на остале типове обновљивих, у складу са новим инсталисаним капацитетима.

## 5 ТАЧНОСТ ПРОГНОЗЕ ПРОИЗВОДЊЕ ИЗ ВЕТРОЕЛЕКТРАНА

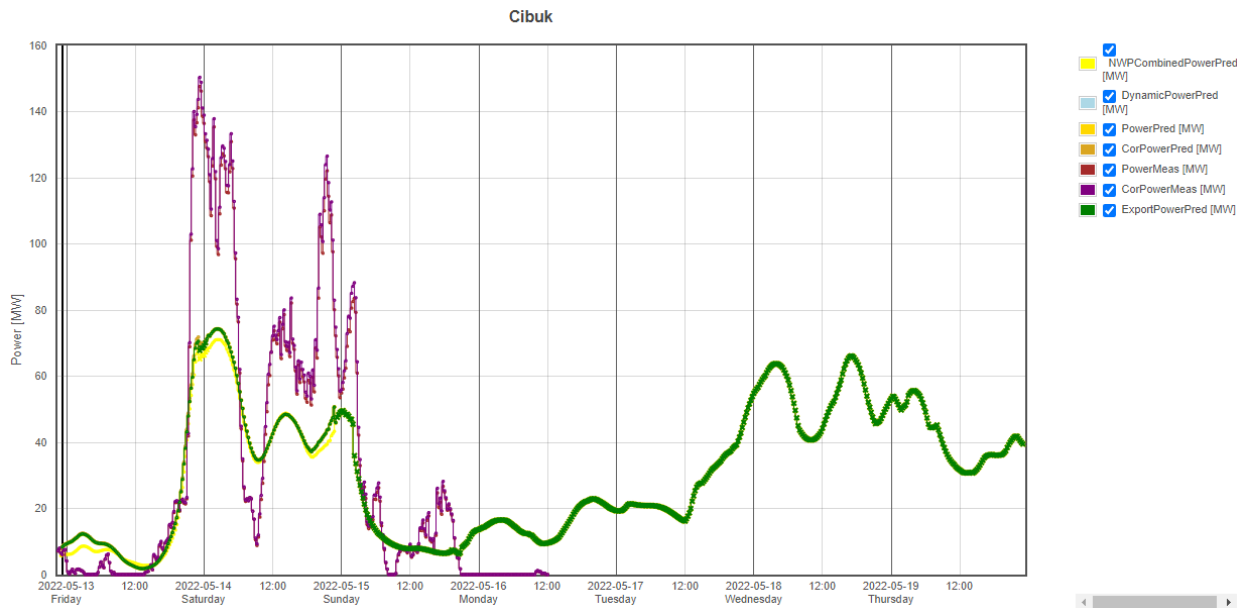
Претходних година ЕМС АД је користио услугу прогнозе производње из ветра од екстерног испоручиоца услуге. У циљу постизања веће тачности у прогнози производње из обновљивих извора, кренуло се и са набавком софтвера за ову сврху. ЕМС АД је набавио софтвер за прогнозу производње ОИЕ од данске компаније ЕНФОР, са којом смо већ имали успешну сарадњу у претходним годинама кроз услугу прогнозе производње, тако да се од јануара 2022. године у ЕМС-у користи софтвер за прогнозу производње ветроелектрана.

Овај софтвер врши прогнозу производње како за укупну производњу из ветра у нашем систему тако и за појединачне ветроелектране (тренутно 5 које су прикључене). Прогноза се креира на основу неколико извора метеоролошких прогноза.

Заједничким радом тима ЕМС-а са данском компанијом, дошло се до прецизних прогноза производње из ветроелектрана. На слици 2. дат је приказ из софтвера компаније ЕНФОР, прогнозираних и остварених вредности производње свих ветроелектрана у Србији, за наредних 7 дана од момента креирања прогнозе, а на слици 3. су приказана остварења и прогнозе за ВЕ Чибук .



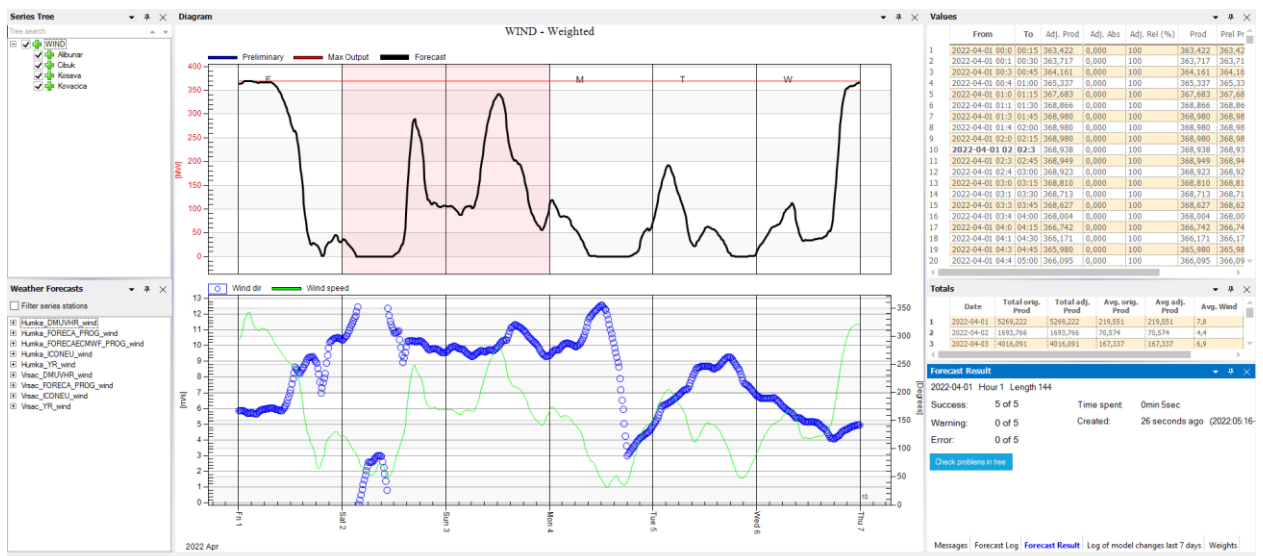
Слика 2. Графички упоредни приказ прогнозираних и остварених вредности свих ветроелектрана у Србији



Слика 3. Графички упоредни приказ прогнозираних и остварених вредности ветроелектране Чибук у софтверу ЕНФОР

Поред прогнозе коју даје софтвер ЕМС АД користи и услугу прогнозе производње од шведске компаније Витек. Компанија Витек поседује један од најбољих софтвера/сервиса овог типа на тржишту. Витек ову услугу врши помоћу софтвера Aiolos Forecast Studio, који је развијен у њиховој компанији.

На слици 4. дат је приказ прогнозе и интерфејса софтвера Aiolos Forecast Studio. Софтвер је кориснички оријентисан и пружа велике могућности праћења прогноза како преко графичког тако и преко табеларног приказа.



Слика 4. Графички упоредни приказ прогнозираних и остварених вредности свих ветроелектрана у Србији у софтверу Aiolos

Са повећањем инсталисаних капацитета ОИЕ у ЕМС АД, јавља се све већа потреба за сличним услугама. Европски оператори преносних система поседују и по неколико, чак и десетину оваквих услуга од различитих испоручиоца, а све у циљу што боље и

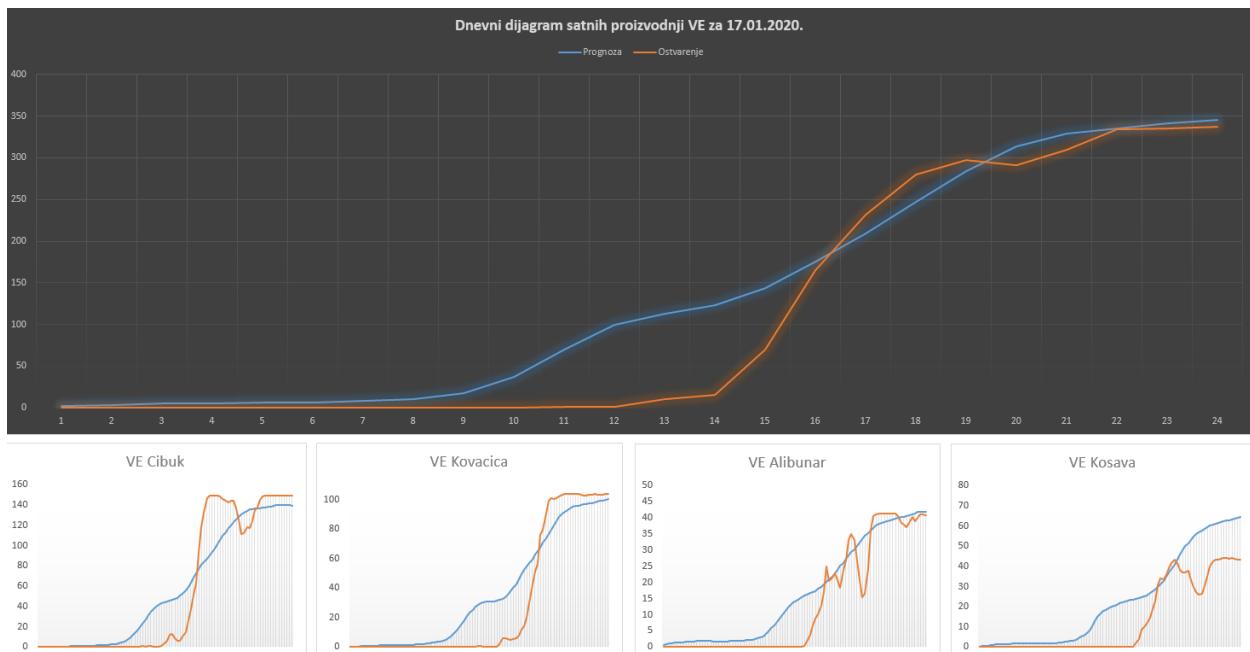


тачније прогнозе. У наредном периоду очекују се и прикључења првих соларних електрана на преносни систем Србије што ће бити нови изазов за ЕМС АД.

Сви подаци о прогнозама и остварењима ветроелектрана могу се наћи на различитим веб апликацијама развијеним у ЕМС-у. Ове апликације су развијене у циљу лакше коришћења података као и да би се омогућило лакше управљање системом. Један од примера апликација које користе податке о ветроелектранама је EnergyFlux. На овим апликацијама могу се видети најсвежији подаци о прогнозама производње из свих софтвера и услуга које поседује ЕМС АД, као најсвежији подаци о остварењима производње из ветроелектрана.

Значај као и ефикасност свих софтвера и различитих извора прогнозе производње из ветроелектрана показала је сврсисходност у претходном периоду када је функционисање нашег система било отежано услед проблема са конвенционалним изворима енергије. Добра прогноза и добар апликативни приказ прогноза, као и експертска знања инжењера у овој области су се показала као изузетно важна, а посебно у претходном периоду јер су ветроелектране значајно допринеле у производњи електричне енергије и помогле у рационалнијем планирању рада и свеукупном функционисању система.

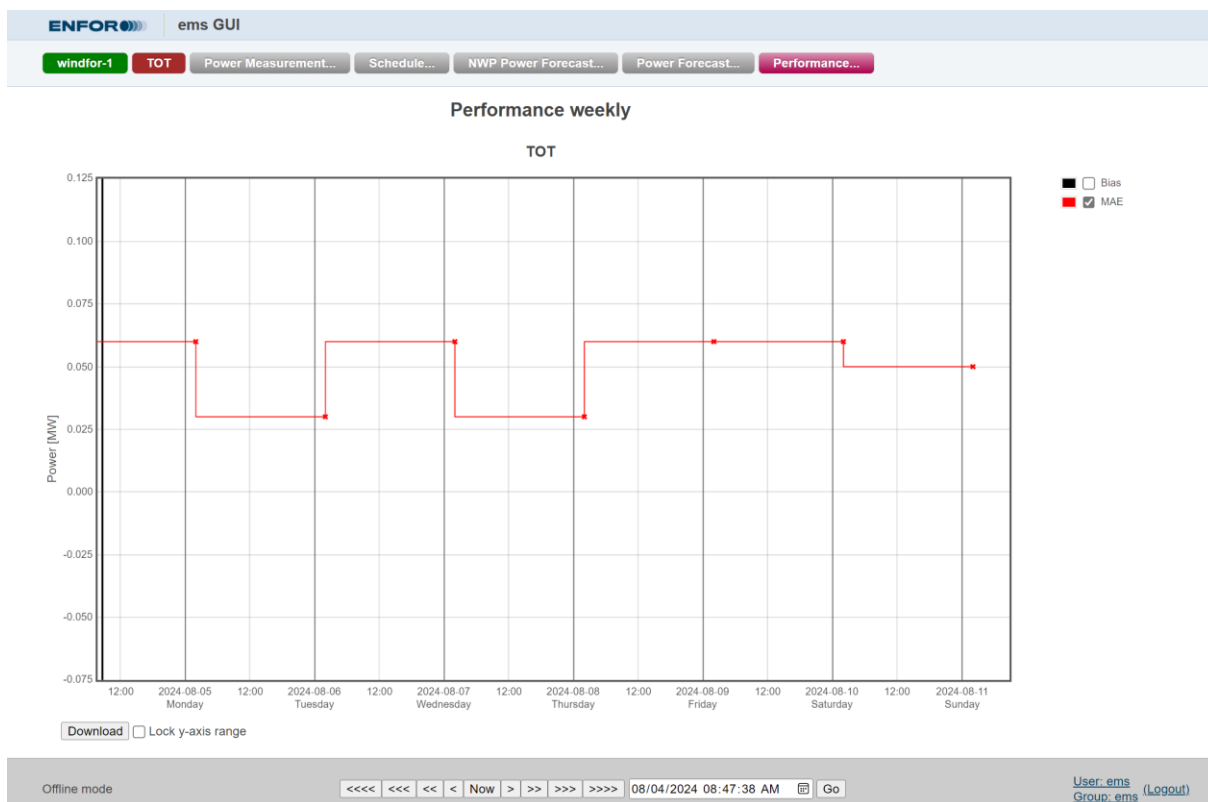
Како би се обезбедио што бољи квалитет прогнозе на дневној бази, прогноза се свакодневно прати, и формирају се извештаји са свим неопходним информацијама. Један дневни дијаграм сатних прогноза приказан је на Слици 5.



Слика 5. Дневни сумарни и појединачни дијаграми прогнозираних и остварених производњи

Тренутно се прате вредности прогнозе по свакој ветроелектрани Чибуку, Ковачици, Алибунару, Кошава и Кривача, као и сумарна вредност која је од пресудног значаја, посебно у режимима када се недостајућа енергија за вршне сате обезбеђује из ветроелектрана. Комплексност целог система који се бави аквизицијом и администрацијом података је таква да је неопходно успоставити перманентно контролисање квалитета рада сервиса. Грешка на било ком кораку пропадаће се, и на крају постати видљива кроз смањену тачност финалне прогнозе.

Квалитет рада прогнозе могуће је пратити кроз графички интерфејс, а који је приказан на Слици 6.



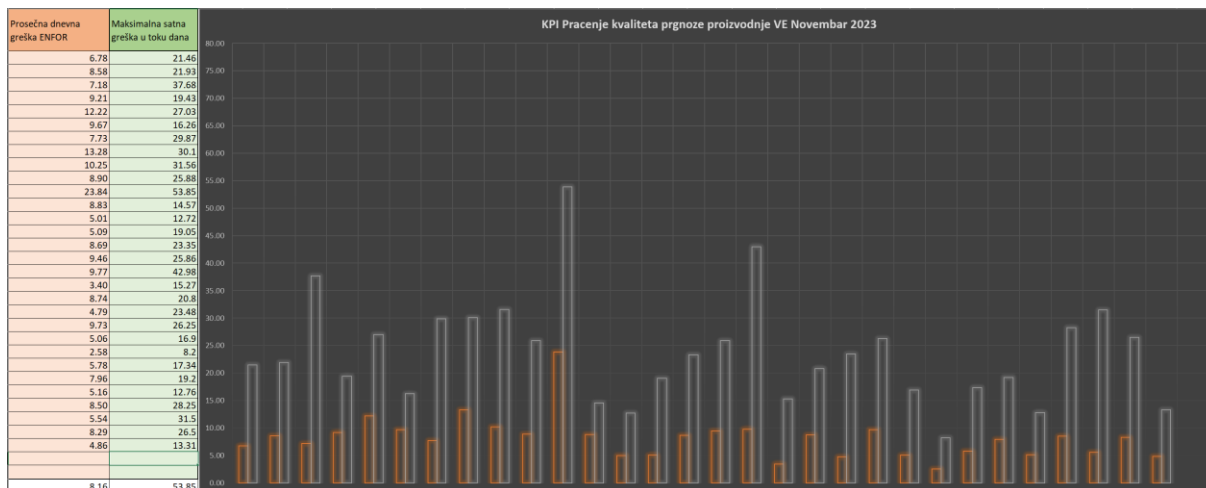
Слика 6. Приказ седмичних нормализованих процентуалних грешака свих ветроелектрана

MAE – Mean Absolute Error – средња апсолутна процентуална грешка

Грешка одступања плана од остварења рачуна се по формули

$$G = \frac{abs(P_{prognozirano} - P_{ostvareno})}{P_{instalirano}} * 100$$

На основу вишегодишњег искуства у праћењу квалитета прогнозе производње ветроелектрана можемо рећи да се процентуалне сатне грешке за дан унапред усредњене на месечном нивоу крећу у опсегу од 6-11%, односно у апсолутним вредностима од 30-50MW. Прогнозе које се односе на наредни сат су доста прецизније и крећу се у распону од 3-5% (морамо да напоменемо да су ово усредњене вредности на месечном нивоу). Оно што представља велики проблем и изазов нашем систему јесу максимална одступања која се јављају а она у одређеним сатима иду и преко 50% од укупне инсталисане снаге што у нашем случају износи и преко 240MW. На Слици 8. приказане су просечне и максималне процентуалне вредности одступања прогноза за дан унапред у месецу новембру 2023.



Слика 7. Приказ просечних и максималних дневних процентуалних грешака прогнозе за дан унапред

Метеоролошке прогнозе су зависна променљива која најдиректније утиче на квалитет прогнозирања производње обновљивих извора и морамо радити на томе да се оне у нашем региону унапређују јер ће се самим тим и способност нашег система да интегрише веће количине обновљивих извора поправити.

## 6 ЗАКЉУЧАК

Заступљеност обновљивих извора у производним капацитетима је доживела огромну експанзију на глобалном нивоу. Позиција ЕМС АД је таква да су ветропаркови нови изазов на који треба одговорити и са аспекта оперативног планирања, као што је приказно у овом чланку. Потребно је пратити регулативу и стално је унапређивати, водећи се искуствима еминентних европских оператора преносних система. Главни акценат треба да буде на томе да стабилност и поузданост електроенергетског система не буду угрожени. Тренутно прикључени ветропаркови, упркос релативно великом капацитету прикљученом у кратком периоду не представљају претњу на поменуто. Ветар је стохастичка појава и као такав велики изазов за инжењере који се баве прогнозама, чија ће тачност имати велике утицаје, како техничке, тако финансијске природе на многе процесе у ЕМС АД. Како се технологија развија и унапређује, очекује се да ће обновљиви извори енергије играти још значајнију улогу у обликовању енергетских политика и стратегија у будућности.

## RENEWABLE ENERGY PRODUCTION FORECAST - FIVE-YEAR EXPERIENCE OF TRANSMISSION SYSTEM OPERATOR

PETAR PETROVIĆ, MARIJA DJORDJEVIĆ, SRDJAN MLADENIĆ  
JOINT STOCK COMPANY "ELEKTROMREŽA SRBIJE"

BELGRADE

SERBIA

**Abstract - The transmission system operator is obliged to ensure a balance between consumption and production at all times. With the increase in the installed power of**

**variable, renewable energy sources in the system, the need for larger amounts of balance energy that will provide safe and reliable operation of the power system is growing. EMS AD carries out the process of forecasting production from renewable sources of electricity every day. The paper presents experiences during five years of work with a focus on the quality of errors obtained from different sources of RES forecasts. An overview of the impact of the forecast error on other processes is given, primarily from the perspective of future expected connections of RES to the power system of the Republic of Serbia.**

***Key words* — renewable energy production forecast, Mean Absolute Error, EES work planning, balance responsibility;**

C2 02

**PROGNOZA PROIZVODNJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE –  
PETOGODIŠNJE ISKUSTVO OPERATORA PRENOSNOG SISTEMA**

**RENEWABLE ENERGY PRODUCTION FORECAST - FIVE-YEAR EXPERIENCE  
OF TRANSMISSION SYSTEM OPERATOR**

**PETAR PETROVIĆ, MARIJA ĐORĐEVIĆ, SRĐAN MLADENOVIĆ  
AD ELEKTROMREŽA SRBIJE**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj - Operator prenosnog sistema je dužan da obezbedi balans između potrošnje i proizvodnje u svakom trenutku. Sa povećanjem instalisanih snage varijantnih, obnovljajućih izvora energije u sistemu, raste potreba za većim količinama balansne energije koja će pružati siguran i uzdan rad elektroenergetskog sistema. EMS AD svakodnevno sprovodi proces prognoze proizvodnje iz obnovljajućih izvora električne energije. U radu su predstavljena iskustva tokom petogodišnjeg rada sa osvrtom na kvalitet greške dobijene iz različitih izvora prognoze OIE. Dat je kratak osvrt na regulatorni okvir i veza sa četvrtim Energetskim paketom Evropske komisije. U radu je prikazana hronologija uključivanja vetroelektrana u EES Srbije. Rad prezentuje servise i alata koji se koriste u EMS AD u izradi prognoze proizvodnje u operativnom planiranju rada prenosnog sistema. Dat je osvrt na uticaj greške prognoze na druge procese, a pre svega iz perspektive budućih očekivanih uključenja OIE u elektroenergetski sistem Republike Srbije.*

*Ključne reči – prognoza proizvodnje iz OIE, srednja apsolutna greška, planiranje rada EES, balansna odgovornost.*



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.054L](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.054L)

C2 03

## APLIKACIJA ZA PRORAČUN MOGUĆNOSTI OPTEREĆENJA TRANSFORMATORA

PAVLE LUČIĆ<sup>1</sup>, MILOŠ STOJIĆ, GORAN JAKUPOVIĆ,  
SOVJETKA KRSTONIJEVIĆ  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN – IMP AUTOMATIKA

BEOGRAD

SRBIJA

*Kratak sadržaj — Aplikacija za proračun mogućnosti opterećenja transformatora (PMOT) omogućava sagledavanje mogućeg strujnog opterećivanja pojedinih transformatora, sa ciljem njihove efikasnije upotrebe u sklopu planiranja upravljanja elektroenergetskim sistemom. Aplikacija se bazira na termičkom modelu transformatora. Osnovna funkcija aplikacije je da, za pretpostavljene uslove opterećivanja transformatora u budućnosti, računa vrednosti i trajanje mogućih opterećenja u odnosu na ograničenje temperature rashladnog ulja. Aplikacija pruža uvid u realno temperaturno stanje transformatora i putem korisničkog interfejsa omogućava procenu preopterećenja za budući vremenski period od interesa. Ulazni podaci za proračun preuzimaju se iz konfiguracionih datoteka generisanih iz *Aplikativne baze podataka* (ABP). Rezultati proračuna dostupni su korisniku putem grafičkog interfejsa, u XML izlaznim datotekama i u obliku izveštaja o izvršenom proračunu. Aplikacija nudi dva režima rada: proračun maksimalne dozvoljene struje za zadati vremenski period i proračun temperature transformatora za zadati vremenski period i zadatu struju. Aplikacija je razvijana u tandemu sa *Aplikacijom za proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda* (PMODV). Planirana je njihova zajednička integracija sa *Aplikacijom za dispečerske tokove snaga* (DPF). U studijskom režimu biće omogućene „what-if“ analize o mogućnosti iskorišćenja i preopterećenja dalekovoda i transformatora u režimima rada koji se dobijaju na bazi pretpostavljenih budućih uklopnih stanja u mreži i drugih parametara koji se zadaju u aplikaciji DPF. U ovom radu biće date osnove korišćenog*

---

<sup>1</sup> Pavle Lučić, Institut “Mihajlo Pupin”, Volgina 15, 11000 Beograd, e-mail: [pavle.lucic@pupin.rs](mailto:pavle.lucic@pupin.rs)

matematičkog modela, prikaz arhitekture sistema, aspekti softverske implementacije i, na kraju, pravci daljeg razvoja.

**Ključne reči** — opterećenje transformatora, termički model transformatora, dispečerski tokovi snaga

## 1 UVOD

Aplikacija za proračun mogućnosti opterećenja transformatora razvijana je kao tehničko rešenje (tip M85) u sklopu projekta *Unapređenje aplikacija za proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda i transformatora i njihova integracija sa mrežnim aplikacijama u real-time i studijskom režimu*. Projekat je realizovan u okviru programa *Tehnološki razvoj u oblasti energetike, rudarstva, i energetske efikasnosti* Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Aplikacija za proračun mogućnosti opterećenja transformatora razvijana je na osnovi aplikacije za proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda [1]. Grafički interfejs aplikacije realizovan je kao proširenje funkcionalnosti grafičkog interfejsa aplikacije za proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda, dok je računsko jezgro realizovano kao zasebna aplikacija.

U sklopu planiranja upravljanja elektroenergetskim sistemom, sa ciljem povećanja pouzdanosti i efikasnosti upotrebe sistema, ova aplikacija omogućava sagledavanje mogućeg strujnog opterećivanja pojedinih energetske transformatora. Osnovna funkcija programa je da za pretpostavljene uslove rada i opterećivanja transformatora u budućnosti, računa vrednosti i trajanje mogućih opterećenja, u odnosu na ograničenje temperature rashladnog ulja transformatora.

Aplikacija se bazira na termičkom modelu transformatora. Putem korisničkog interfejsa aplikacija pruža uvid u realno temperaturno stanje transformatora i omogućava procenu preopterećenja za budući vremenski interval od interesa. Aplikacija automatski preuzima ulazne podatke za proračun iz konfiguracionih datoteka, koje pre toga generiše iz Aplikativne baze podataka (ABP). Deo ulaznih podataka, koji zavise od vrste proračuna, kao i zahtev za samim proračunom, unosi sam korisnik preko grafičkog interfejsa. Rezultati su dostupni korisniku putem interfejsa, ali i trajnije, u izlaznoj datoteci, u obliku izveštaja o izvršenom proračunu. Aplikacija nudi dva režima rada (tipa proračuna):

1. proračun temperature ulja za zadati vremenski period i zadatu struju, i
2. proračun maksimalne dozvoljene struje za zadati vremenski period.

U prvom režimu rada aplikacija proračunava temperaturu ulja transformatora za zadate vremenske uslove u budućnosti. Proračun se vrši za period za koji su dati podaci o okolini u budućnosti. Struja je zadata i fiksna tokom proračuna. Početne temperature su zadate. U datoteci sa izveštajem prikazuje se izračunata temperatura ulja.

U drugom režimu rada proračunava se maksimalna dozvoljena struja za definisani vremenski period. Ovaj period je jednak umnošku vremenske rezolucije i broja uzoraka. Maksimalna dozvoljena struja proračunava se na osnovu maksimalne dozvoljene temperature ulja transformatora. Aplikacija prvo izračunava trenutnu temperaturu ulja transformatora, a zatim, sa tako izračunatom temperaturom, proračunava maksimalno dozvoljenu struju za period u budućnosti uvažavajući faktore okoline sa meteorološkim uslovima. U datoteci sa izveštajem prikazuje se izračunata temperatura i maksimalna struja.

Ovo rešenje delom se oslanja i na iskustva stečena na našem ranijem razvoju sličnih aplikacija za proračun mogućnosti opterećenja transformatora i dalekovoda opisanih u [2-5].

## 2 MODEL

Matematički modeli [6, 7] opterećenja transformatora zasnivaju se na različitim jednačinama u zavisnosti od tipa hlađenja transformatora.

Proračun temperature ulja na vrhu za definisane ulazne parametre i ON hlađenje zasniva se na jednačini (1):

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{or} \left( \frac{1+RK^2}{1+R} \right)^x + Hg_r \cdot K^y, \quad (1)$$

gde su:

- $\theta_h$  – Temperatura *hot-spota*,
- $\theta_a$  – Temperatura ambijenta,
- $\Delta\theta_{or}$  – Porast temperature ulja na vrhu pri nazivnom teretu za ON hlađenje,
- $R$  – Odnos gubitaka (Cu/ Fe) pri nazivnom teretu i praznom hodu,
- $K$  – Faktor opterećenja (odnos struje opterećenja i nominalne struje),
- $x$  – Eksponent temperature ulja,
- $Hg_r$  – Gradijent temperature ulja između *hot-spota* i temperature na vrhu pri nazivnom teretu i
- $y$  – Eksponent temperature namotaja.

Proračun temperature ulja na vrhu za definisane ulazne parametre i OF hlađenje zasniva se na jednačini (2):

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{br} \left( \frac{1+RK^2}{1+R} \right)^x + 2(\Delta\theta_{imr} - \Delta\theta_{br})K^y + Hg_r K^y \quad (2)$$

U jednačini figuriraju nove promenljive:

- $\Delta\theta_{br}$  – Porast temperature ulja na dnu pri nazivnom teretu za OF i OD hlađenje i
- $\Delta\theta_{imr}$  – Porast temperature ulja u sredini pri nazivnom teretu.

Proračun temperature ulja na vrhu za definisane ulazne parametre i OD hlađenje zasniva se na prethodnoj jednačini (2) uz dodatnu korekciju (3):

$$\theta'_h = \Delta\theta_h + 0.15(\theta_h - \theta_{hr}), \quad (3)$$

gde su:

- $\theta'_h$  – Korigovana temperatura *hot-spota*,
- $\Delta\theta_h$  – Porast temperature *hot-spota* i
- $\theta_{hr}$  – Priraštaj temperature *hot-spota*.

Proračun porasta temperature ulja na vremenskom intervalu  $t$  zasniva se na jednačini (4):

$$\Delta\theta_{bt} = \Delta\theta_{bi} + (\Delta\theta_{bu} - \Delta\theta_{bi})(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (4)$$

gde su:

- $\Delta\theta_{bt}$  – Porast temperature ulja,
- $\Delta\theta_{bi}$  – Početni porast temperature ulja na dnu,
- $\Delta\theta_{bu}$  – Granična vrednost porasta temperature ulja na dnu koja odgovara opterećenju za posmatrani vremenski interval,



- $t$  – Vremenski interval i
- $\tau$  – Vremenska konstanta ulja.

### 3 ULAZNI PARAMETRI MODELA

Karakteristike transformatora su:

- Porast temperature ulja na vrhu pri nazivnom teretu za ON hlađenje  $\Delta\theta_{or}$  [°K],
- Porast temperature ulja na dnu pri nazivnom teretu za OF i OD hlađenje  $\Delta\theta_{br}$  [°K],
- Porast temperature ulja u sredini pri nazivnom teretu  $\Delta\theta_{imr}$  [°K],
- Gradijent temperature ulja između hot-spota i temperature na vrhu pri nazivnom teretu  $H_{gr}$  [°K],
- Eksponent temperature ulja  $x$ ,
- Eksponent temperature namotaja  $y$ ,
- Odnos gubitaka (Cu/ Fe) pri nazivnom teretu i praznom hodu  $R$ ,
- Vremenska konstanta ulja  $\tau$  [h],
- Priraštaj temperature *hot-spota*  $\theta_{hr}$  [°K],
- Faktor opterećenja (odnos struje opterećenja i nominalne struje)  $K$ ,
- Maksimalno dozvoljena temperatura ulja na vrhu  $\theta_{omax}$  [°C],
- Maksimalno dozvoljena temperatura *hot-spota*  $\theta_{hmax}$  [°C],
- Temperatura ambijenta  $T_a$  [°C],
- Temperatura ulja  $T_o$  [°C],
- Temperatura *hot-spota*  $T_h$  [°C] i
- Struja na VN strani u fazi 4  $I_{vn}$  [A].

### 4 SOFTVERSKA ARHITEKTURA SISTEMA

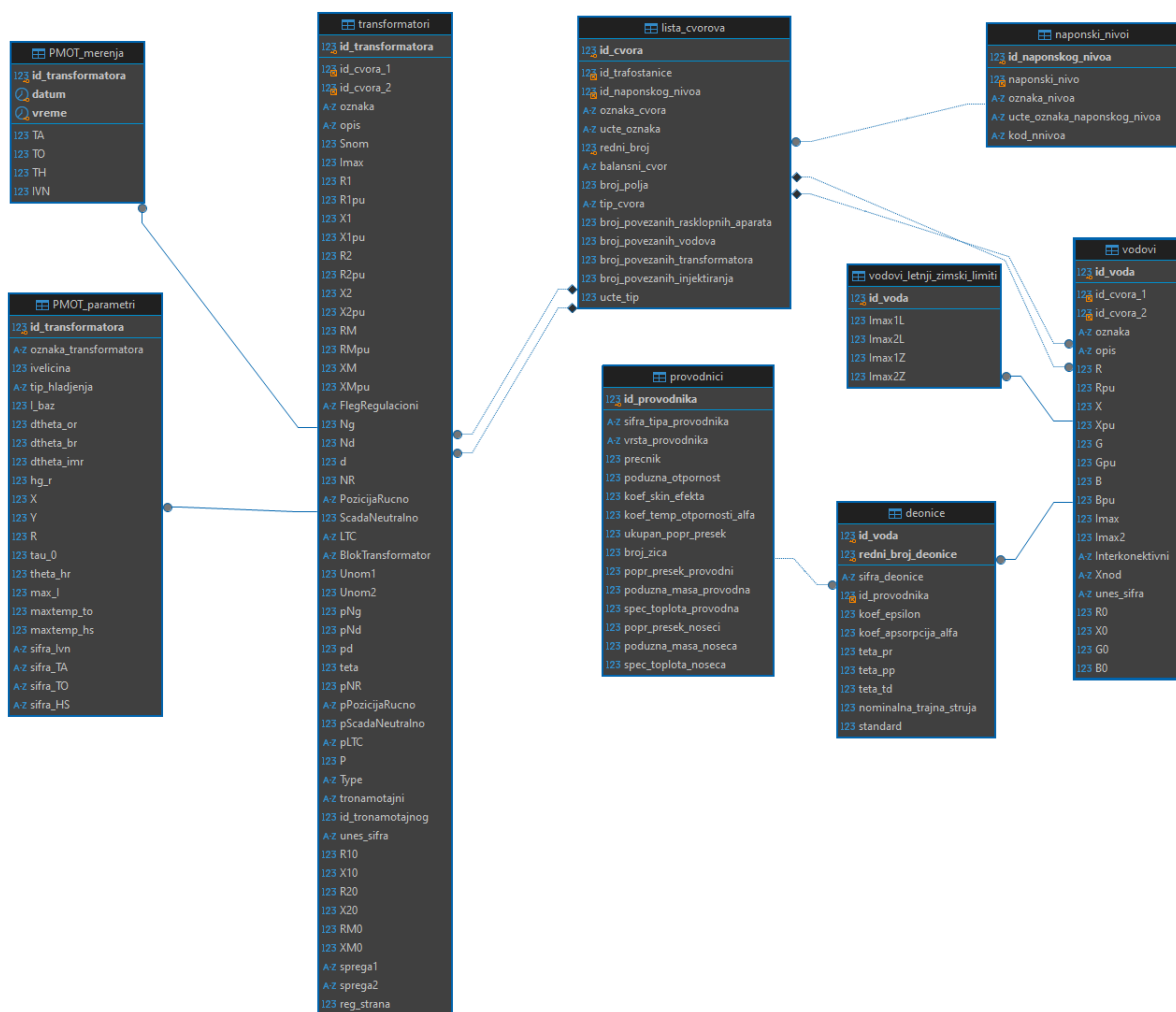
Baza podataka je relaciona i realizovna u MariaDB sistemu za upravljanje podacima. Računsko jezgro aplikacije realizovano je u C++ objektno orijentisanom programskom jeziku. Aplikacija sa grafičkim korisničkim interfejsima realizovana je u Java objektno orijentisanom programskom jeziku<sup>2</sup>. U prikazanom rešenju operativni sistem servera baze podataka je Oracle Linux, a operativni sistem grafičkog okruženja i računskog jezgra je Microsoft Windows. Celokupno rešenje je multiplatformsko i omogućava rad i aplikacije i baze podataka i na različitim Linuks distribucijama i na različitim verzijama Microsoft Windows-a.

### 5 BAZA PODATAKA

Kao osnovna baza podataka koristi se Aplikativna baza podataka (ABP). Aplikativna baza podataka je relaciona baza podataka i iz nje se dobija aktuelni model elektroenergetskog sistema (EES). ABP predstavlja centralni repozitorijum podataka o elementima EES (generatori, dalekovodi, transformatori, potrošači), kao i svih neophodnih podataka za određivanje statičke topologije mreže (povezanost elemenata, struktura sabirnica, opis sabirničkih polja, rasklopnih aparata...). Statička povezanost elemenata EES je opisana povezanošću njihovih terminala sa topološkim čvorovima [8].

Aplikativna baza podataka nadgrađena je tabelama i relacijama, neophodnim za realizaciju proračuna opterećenja transformatora (slika 1).

<sup>2</sup> Grafički korisnički interfejsi aplikacije za proračun mogućnosti opterećenja transformatora razvijani su na osnovi aplikacije za proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda [1].



Slika 1: Dijagram hijerarhije tabela modela transformatora

Prikazane su neke od tabela modela APB koje sadrže parametre aktuelnog modela za odabrane transformatore. Dodatne tabele su *PMOT\_parametri* i *PMOT\_merenja* u koje se smestaju nedostajući ulazni podaci za proračun. Tabela *PMOT\_parametri* sadrži kolone koje odgovaraju potrebnim ulaznim podacima koji opisuju parametre transformatora (tabela 1).

Naziv kolone tabele	Odgovarajući računski ulazni parametar modela
id_transformatora	Jedinstveni identifikator transformatora
oznaka_transformatora	Oznaka transformatora
tip_hladjenja	Tip hlađenja
I_baz	Nominalna struja $I_b$ [A]
dtheta_or	Porast temperature ulja na vrhu pri nazivnom teretu za ON hlađenje $\Delta\theta_{or}$ [°K]
dtheta_br	Porast temperature ulja na dnu pri nazivnom teretu za OF i OD hlađenje $\Delta\theta_{br}$ [°K]
dtheta_imr	Porast temperature ulja u sredini pri nazivnom teretu $\Delta\theta_{imr}$ [°K]
hg_r	Gradijent temperature ulja između hot-spota i temperature na vrhu pri nazivnom teretu $Hg_r$ [°K]
x	EkspONENT temperature ulja x
Z	EkspONENT temperature namotaja y

Naziv kolone tabele	Odgovarajući računski ulazni parametar modela
R	Odnos gubitaka (Cu/ Fe) pri nazivnom teretu i praznom hodu R
tau_0	Vremenska konstanta ulja $\tau$ [h]
theta_hr	Priraštaj temperature <i>hot-spota</i> $\theta_{hr}$ [°K]
max_I	Faktor opterećenja (odnos struje opterećenja i nominalne struje) K
maxtemp_to	Maksimalno dozvoljena temperatura ulja na vrhu $\theta_{omax}$ [°C]
maxtemp_hs	Maksimalno dozvoljena temperatura <i>hot-spota</i> $\theta_{hmax}$ [°C]

Tabela 1: Opis kolona tabele PMOT\_parametri

Tabela *PMOT\_parametri* sadrži kolone koje odgovaraju potrebnim ulaznim podacima koji opisuju vremenske serije merenja temperatura ambijenta, ulja, *hot-spota* i struje transformatora (tabela 2).

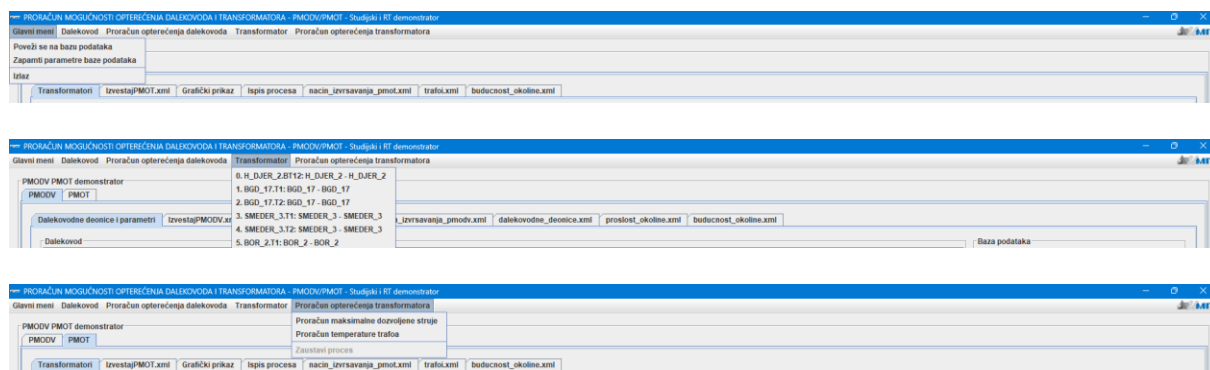
Naziv kolone tabele	Odgovarajući računski ulazni parametar modela
id_transformatora	Jedinstveni identifikator transformatora
datum	Datum merenja
vreme	Vreme merenja
TA	Temperatura ambijenta $T_a$ [°C]
TO	Temperatura ulja $T_o$ [°C]
TH	Temperatura <i>hot-spota</i> $T_h$ [°C]
IVN	Struja na VN strani u fazi 4 $I_{Vn}$ [A]

Tabela 2: Opis kolona tabele PMOT\_merenja

## 6 KORISNIČKI INTERFEJSI I OSNOVNE AKCIJE KORIŠĆENJA APLIKACIJE

Osnovni padajući meniji korisničkog interfejsa aplikacije (slika 2) su *Glavni meni*, *Transformator* i *Proračun opterećenja transformatora*.<sup>3</sup> Njihovi podmeniji služe za osnovne akcije aplikacije među kojima su najvažnije:

1. Povezivanje na bazu podataka i pamćenje parametara konekcije,
2. Spisak transformatora dostupnih za proračune,
3. Pokretanje proračuna u dva različita režima za zadate parametre.

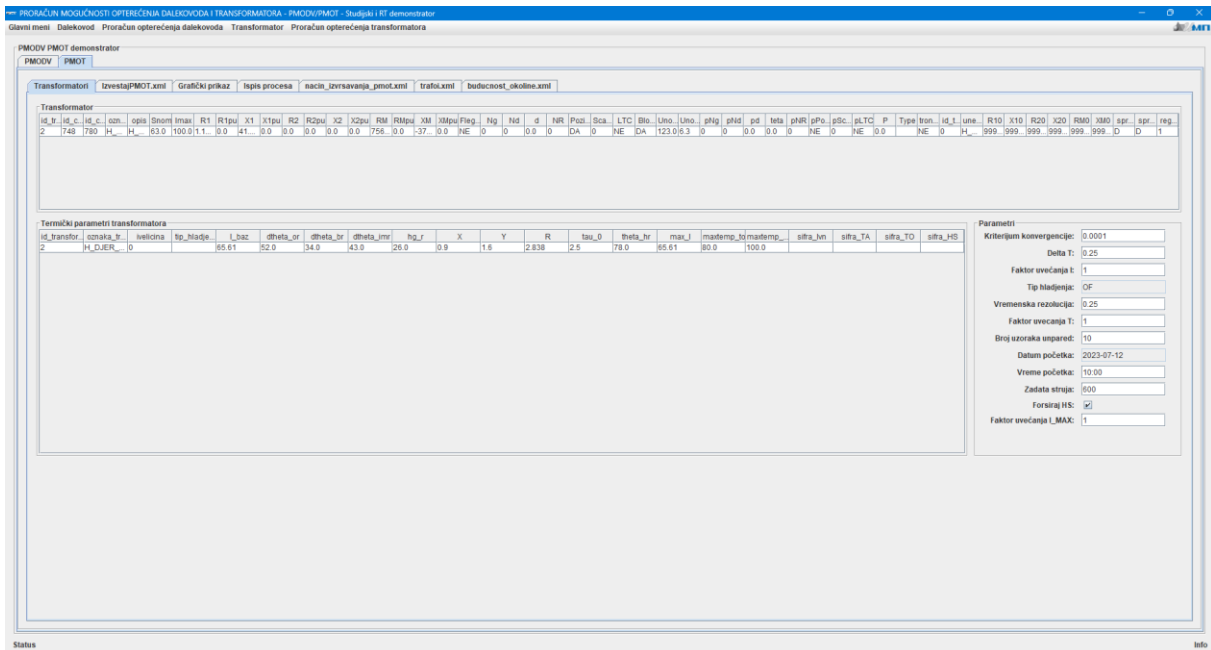


Slika 2: Osnovni padajući meniji korisničkog interfejsa

Osnovni ekran korisničkog interfejsa (slika 3) aplikacije prikazuje:

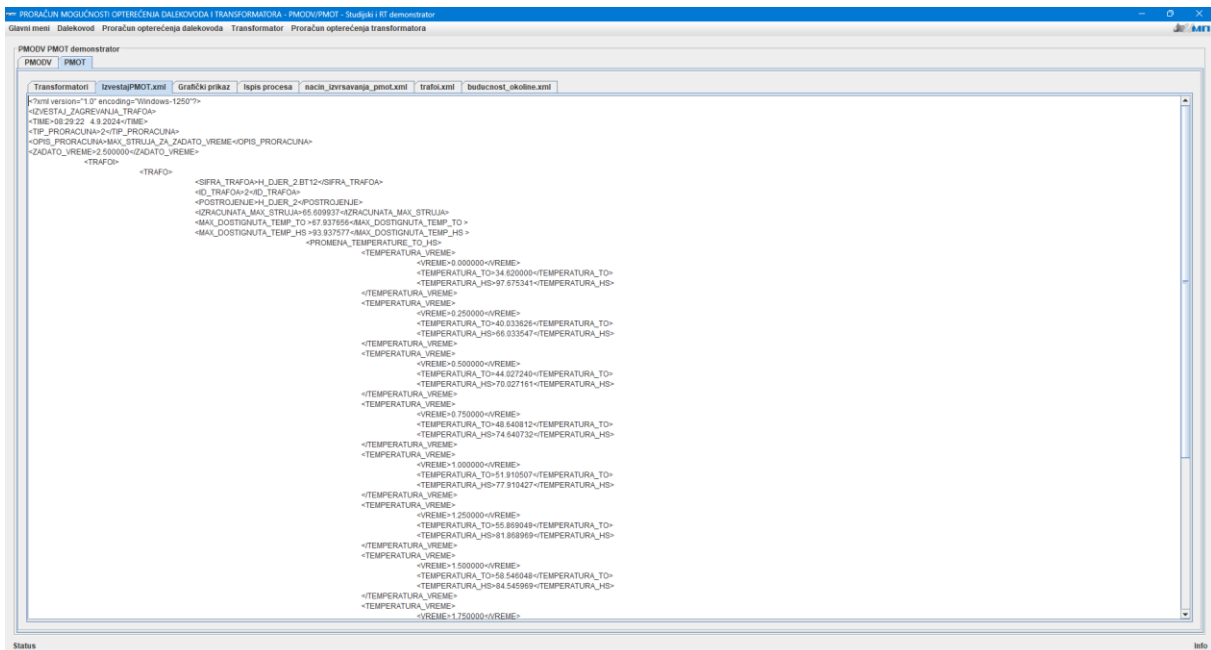
<sup>3</sup> Padajući meniji *Dalekovod* i *Proračun opterećenja dalekovoda*, kao i sve druge funkcionalnosti vezane za proračun opterećenja dalekovoda, opisani su u [1].

1. Izabrani transformator,
2. Parametre transformatora iz Aplikativne Baze Podataka (ABP),
3. Termičke parametre za izabrani transformator i
4. Parametre neophodne za pokretanje procesa proračuna.



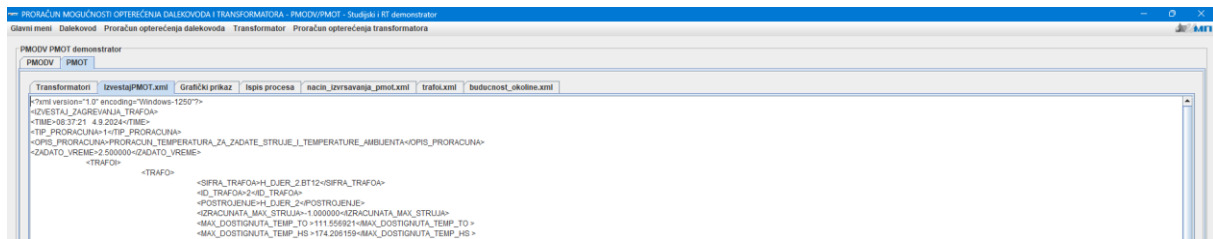
Slika 3: Osnovni ekran korisničkog interfejsa

Za zadate parametre i izabrani transformator moguće je pokrenuti akciju proračuna. Izlazni podaci rezultata proračuna (slika 4) sadržani su u datoteci IzvestajPMOT.xml koja ima sledeću strukturu:

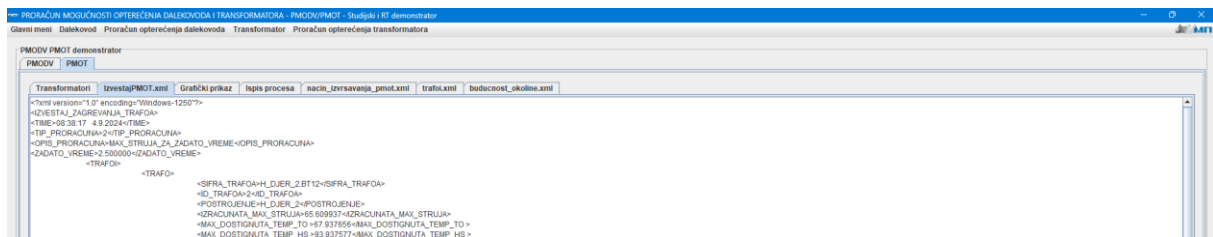


Slika 4: Struktura datoteke IzvestajPMOT.xml

Na slikama 5 i 6 prikazan je sadržaj XML datoteke u slučaju proračuna temperature za zadate druge parametre (tip proračuna 1) i u slučaju proračuna maksimalne dozvoljene struje (tip proračuna 2).

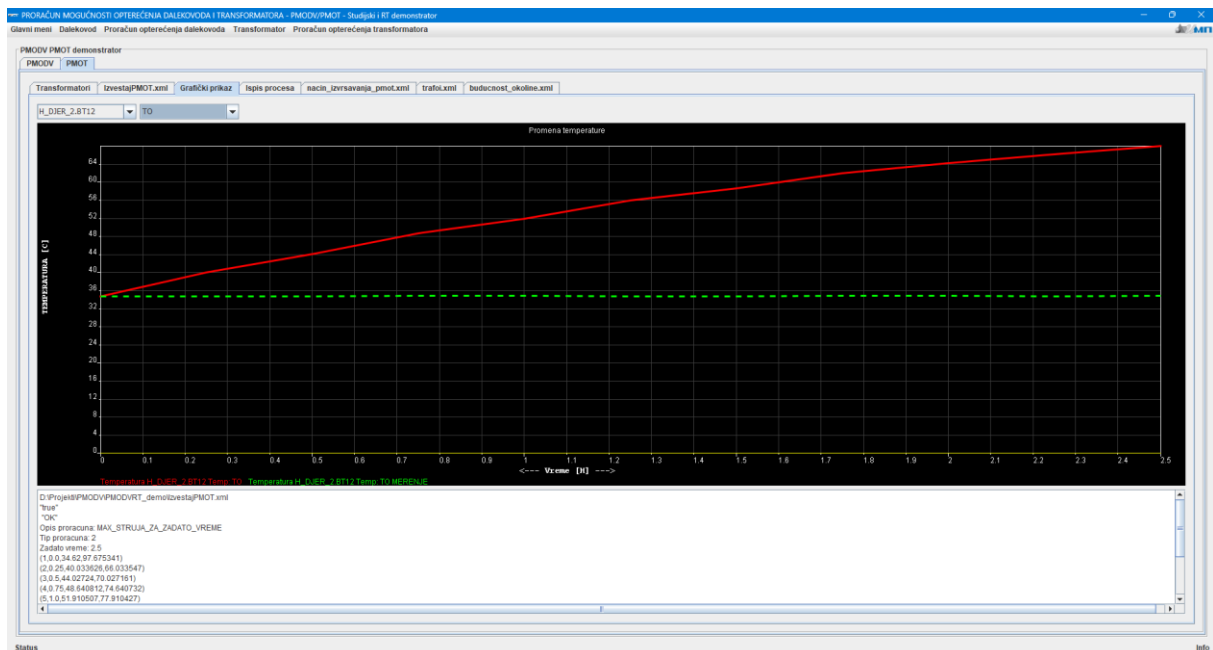


Slika 5: Prikaz štampe rezultata proračuna temperature za zadate druge parametre (tip proračuna 1)



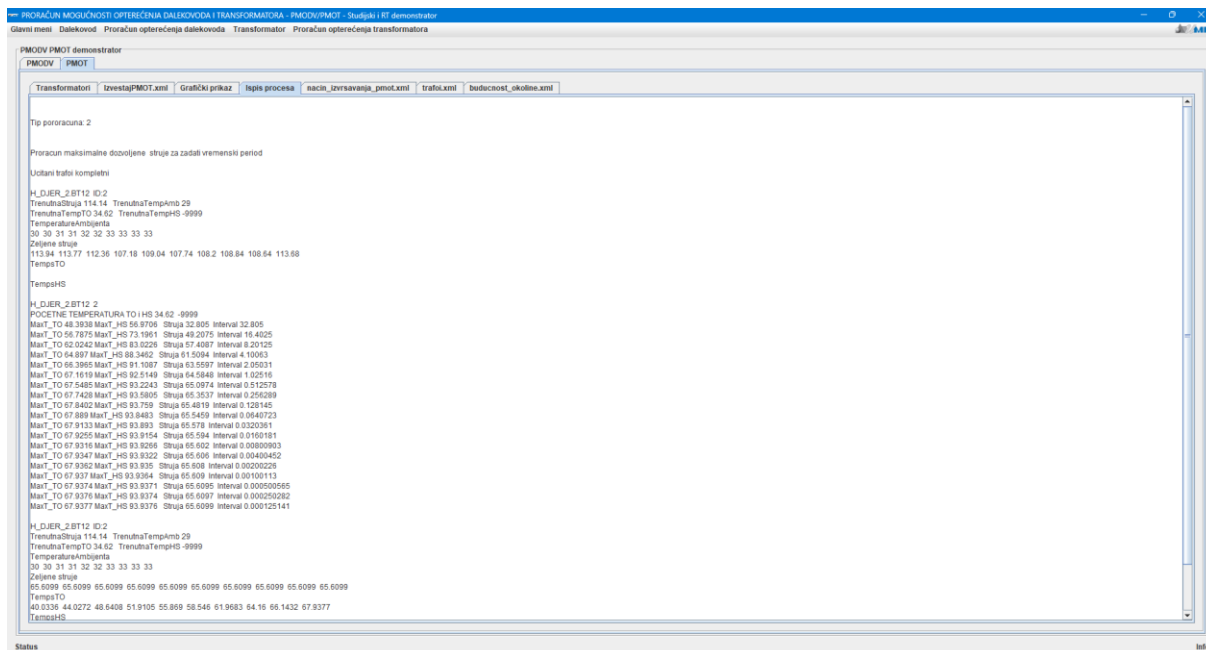
Slika 6: Prikaz štampe rezultata proračuna maksimalne dozvoljene struje (tip proračuna 2)

Na grafičkom prikazu (slika 7) dat je grafik promene temperature trnasformatora koji je dobijen kao rezultat proračuna:



Slika 7: Grafički prikaz promene temperature ulja

Kontrolni ispis procesa proračuna, kao rezultat ispisa C++ računskog jezgra, ispisuje se u datoteku *output.txt* (slika 8):



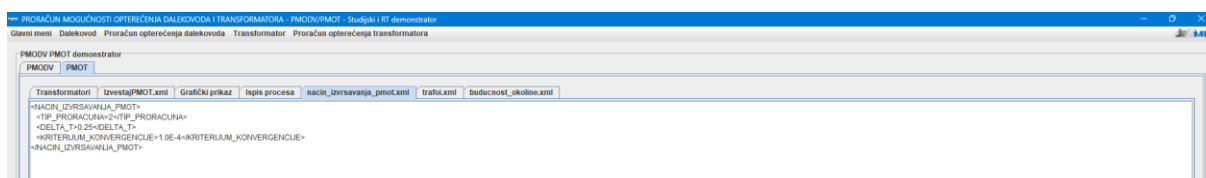
Slika 8: Kontrolni ispis procesa proračuna računskog jezgra

## 7 ULAZNE I IZLAZNE DATOTEKE

Za rad programa PMOT su potrebne sledeće vrste podataka:

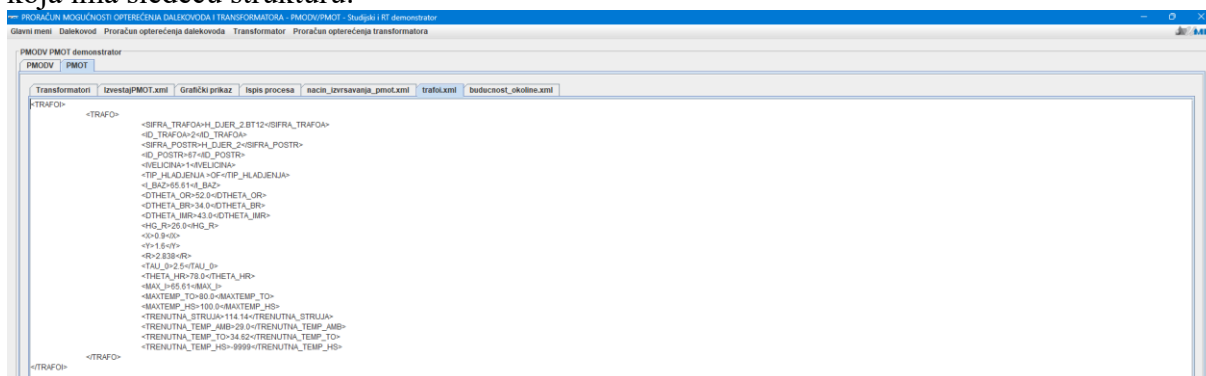
1. Podaci vezani za način izvršavanja programa: parametri izvršavanja i razne konstante,
2. Podaci o fizičkim karakteristikama transformatora i
3. Podaci o uslovima okoline transformatora za period u kome se vrši proračun.

Podaci o načinu izvršavanja programa (slika 9) generišu se na osnovu podataka koji se unose preko korisničkog interfejsa i sadržani su u datoteci `nacin_izvršavanja_pmot.xml` koja ima sledeću strukturu:



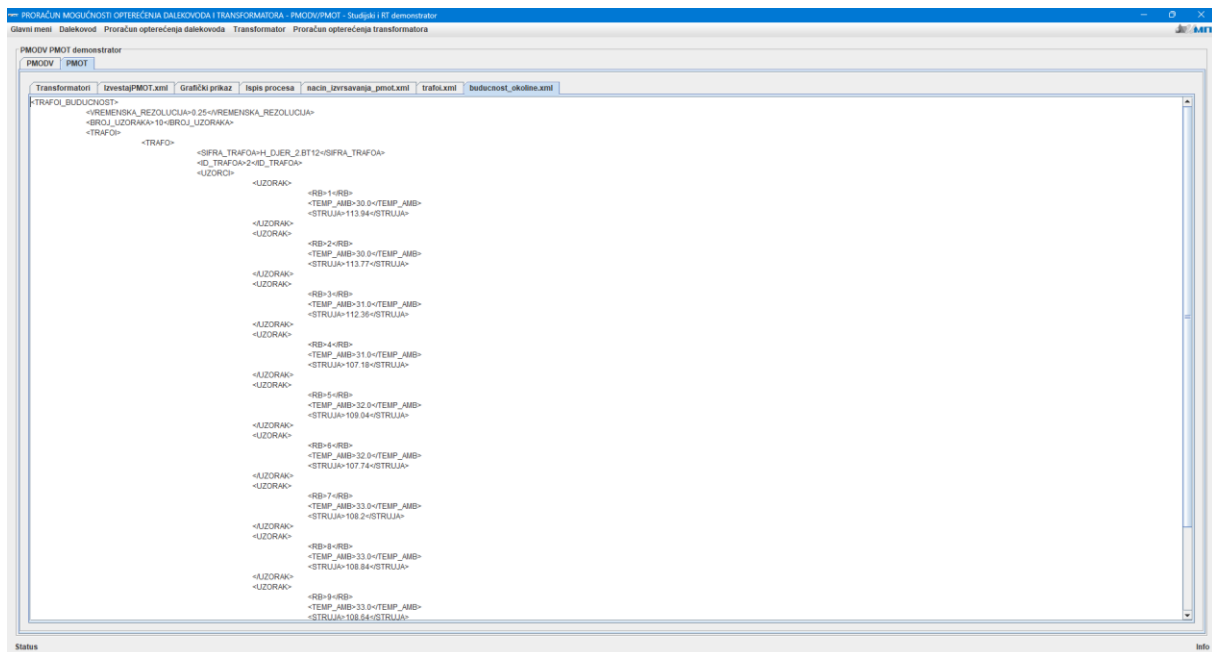
Slika 9: Struktura datoteke `nacin_izvršavanja_pmot.xml`

Podaci o fizičkim karakteristikama transformatora (slika 10) sadržani su u datoteci `trafoi.xml` koja ima sledeću strukturu:



Slika 10: Struktura datoteke `trafoi.xml`

Potrebni prognozirani podaci (slika 11) o uslovima okoline od trenutka u kome se vrši proračun za transformatore sadržani su u datoteci buducnost\_okoline.xml koja ima sledeću strukturu:



Slika 11: Struktura datoteke buducnost\_okoline.xml

Ova datoteka kreira se za izabrane početne parametre i popunjava iz table *PMOT\_merenja*.

## 8 ZAKLJUČAK

U ovom radu opisani su način implementacije i funkcionalnosti prototipske aplikacije za proračun mogućnosti opterećenja transformatora. Aplikacija je razvijana kao tehničko rešenje u okviru projekta *Unapređenje aplikacija za proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda i transformatora i njihova integracija sa mrežnim aplikacijama u real-time i studijskom režimu* Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Razvijena prototipska aplikacija opisanog tehničkog rešenja uspešno je demonstrirana u AD Elektromreža Srbije (EMS). Aplikacija je prikazana i testirana u studijskom režimu rada.

Dinamička procena mogućnosti opterećenja transformatora je bitna za osiguranje okvira rada transformatora, da bi mogli da podnesu različite uslove opterećenja bez ugrožavanja performansi ili bezbednosti. Preciznom procenom i prilagođavanjem opterećenja transformatora, kao odgovor na fluktuacije tokova snage u realnom vremenu, moguće je optimizovati efikasnost, sprečiti pregrevanje i produžiti životni vek opreme, uz povećanje pouzdanosti i stabilnosti upravljanja elektroenergetskim sistemom.

U prethodnom periodu razvijena je i testirana prototipska aplikacija za proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda u sklopu istog tehničkog rešenja. U narednom periodu planirana je integracija ovih aplikacija sa mrežnom aplikacijom za dispečerske tokove snaga (Dispatcher Power Flow - DPF). Ovom integracijom biće omogućena analiza različitih scenarija i nepredviđenih okolnosti, kao i osetljivost posmatranih oblasti elektroenergetskog sistema na različite uticaje mogućeg opterećenja transformatora i dalekovoda. Takođe, shodno primedbama i predlozima potencijalnih korisnika ovog sistema, planira se dalji razvoj aplikacije za opterećenje transformatora.

## 9 LITERATURA

- [1] P. Lučić, M. Stojić, G. Jakupović, S. Krstonijević, T. Jelić, „Aplikacija za proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda“, 36. savetovanje CIGRE SRBIJA, Zlatibor, 2023.
- [2] T. Sajdl, G. Jakupović, N. Čukalevski, S. Krstonijević, S. Cvetičanin, M Pavlović, Z. Nedeljković „Aplikacije za proračun mogućnosti opterećenja transformatora i dalekovoda“, 26. savetovanje JUKO CIGRE, Teslić, BiH 2003.
- [3] T. Sajdl, G. Jakupović, N. Čukalevski, S. Krstonijević, S. Cvetičanin, N. Damjanović, „Aplikacije za pomoć u odlučivanju pri eksploataciji transformatora i dalekovoda EES“, XLVII Konferencija ETRAN, Herceg Novi-Igalo, 2003.
- [4] S. Krstonijević, N. Čukalevski, G. Jakupović, S. Cvetičanin, N. Damjanović, „Real-time transmission elements dynamic loading applications for system operation reliability improvement“, 5. советување МАКО CIGRE, Ohrid, 2007.
- [5] S. Krstonijević, N. Čukalevski, G. Jakupović, S. Cvetičanin, „Dynamic Rating of Overhead Lines for Real-Time Network Control and Market Support“, DEMSEE 2013, 8<sup>th</sup> International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South-Eastern Europe, Cavtat, Croatia, 2013.
- [6] G. Swift, T. S. Molinski and W. Lehn, „A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. Theory and equivalent circuit“, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 2, pp. 171-175, April 2001, doi: 10.1109/61.915478.
- [7] IEC 60076-7:2018 ED2, „Power transformers - Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers“, 2018.
- [8] G. Jakupović, T. Stojanović, M. Stojić, T. Vračarić, A. Mihajlov, N. Čukalevski, N. Radnović, „Razvoj nove integrisane verzije SCADA/EMS/DMS programskih paketa“, III SAVJETOVANJE CG KO CIGRE, Hotel Maestral, Pržno, Crna Gora, 13. - 16.05.2013.

### APPLICATION FOR DYNAMIC TRANSFORMER RATING CALCULATION

PAVLE LUČIĆ, MILOŠ STOJIĆ, GORAN JAKUPOVIĆ,  
SOVJETKA KRSTONIJEVIĆ

MIHAJLO PUPIN INSTITUTE – IMP AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS

BELGRADE

SERBIA

*Abstract* — The application for Dynamic Transformer Rating (DTR) enables the assessment of the possible current load of individual power transformers, with the aim of their more efficient use as part of the power system management planning. The application is based on the thermal model of the transformer. The basic function of the application is to calculate the values and duration of possible loads in relation to the cooling oil temperature limit for the assumed load conditions of the transformer in the future. The application provides an insight into the real temperature state of the transformer and, through the user interface, enables the assessment of overload for the future time period of interest. The input data for the calculation is taken from the configuration files generated from the Application Database (ABP). The results of the calculation are available to the user through a graphical interface, in XML output files and in the form of a report on the performed calculation. The application offers two



**operating modes: calculation of the maximum allowed current for a given time period and calculation of the transformer temperature for a given time period and a given current. The application was developed in tandem with the Application for Dynamic Line Rating (PMDV). Their joint integration with the Application for Dispatcher Power Flow (DPF) is planned. In the study mode, it will be possible to perform "what-if" analysis on the possibility of utilization and overloading of transmission lines and transformers in operating modes obtained on the basis of assumed future switching states in the network and other parameters set in the DPF application. In this paper we present the basics of the used mathematical model, the system architecture, the aspects of software implementation and, finally, the directions of further development.**

***Key words* — Dynamic Transformer Rating, Transformer thermal model, Dispatcher Power Flow**

**APLIKACIJA ZA PRORAČUN MOGUĆNOSTI OPTEREĆENJA  
TRANSFORMATORA**

**APPLICATION FOR DYNAMIC TRANSFORMER RATING CALCULATION**

**PAVLE LUČIĆ, MILOŠ STOJIĆ, GORAN JAKUPOVIĆ,  
SOVJETKA KRSTONIJEVIĆ  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN – IMP AUTOMATIKA**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj — Aplikacija za proračun mogućnosti opterećenja transformatora (PMOT) omogućava sagledavanje mogućeg strujnog opterećivanja pojedinih transformatora, sa ciljem njihove efikasnije upotrebe u sklopu planiranja upravljanja elektroenergetskim sistemom. Aplikacija se bazira na termičkom modelu transformatora. Osnovna funkcija aplikacije je da, za pretpostavljene uslove opterećivanja transformatora u budućnosti, računa vrednosti i trajanje mogućih opterećenja u odnosu na ograničenje temperature rashladnog ulja. Aplikacija pruža uvid u realno temperaturno stanje transformatora i putem korisničkog interfejsa omogućava procenu preopterećenja za budući vremenski period od interesa. Ulazni podaci za proračun preuzimaju se iz konfiguracionih datoteka generisanih iz Aplikativne baze podataka (ABP). Rezultati proračuna dostupni su korisniku putem grafičkog interfejsa, u XML izlaznim datotekama i u obliku izveštaja o izvršenom proračunu. Aplikacija nudi dva režima rada: proračun maksimalne dozvoljene struje za zadati vremenski period i proračun temperature transformatora za zadati vremenski period i zadatu struju. Aplikacija je razvijana u tandemu sa Aplikacijom za proračun mogućnosti opterećenja dalekovoda (PMDV). Planirana je njihova zajednička integracija sa Aplikacijom za dispečerske tokove snaga (DPF). U studijskom režimu biće omogućene „what-if“ analize o mogućnosti iskorišćenja i preopterećenja dalekovoda i transformatora u režimima rada koji se dobijaju na bazi pretpostavljenih budućih uklopnih stanja u mreži i drugih parametara koji se zadaju u aplikaciji DPF. U ovom radu biće date osnove korišćenog matematičkog modela, prikaz arhitekture sistema, aspekti softverske implementacije i, na kraju, pravci daljeg razvoja.*

**Ključne reči — opterećenje transformatora, termički model transformatora, dispečerski tokovi snaga**



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.067J](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.067J)

C2 04

## **SIMULATOR I IMPLEMENTACIJA GRUPNOG REGULATORA REAKTIVNE SNAGE HIDROELEKTRANE ĐERDAP 1**

**MILAN JOSIFOVIĆ, GORAN JAKUPOVIĆ, MILAN BJEDOV, ŽELJKO  
DAMLJANOVIĆ, NIKOLA VASILJEVIĆ, NINEL ČUKALEVSKI  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN**

**VLADAN GEMALJEVIĆ  
GEMA PLC CONTROL**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* - U ovom radu je prvo opisan softverski simulator rada grupnog regulatora reaktivne snage (GRRS) elektrane, realizovan u MATLAB/Simulink okruženju. Simulator je razvijen u cilju verifikacije algoritma pre realne implementacije na HE Djerdap 1. Na početku je dat kratak opis funkcija GRRS elektrane koji obavlja raspodelu zahtevane proizvodnje reaktivne snage elektrane na agregate angažovane u višeagregatnim elektranama. Referenca (zahtev) se zadaje kao reaktivna snaga ili željeni napon na sabirnici. Zatim je opisana funkcija grupnog regulatora koja je zadužena za održavanje statizma reaktivne snage elektrane u zavisnosti od napona. Posebna pažnja usmerena je na podešavanje karakteristike i granica statizma reaktivne snage u zavisnosti od napona postrojenja i mogućnost zadavanja referenci od strane operatora elektrane ili iz udaljenog centra. U radu je predstavljen specifičan način rada GRRS elektrane sa smanjenim brojem agregata koji se mogu uvesti/ukloniti iz zajedničkog upravljanja grupnog regulatora, dok će agregati povezani na razdvojene sabirnice raditi nezavisno. Zatim su prikazani struktura simulatora kao i deo dobijenih rezultata simulacije. Na kraju je dat prikaz arhitekture implementiranog sistema, kao i rezultati testiranja na realnom sistemu (na objektu HE Đerdap 1).

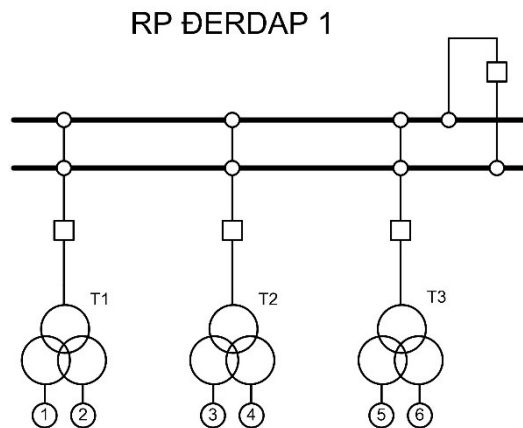
*Ključne reči* — naponsko-reaktivna regulacija, GRRS, simulacija, naponsko-reaktivna karakteristika

## 1 UVOD

U radu je predstavljen grupni regulator reaktivne snage elektrane (GRRS), čija je uloga da vrši grupnu regulaciju reaktivne snage u višeagregatnim elektranama. Osnovne funkcionalnosti koje poseduje grupni regulator su [1]:

- Automatska raspodela proizvodnje reaktivne snage agregata angažovanih u zajedničkom upravljanju.
- Automatska regulacija napona sabirnice unutar unapred definisanih granica, održavanjem statizma regulacije napona  $\Delta U/\Delta Q$  (sa podesivim gornjim i donjim granicama) i karakteristike statizma.
- Daljinsko i lokalno podešavanje karakteristike statizma reaktivne snage u zavisnosti od napona na visokonaponskoj strani blok transformatora.

Mogu se uvesti ili ukloniti agregati iz zajedničkog upravljanja sa komandne table agregata ili daljinski sa korisničkog interfejsa GRRS pri čemu se agregatima povezanim na različite sabirnice (npr. I ili II) upravlja nezavisno.



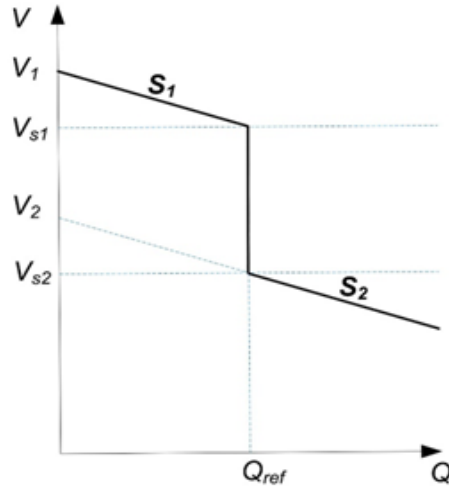
HE ĐERDAP 1  
*Slika 1 Jednopolna šema postrojenja*

### 1.1 Upravljanje reaktivnom snagom

Upravljanje reaktivnom snagom na sabirnici moguće je na dva načina iz centralne komande elektrane i daljinski iz nadređenog dispečerskog centra [2].

Kod upravljanja iz centralne komande elektrane je omogućeno:

- uključivanje/isključivanje grupnog regulatora reaktivne snage
- uključivanje/isključivanje agregata u zajednički rad
- podešavanje karakteristike statizma (Slika 2) - željenog pada reaktivne snage u zavisnosti od napona, odnosno podešavanje osnovnih parametara, kao što su:
  - gornji nivo napona na visokonaponskoj strani blok transformatora povezanih na sabirnicu - Vs1
  - statizam gornjeg nivoa napona sabirnice po reaktivnom opterećenju S1
  - reaktivno opterećenje dela agregata povezanih na sistem sabirnica
  - donji nivo napona na visokonaponskoj strani blok transformatora povezanih na sistem sabirnica - Vs2
  - statizam donjeg nivoa napona elektrane po reaktivnom opterećenju S2



Slika 2 „Vs-Qe-Vs” Statička karakteristika

Svaka grupa agregata može se tretirati kao jedna jedinica sa unapred podešenom statičkom karakteristikom „Vs-Qe-Vs” koja zavisi od napona kao što je prikazano na Slika 2 [3]. Kada je odgovarajući napon sabirnice unutar unapred podešenih granica ( $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$ ) izlazna reaktivna snaga se reguliše tako da odgovara dodeljenoj reaktivnoj snazi  $Q_{ref}$ . U slučajevima kada je napon na visokonaponskoj strani blok transformatora izvan unapred postavljenih granica, referenca grupe reaktivne snage se menja u skladu sa jednačinom (1)..

$$Q_{refAdj,j} = \begin{cases} Q_{ref,j} - \frac{100[\%]}{S_1[\%]}(V - V_{s1}) & \text{za } V_j > V_{s1} \\ Q_{ref,j} & \text{za } V_{s2} \leq V_j \leq V_{s1} \\ Q_{ref,j} - \frac{100[\%]}{S_2[\%]}(V - V_{s2}) & \text{za } V_j < V_{s2} \end{cases} \quad (1)$$

$Q_{ref}$  je sračunata reaktivna snaga za grupu agregata na istoj sabirnici.

U slučaju da je “Vs-Qe-Vs” regulacija isključena važi jednakost:  $Q_{refAdj,j} = Q_{ref,j}$

Upravljanje iz daljinski nadređenog dispečerskog centra, uključuje samo funkciju zadavanja željene vrednosti reaktivne snage ili napona na visokonaponskoj strani blok transformatora postrojenja/sabirnica.

## 1.2 Režimi rada GRRS

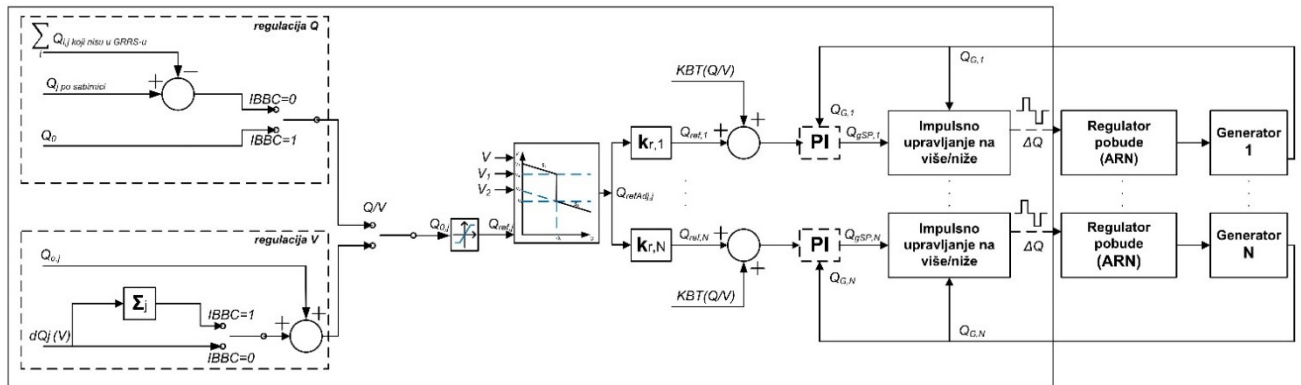
Grupni regulator reaktivne snage ima sledeće režime rada:

- Sekundarni režim regulacije - režim u kojem se ukupna potrebna reaktivna snaga elektrane/sabirnice podešava iz nadređenog (daljinskog) upravljačkog centra.
- Lokalni režim regulacije - režim u kojem se ukupna potrebna reaktivna snaga elektrane/sabirnice zadaje preko grupnog regulatora u lokalu.
- Režim nadzora (monitoringa) - GRRS samo izračunava greške regulacije i potrebne snage agregata, ali se komanda ne šalje na agregate.
- Suspendovani režim - režim u kojem se ne računa greška od strane GRRS-a i ne šalje komanda automatskom regulatoru napona (ARN).

## 2 ALGORITAM GRUPNOG REGULATORA REAKTIVNE SNAGE

### 2.1 Pregled regulatora

Pojednostavljena blok šema grupnog regulatora reaktivne snage namenjena za jedan sistem sabirnica je prikazana na Slika 3 [6].



Slika 3 Strukturna šema grupnog regulatora reaktivne snage (GRRS)

Na slici su izdvojene dve grupacije referenci:

- regulacija po reaktivnoj snazi
- regulacija po naponu.

Pored izbora veličine koja se reguliše, u zavisnosti da li su sistemi sabirnica razdvojeni (signal IBBC), vrši se regulacija izabrane veličine cele elektrane ili pojedinačnih sistema sabirnica.

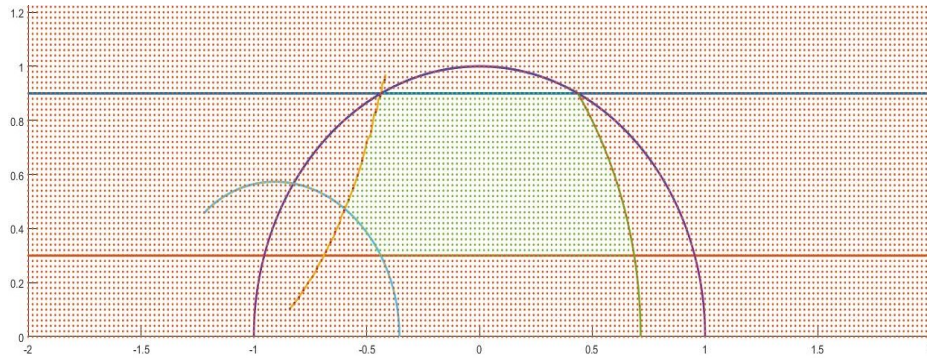
Simboli na Slika 3 su:

- $Q_0$  - zadata reaktivna snaga za agregate koji su u GRRS-u (potražnja za sve agregate QL umanjena za stvarne vrednosti reaktivne snage agregata koji nisu u grupnoj regulaciji) [Mvar].
- $Q_j$  po sabirnici - zahtevana reaktivna snaga za sve agregate vezane za j-ti sistem sabirnica (j je {1,2}) [Mvar].
- $Q_{i,j}$  koji nisu u GRRS-u - suma reaktivnih snaga generatorskih jedinica koje nisu uključene u grupnu regulaciju.
- $Q_{0,j}$  - zahtevana reaktivna snaga za grupu agregata vezanih za j-ti sistem sabirnica i koji su angažovani u GRRS-u (j je {1,2}) [Mvar].
- $Q_{ref,j}$  - zadata vrednost/referenca reaktivne snage za grupu agregata posle limitera (j je {1,2}) [Mvar].
- $Q_{refAdj,j}$  - zadata vrednost/referenca reaktivne snage za grupu agregata posle "Vs-Qe-Vs" (j je {1,2}) [Mvar].
- $Q_{G,i}$  - merenje reaktivne snage i-tog agregata (i je {1,2,3,4,5,6}). [Mvar].
- $k_{r,i}$  - faktor učešća i-tog agregata u grupi (i je {1,2,3,4,5,6}).
- $Q_{ref,i}$  - referenca za i-ti agregat u grupi (i je {1,2,3,4,5,6}).
- $Q_{gSP,i}$  - zadata vrednost/referenca reaktivne snage za regulator pobude i-tog agregata.
- $dQ_j(V)$  - promena reaktivne snage na gore/na dole za j-ti sistem sabirnica.
- $KBT(Q/V)$  – gubici u blok transformatoru i sopstvena potrošnja.

Zbog uticaja HE Djerdap 1 na stabilnost elektroenergetskog sistema Srbije, neophodan je robustan sistem upravljanja. U režimu regulacije napona nisu korišćene matrice osetljivosti sistema pri zadavanju reference, koje se mogu naći u algoritmima GRRS u drugim rešenjima [4]. Zadavanje reference je rešeno iterativnim algoritmom koji inkrementalnim promenama reaktivne snage održava napon. Odnosno kod regulacije napona za sabirnice, šalju se zahtevi za povećanje/smanjenje reaktivne snage, a regulator prati trenutnu vrednost napona i upoređuje je sa zadatom. Kada ta razlika postane dovoljno mala, regulator obustavlja slanje zahteva za promenu reference.

## 2.2 Proračun granica za reaktivnu snagu

Vrednosti maksimalne reaktivne snage agregata  $Q_{MAX,i}$  i minimalne reaktivne snage agregata  $Q_{MIN,i}$  se mogu dobiti proračunom sa pogonskih dijagrama agregata ili se mogu zadati ručno od strane rukovaoca elektrane. Za proračun veličina  $Q_{MAX,i}$  i  $Q_{MIN,i}$  sa pogonskih dijagrama, korišćiće se ulazni podaci iz look-up tabela, u kojima su vrednosti aktivnih snaga i napona agregata u definisanoj rezoluciji [7].



Slika 4 Pogonska karta hidroagregata

## 2.3 Raspodela reaktivne snage na agregate priključene na istu sabirnicu

Kada je potrebna reaktivna snaga pozitivna (tj. kada je smer snage ka mreži), alokacija se vrši proporcionalno maksimalno dozvoljenoj reaktivnoj snazi grupe agregata:

$$Q_{0,j} = \frac{\sum_{u \text{ istoj grupi}} Q_{MAX,m} I_{JQC,i}}{\sum_{svih \ u \ GRRS-u} Q_{MAX,n} I_{JQC,i}} \left( Q_{REF,**} - \sum_{k=\text{agregati koji nisu u GRRS-u}} Q_{G,k} (1 - I_{JQC,i}) \right) \quad (2)$$

Kada je potrebna reaktivna snaga negativna (tj. reaktivna snaga koju treba apsorbovati iz mreže), alokacija se vrši proporcionalno minimalno dozvoljenoj reaktivnoj snazi grupe agregata:

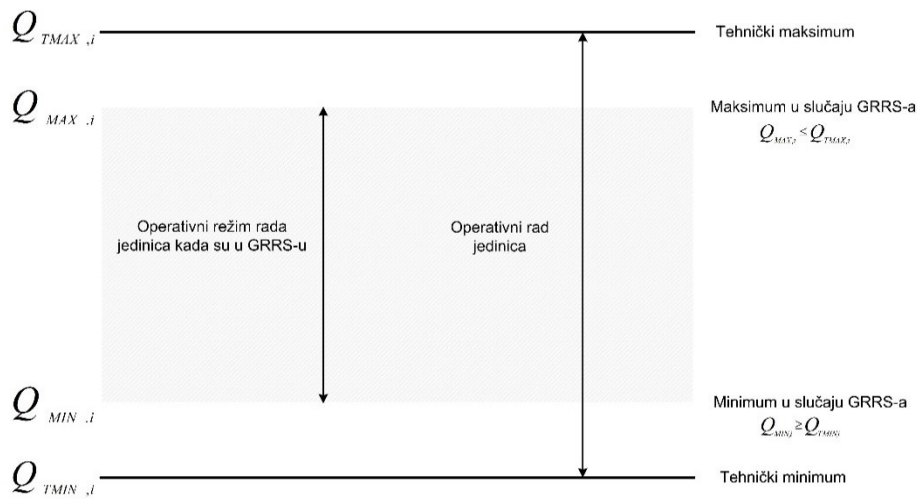
$$Q_{0,j} = \frac{\sum_{u \text{ istoj grupi}} Q_{MIN,m} I_{JQC,i}}{\sum_{svih \ u \ GRRS-u} Q_{MIN,n} I_{JQC,i}} \left( Q_{REF,**} - \sum_{k=\text{agregati koji nisu u GRRS-u}} Q_{G,k} (1 - I_{JQC,i}) \right) \quad (3)$$

- $Q_{REF,**}$  - predstavlja referencu setovanu u lokalu  $Q_{REF,loc}$  ili iz centra  $Q_{REF,cen}$
- Određivanje da li je agregat uključen u GRRS se vrši preko  $I_{JQC,i}$  (i je {1,2,3,4,5,6}).

- $\sum_k = \text{agregati koji nisu u GRRS-u } Q_{G,k}(1 - I_{JQC,i})$  - suma reaktivnih snaga agregata koji nisu uključeni u GRRS.
- $\sum_{u \text{ istoj grupi}} Q_{MAX,m} I_{JQC,i}$  - suma maksimalnih vrednosti reaktivnih snaga za agregate koji su u grupnoj regulaciji (GRRS) i vezani na istu sabirnicu j.
- $\sum_{svih \text{ u GRRS-u}} Q_{MAX,n} I_{JQC,i}$  - suma maksimalnih vrednosti reaktivnih snaga za sve agregate uključene GRRS.
- $\sum_{u \text{ istoj grupi}} Q_{MIN,m} I_{JQC,i}$  - suma minimalnih vrednosti reaktivnih snaga za agregate koji su u grupnoj regulaciji (GRRS) i vezani na isti sistem sabirnica j.
- $\sum_{svih \text{ u GRRS-u}} Q_{MIN,n} I_{JQC,i}$  - suma minimalnih vrednosti reaktivnih snaga za sve agregate uključene u GRRS.

## 2.4 Provera limita

Vrednost zadate reference reaktivne snage je ograničena sa ciljem da se spreči izdavanje zahteva van dozvoljenih granica.



Slika 5 Limitiranje ulazne reference

Nove referentne vrednosti nakon limitiranja su:

$$Q_{ref,j} = \begin{cases} \sum_{i=1}^N (I_{JQC,i} \cdot I_{BBj,i} \cdot Q_{MAX,i}) & ; \text{kada je } Q_{0,j} > \sum_{i=1}^N (I_{JQC,i} \cdot I_{BBj,i} \cdot Q_{MAX,i}) \\ Q_{0,j} & ; \text{kada je } \sum_{i=1}^N (I_{JQC,i} \cdot I_{BBj,i} \cdot Q_{MIN,i}) \leq Q_{0,j} \leq \sum_{i=1}^N (I_{JQC,i} \cdot I_{BBj,i} \cdot Q_{MAX,i}) \\ \sum_{i=1}^N (I_{JQC,i} \cdot I_{BBj,i} \cdot Q_{MIN,i}) & ; \text{kada je } Q_{0,j} < \sum_{i=1}^N (I_{JQC,i} \cdot I_{BBj,i} \cdot Q_{MIN,i}) \end{cases} \quad (4)$$



## 2.5 Alokacija reaktivne snage na određene agregate pod grupnom regulacijom

Reaktivna snaga se raspodeljuje na pojedine agregate koji pripadaju grupi agregata povezanih na isti sistem sabirnica.

Kada je potrebna reaktivna snaga pozitivna, alokacija se vrši proporcionalno maksimalno dozvoljenoj reaktivnoj snazi agregata:

$$k_{r,i} = \frac{Q_{MAX,i}}{\sum_k (\text{agregati u grupi } j) Q_{MAX,k}} \quad \text{za } Q_{0,j} > 0 \quad (5)$$

Kada je potrebna reaktivna snaga negativna, alokacija se vrši proporcionalno minimalno dozvoljenoj reaktivnoj snazi agregata:

$$k_{r,i} = \frac{Q_{MIN,i}}{\sum_k (\text{agregati u grupi } j) Q_{MIN,k}} \quad \text{za } Q_{0,j} < 0 \quad (6)$$

Zatim se izračunavaju konačne reference agregata:

$$Q_{REF,i} = k_{r,i} Q_{refAdj,j} \quad (7)$$

## 3. REZULTATI SIMULACIJE

U razvijenom simulatoru je omogućeno definisanje stanja svih prekidača, što je preduslov za proračun sledećih veličina/signala:

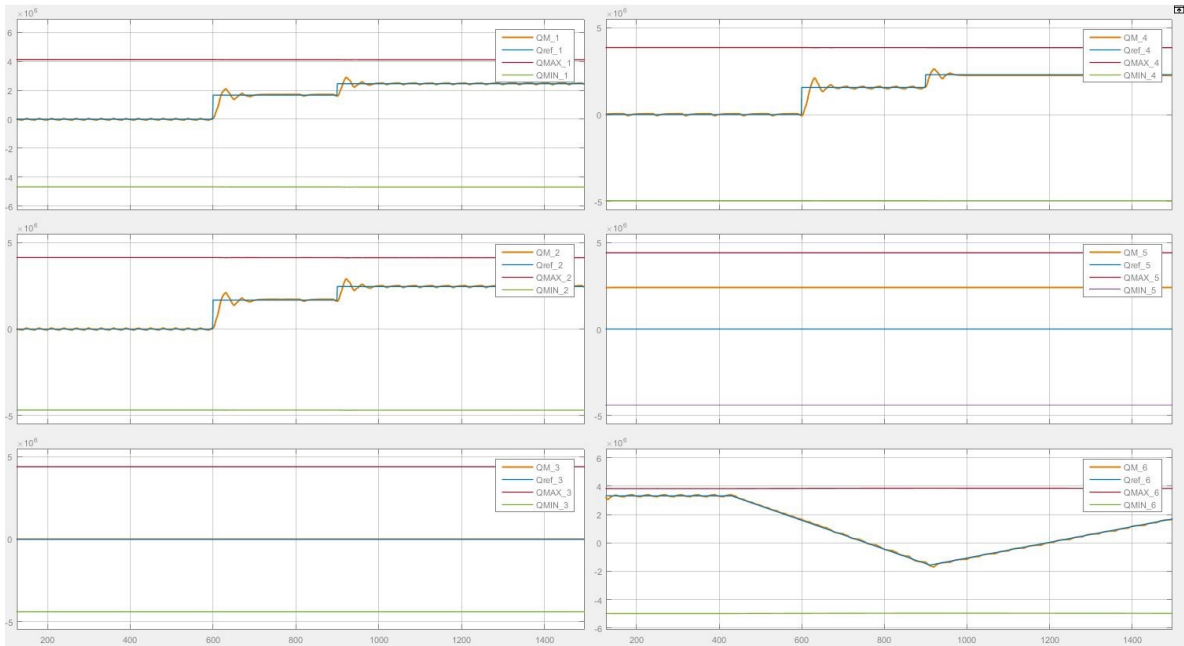
- Povezanost agregata na mrežu
- Sistem sabirnica na koje je agregat povezan
- Povezanost sistema sabirnica, tj. status prekidača u spojnom polju

Ostali neophodni signali/veličine su:

- Režim rada GRRS
- Uključenost agregata u grupnu regulaciju (IJQC)
- Izbor veličine kojom se upravlja na VN strani sistema sabirnica (Q ili V)

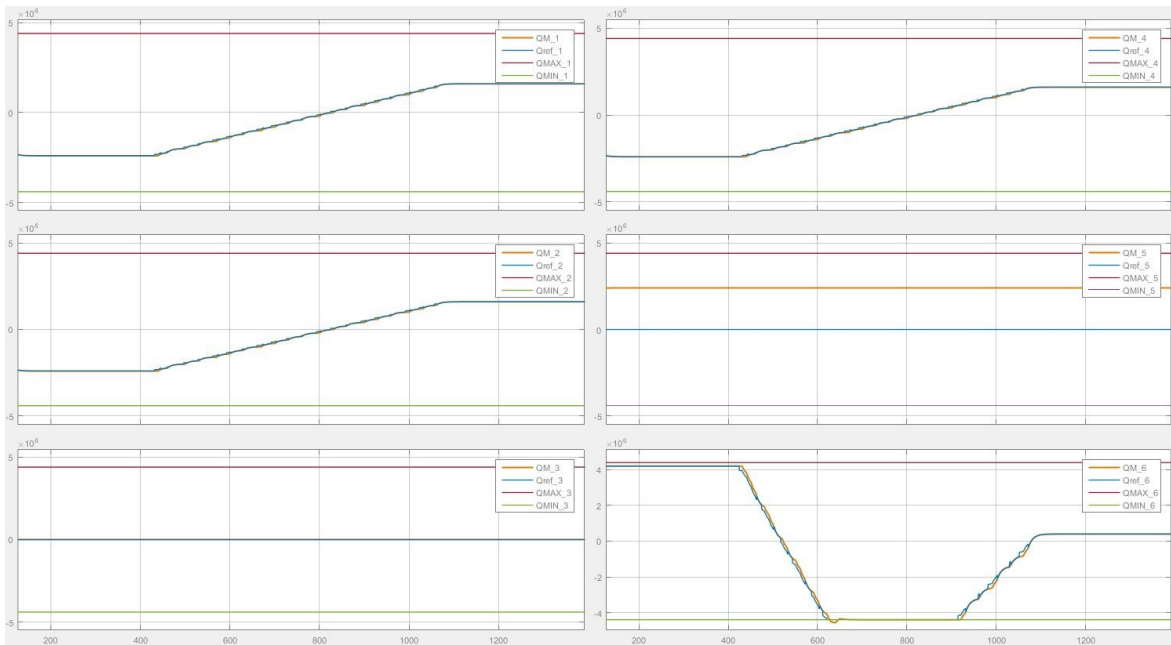
Prikazani su rezultati tri slučaja (Slika 6, Slika 7, Slika 8), u kojima važi da su agregati 1,2,4 i 6 uključeni u grupnu regulaciju; gde su na prvi sistem sabirnica vezani agregati 1,2,3 i 4, a na drugi agregati 5 i 6:

1. Na grafiku (Slika 6) su prikazane injektirane reaktivne snage agregata na visokonaponskoj strani blok transformatora. U datom slučaju su razdvojeni sistemi sabirnica i vrši se upravljanje reaktivnom snagom grupe agregata 1,2,4 i 6.



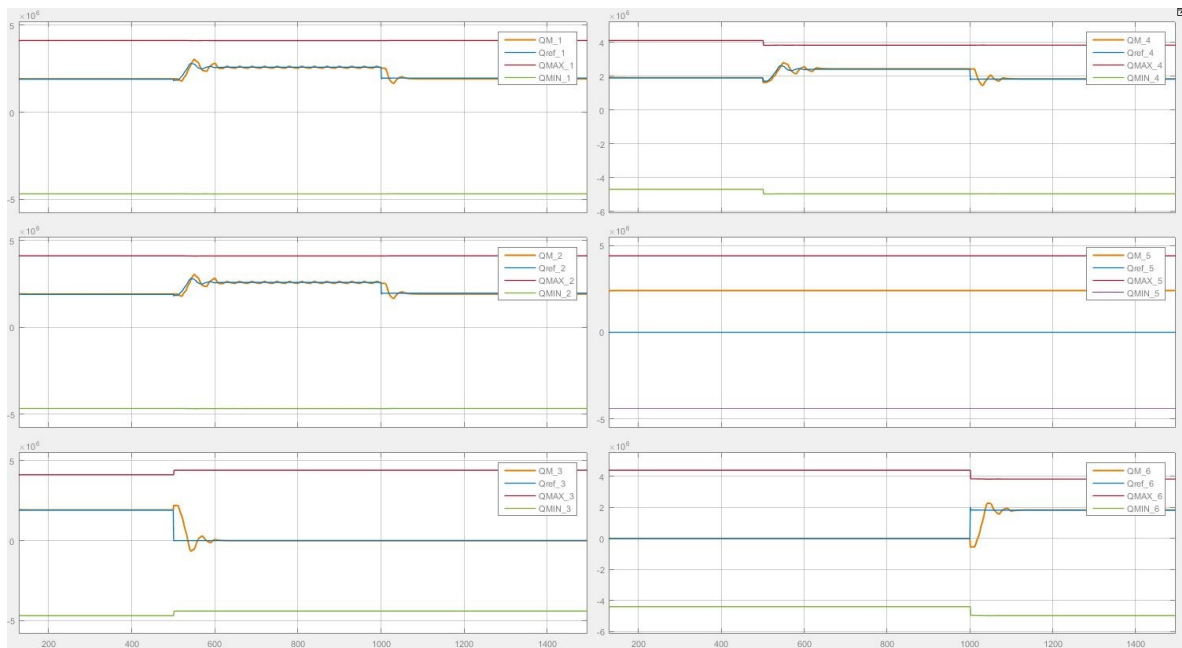
*Slika 6 Upravljanje reaktivnom snagom*

2. U drugom slučaju su na grafiku (Slika 7) prikazane reaktivne snage agregata na visokonaponskoj strani blok transformatora. U datom slučaju su razdvojeni sistemi sabirnica i vrši se upravljanje naponom na visokonaponskoj strani blok transformatora na sabirnicama, gde se uočava da je agregat 6 na granici maksimalne dozvoljene reaktivne snage koja je dozvoljena za preuzimanje iz mreže.



*Slika 7 Upravljanje naponima*

3. U trećem slučaju je zadata referenca reaktivne snage za celu elektranu, pri čemu se u 500-toj sekundi isključuje agregat 3, dok se u 1000-toj sekundi uključuje agregat 6. (Slika 8)

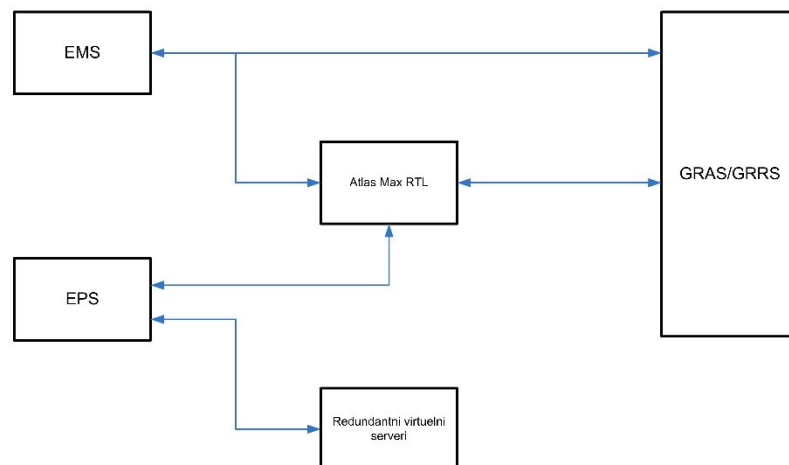


Slika 8 Isključenje/uključenje agregata

## 4. IMPLEMENTACIJA

### 4.1 Arhitektura sistema

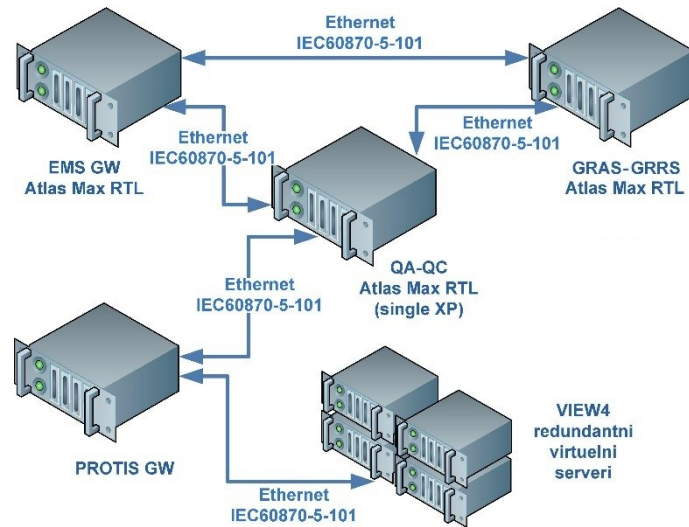
GRRS je implementiran na računarskoj platformi već postojećeg GRAS-a (Grupni Regulator Aktivne Snage) Slika 9. Ostali entiteti koji učestvuju u komunikacionom sistemu su Elektromreže Srbija (EMS), sistem Proizvodno Tehničkog Informatičkog Sistema EPS-a (PROTIS), Daljinska stanica tipa Atlas Max-RTL sa odgovarajućim ulazno-izlaznim modulima iz Atlas familije (IMP) [5].



Slika 9 Struktura sistema u kojem je implementiran GRRS

Komunikacija (DC EMS i DC EPS) sa elektranama se obezbeđuje preko jedinstvene tačke pristupa – RTU gateway na elektrani, koji se povezuje sa ostalim sistemima upravljanja i akvizicije elektrane u cilju prikupljanja neophodne telemetrije. Koriste se postojeći gateway uređaji kojima se pristupa po zasebnom logičkom komunikacionom putu [8].

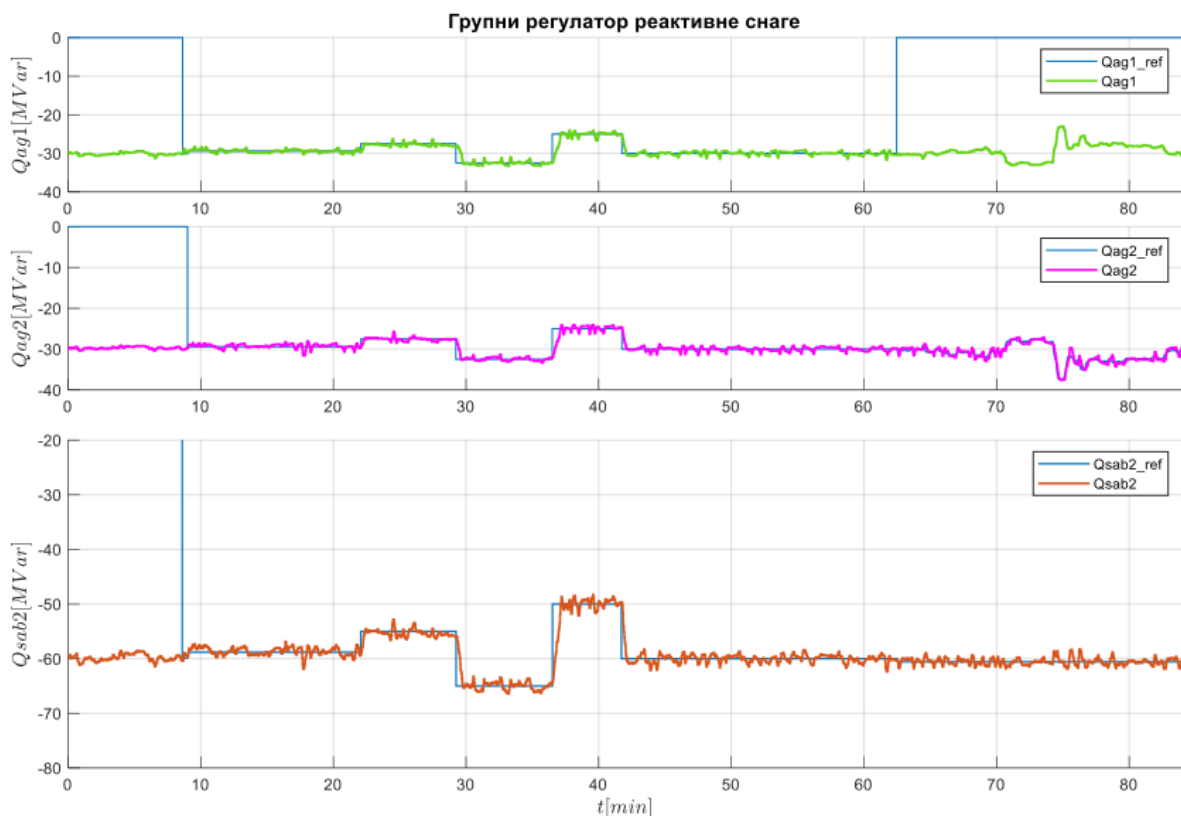
Infrastruktura daljinskog upravljanja objektom HE Đerdap 1 iz sistema Elektromreže Srbija (AGC EMS) i sistema Proizvodno Tehničkog Informacionog Sistema EPS-a (PROTIS) prikazana je na Slika 10 [8].



Slika 10 Infrastruktura daljinskog upravljanja objektom HE Đerdap 1

## 4.2 Testiranje rada GRRS-a

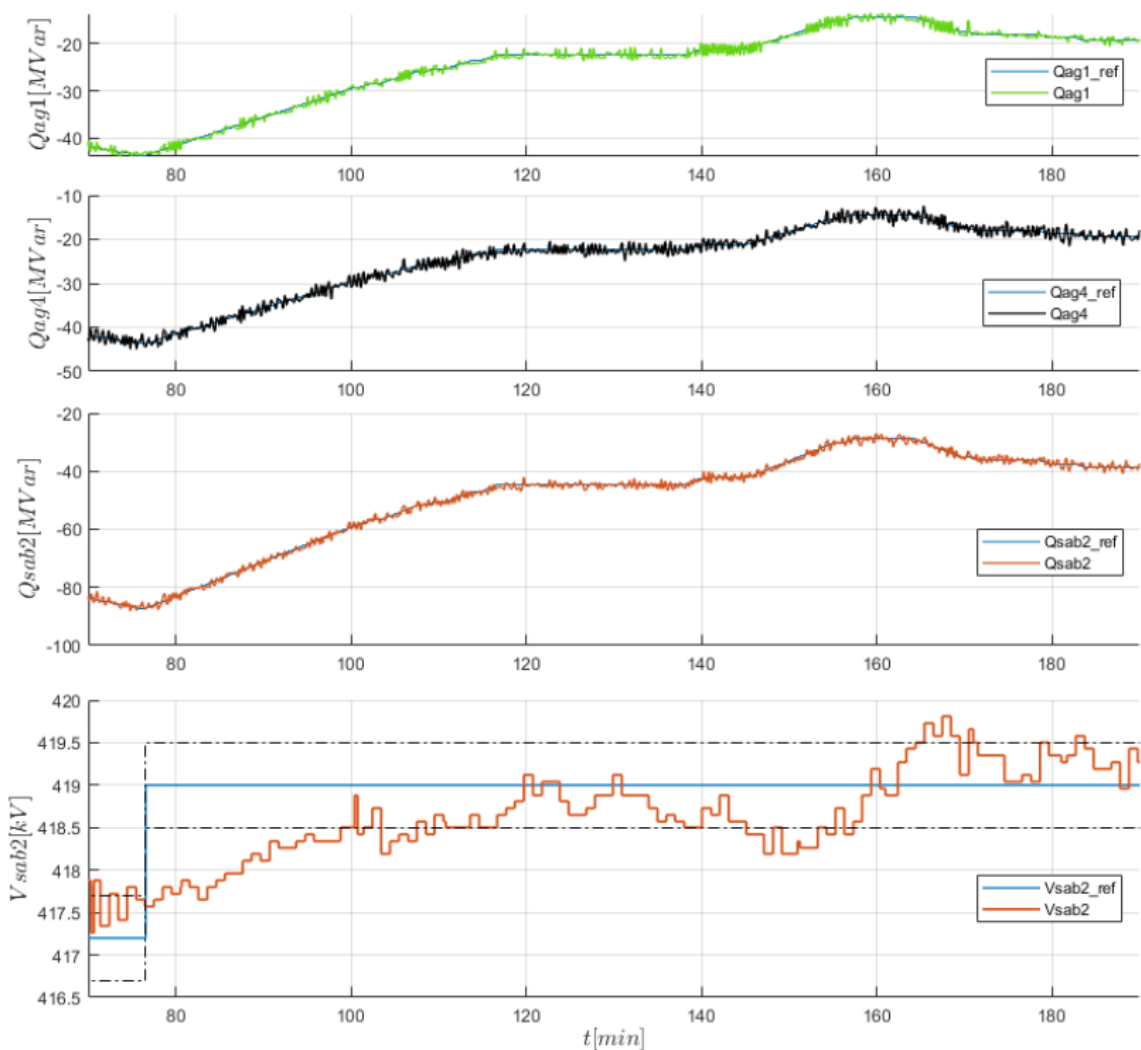
Primarno su izvršena testiranja odziva reaktivnih snaga pojedinačnih agregata za različite povorke impulsa u cilju dobijanja zadovoljavajućih odziva. Zatim je izvršena filtracija merenja reaktivnih snaga pojedinačnih agregata. Na Slici 11 prikazana je funkcionalnost grupnog regulatora reaktivne snage za regulaciju ukupne reaktivne snage na sabirnicama 2 400kV.



Slika 11 Regulacija reaktivne snage na sabirnici br. 2

Oko osmog minuta je trenutak uključenja GRRS-a, a zatim uključivanje prvog i drugog agregata u grupnu regulaciju reaktivne snage. Na slici je prikazana zadata referenca ukupne reaktivne snage za sabirnicu 2 ( $Q_{sab2\_ref}$ ), odziv ukupne reaktivne snage ( $Q_{sab2}$ ), raspodela željene snage na agregate ( $Q_{ag1\_ref1}$  i  $Q_{ag2\_ref2}$ ), odziv reaktivnih snaga po agregatima ( $Q_{ag1}$  i  $Q_{ag2}$ ). U ~63 minutu možemo videti izbacivanje agregata 1 iz grupne regulacije, dok agregat 2 nastavlja da prati zadatu referencu ukupne reaktivne snage za sabirnicu 2.

Na Slici 12 prikazan je test funkcionalnosti grupnog regulatora u režimu regulacije napona. Zbog velike krutosti sistema i malog broja agregata u grupnoj regulaciji (male reaktivne rezerve) nije bilo mogućnosti da se zada veće odstupanje napona od trenutne izmerene. Napon ( $V_{sab2}$ ) se održava u mrtvoj zoni od 0.5kV. Izlaskom iz ove mrtve zone povećava/smanjuje se potreba za reaktivnom snagom na sabirnici 2 ( $Q_{sab2}$ ) i nakon toga se raspodeljuje po agregatima koji su uključeni u grupnu regulaciju.



Slika 12 Grupni regulator u modu regulacije napona na sabirnici 2

## 5. ZAKLJUČAK

Razvoj elektroenergetske mreže i liberalizacija tržišta električne energije imaju značajan uticaj na naponske nivoe elektroenergetskih sistema. U slučaju visokonaponske mreže u Srbiji, trenutno se suočavamo sa problemom previsokih napona. Ovo stanje predstavlja pretnju za

opremu, stoga je neophodno regulisati tokove reaktivnih snaga u mreži. Jedno od rešenja za ovaj problem su grupni regulatori reaktivnih snaga na elektranama.

U skladu s tim, razvijen je simulator GRRS koji predstavlja alat za simulaciju i testiranje upravljanja reaktivnom snagom elektrane, što smanjuje vreme i povećava kvalitet implementacije. Adekvatno upravljanje naponima i reaktivnom snagom elektrane uz pomoć GRRS ima značajnu ulogu u očuvanju stabilnosti elektroenergetskog sistema u Srbiji. Smanjenje previsokih napona smanjuje rizik od oštećenja opreme i potencijalnih prekida u snabdevanju električnom energijom. Osim toga, pravilno upravljanje reaktivnom snagom omogućava optimalno korišćenje resursa i smanjenje gubitaka električne energije.

## LITERATURA

- [1] Goran Jakupović, Tomislav Sajdl, Ninel Čukalevski, Mihailo Hadži-Ristić, Perica Krstić, "Digitalni grupni regulatori aktivne i reaktivne snage HE Perućica", Zbornik radova 11. Simpozijuma Upravljanje i Telekomunikacije u Elektroenergetskom Sistemu, Herceg-Novi 21-24. maj 2002, Ref. br. IV-11
- [2] Goran Jakupović, Tomislav Sajdl, "Razvoj i implementacija grupnih regulatora aktivne i reaktivne snage HE Perućica", Zbornik radova XLVI konferencije ETRAN, Banja Vrućica, 3-6 juna 2002., str. 255-258
- [3] Milan S. Čalović "Regulacija elektroenergetskih sistema Tom 2 – Regulacija napona i reaktivnih snaga", Beograd 1997.
- [4] Jasna Dragosavac, Žarko Janda, Tomislav Gajić, Sava Dobričić, Jelena Pavlović, Dušan Arnautović, "Grupna regulacija pobude i reaktivnih snaga u elektrani", Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"
- [5] Goran Jakupović, Ninel Čukalevski, Milan Bjedov, Ognjen Ristić, Mihajlo Stojanović, Nebojša Panjevac, Karl Hofmann, Boris Jovanović, Dušan Trišić, „Implementacija grupnih regulatora aktivne i reaktivne snage na HE Bajina Bašta“, 31. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 26-30. maj 2013.
- [6] Goran Jakupović, Ninel Čukalevski, Milan Bjedov, Ognjen Ristić, Mihajlo Stojanović, Nebojša Panjevac, Milisav Bogdanović, „HYDRO POWER PLANT JOINT/GROUP CONTROL SYSTEM SOLUTION“ – Invited paper, International Conference "Power Plants 2014", 28-31st October 2014, Zlatibor, Serbia
- [7] J. Dragosavac, Ž. Janda, D. Arnautović, T. Gajić, S. Dobričić, J. V. Milanović, S. Subotić, B. Mihić, "Real time synchronous generator dynamic reactive reserve monitoring by coordinated reactive power voltage controller“, CIGRED, Časopis udruženja, Beograd, Srbija, januar – jun 2016.
- [8] Tamara Jelić, Gordan Konečni, Predrag Ilić, Goran Jakupović Zlatko Mitrović, Miodrag Vulić, Dragan Surudžić, „Centralni dispečerski sistem (CDS) Elektroprivrede Srbije (EPS): Arhitektura sistema“, 31. savetovanje CIGRE Crna Gora, Budva, 09-12. maj 2023. Godine

# **SIMULATOR AND IMPLEMENTATION OF THE GROUP REACTIVE POWER REGULATOR FOR THE HYDROPOWER PLANT ĐERDAP 1**

**MILAN JOSIFOVIĆ, GORAN JAKUPOVIĆ, MILAN BJEDOV, ŽELJKO  
DAMLJANOVIĆ, NIKOLA VASILJEVIĆ, NINEL ČUKALEVSKI  
MIHAJLO PUPIN INSTITUTE**

**VLADAN GEMALJEVIĆ  
GEMA PLC CONTROL**

**BELGRADE**

**SERBIA**

*Abstract*— This paper first describes a software simulator for the operation of the Group Reactive Power Regulator (GRRS) for the power plant, implemented in the MATLAB/Simulink environment. The simulator was developed to verify the algorithm prior to its real implementation at the Djerdap 1 Hydropower Plant. An initial overview is provided of the functions of the GRRS, which distributes the required reactive power production among the generating units engaged in multi-unit power plants. The reference (requirement) can be set as either reactive power or the desired voltage at the bus. Next, the function of the group regulator, which is responsible for maintaining the stability of the reactive power of the plant depending on the voltage, is described. Special attention is focused on adjusting the characteristics and limits of reactive power stability based on the plant's voltage and the possibility of setting references by the plant operator or from a remote center. The paper presents a specific operating method of the GRRS with a reduced number of units that can be included or excluded from the common control of the group regulator, while units connected to separate buses operate independently. The structure of the simulator and a portion of the simulation results are then presented. Finally, an overview of the architecture of the implemented system is provided, along with the results of testing in the real system (at the Djerdap 1 facility).

*Key words* — voltage-reactive regulation, GRRS, simulation, voltage-reactive characteristic.

C2 04

**SIMULATOR I IMPLEMENTACIJA GRUPNOG REGULATORA REAKTIVNE  
SNAGE HIDROELEKTRANE ĐERDAP 1**

**SIMULATOR AND IMPLEMENTATION OF THE GROUP REACTIVE POWER  
REGULATOR FOR THE HYDROPOWER PLANT ĐERDAP 1**

**MILAN JOSIFOVIĆ, GORAN JAKUPOVIĆ, MILAN BJEDOV, ŽELJKO  
DAMLJANOVIĆ, NIKOLA VASILJEVIĆ, NINEL ČUKALEVSKI  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN**

**VLADAN GEMALJEVIĆ  
GEMA PLC CONTROL**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj - U ovom radu je prvo opisan algoritam koji je testiran u okviru softverskog simulatora rada grupnog regulatora reaktivne snage (GRRS) elektrane, realizovan u MATLAB/Simulink okruženju. Simulator je razvijen u cilju verifikacije algoritma pre realne implementacije na HE Djerdap 1. Na početku je dat kratak opis funkcija GRRS elektrane koji obavlja raspodelu zahtevane proizvodnje reaktivne snage elektrane ili zahtevanog napona na sabirnici na agregate angažovane u višeagregatnim elektranama. Referenca (zahtev) se zadaje kao reaktivna snaga ili željeni napon na sabirnici koji se dalje prosleđuje na obradu i raspodelu po agregatima koji su u tom trenutku uključeni u grupnu regulaciju na toj sabirnici. Zatim je opisana funkcija grupnog regulatora koja je zadužena za održavanje statizma reaktivne snage elektrane u zavisnosti od napona. Posebna pažnja usmerena je na podešavanje karakteristike i granica statizma reaktivne snage u zavisnosti od napona postrojenja i mogućnost zadavanja referenci od strane operatora elektrane ili iz udaljenog centra. U nastavku rada je dat i pregled regulatora u vidu pojednostavljene šeme grupnog regulatora za jedan sistem sabirnica sa pratećim opisima veličina. Takođe, objašnjena je raspodela snage po agregatima priključenih na istu sabirnicu, kao i provera limita. U radu je predstavljen specifičan način rada GRRS elektrane sa smanjenim brojem agregata koji se mogu uvesti/ukloniti iz zajedničkog upravljanja grupnog regulatora, dok će agregati povezani na razdvojene sabirnice raditi nezavisno. Zatim su prikazani struktura simulatora kao i deo dobijenih rezultata simulacije. Na kraju je dat prikaz arhitekture implementiranog sistema, kao i rezultati testiranja na realnom sistemu (na objektu HE Đerdap 1) u režimu rada regulacije reaktivne snage, kao i za režim regulacije napona.*

**Ključne reči – naponsko-reaktivna regulacija, GRRS, simulacija, naponsko-reaktivna karakteristika**





DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.081S](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.081S)

C2 05

## **PRIMENA GENETIČKOG ALGORITMA (GA) KOD IZBORA AGREGATA ZA PROIZVODNJU NA HE PERUĆICA**

**RADOMIR STAMATOVIĆ\*, DIPL.INŽ, GOJKO BLAGOJEVIĆ, DIPL.INŽ,  
PREDRAG ILIĆ, DIPL.INŽ, MILENA KRULJEVIĆ, DIPL.INŽ,  
MARIJA SAVIĆ, DIPL.INŽ.  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN-AUTOMATIKA, BEOGRAD, SRBIJA  
EPCG, AD NIKŠIĆ, NIKŠIĆ, CRNA GORA**

*Kratak sadržaj* - Zbog što boljeg iskorišćenja potencijala vode i obezbeđenja balansne rezerve za potrebe regulacije energetskog sistema, neophodno je optimalno isplanirati rad hidroelektrane.

Vrednosti proizvodnje hidroelektrane su zadate u definisanim vremenskim intervalima na osnovu kratkoročnog planiranja dobijenog optimizacijom proizvodnog miksa od balansno odgovorne strane, a poznati su i podaci o vodnim resursima i raspoloživosti agregata. Pri ovim uslovima treba predvideti optimalno korišćenje agregata i raspoložive količine vode iz akumulacija.

Kod HE sa više agregata, izbor agregata zavisi od gubitaka u cevovodima, mehaničkih gubitaka na turbinama, električnih gubitaka na generatorima itd. Cilj planiranja treba da bude optimalno korišćenje potencijala vode i korišćenja agregata, a rezultat optimizacije su protoci po agregatima i cevovodima, takvi da se obezbedi zadata proizvodnja hidroelektrane. Ovaj cilj je opisan ciljnom funkcijom, koja je definisana nelinearnom vezom više varijabli, u ovom slučaju stepena iskorišćenja i protoka svakog agregata ponaosob.

Dobijeni rezultati za protoke predstavljaju ulazne podatke za dalje planiranje, uglavnom za planiranje obezbeđivanja dovoljne količine vode u ulaznoj građevini, za proizvodnju elektrane a to praktično znači održavanje kote ulazne građevine u zatom opsegu.

U radu je prikazan postupak dobijanja i rešavanja ciljne funkcije pomoću genetičkog algoritma (GA), uz najjednostavnija ograničenja ulaznih varijabli. Princip genetičkog algoritma sastoji se iz procene, selekcije, ukrštanja i mutacije unutar jedne populacije. Kroz iterativan postupak ova četiri principa, kroz nekoliko generacija, dobija se rešenje ciljne funkcije.

---

\* Beograd, Volgina15, radomir.stamatovic@pupin.rs

***Ključne reči*—genetički algoritam, planiranje, generacija, populacija, hromozom, gen, hidroelektrana, agregat**

## **1 UVOD**

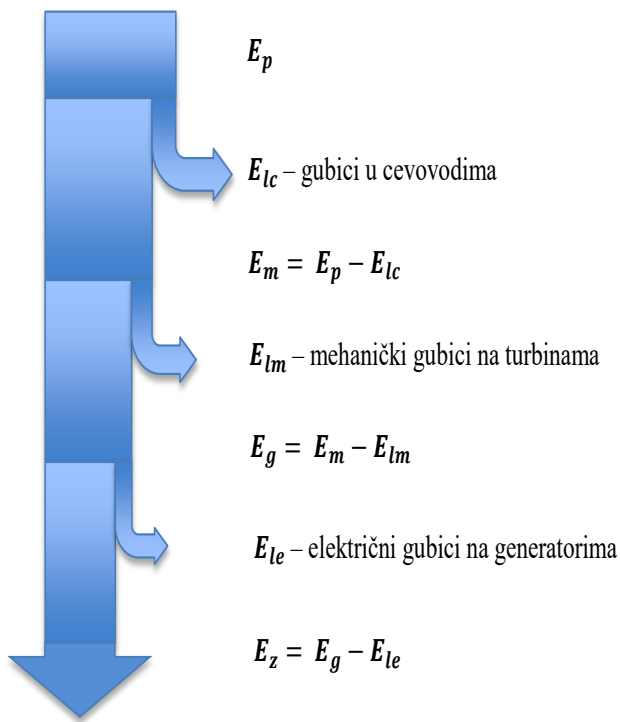
Planiranje rada hidroelektrane može da se optimizuje sa i bez upotrebe specijalizovanih softvera. Kada se planiranje vrši bez upotrebe softvera neophodni su značajni ljudski resursi na HE - bilo da se optimizuje što boljeg iskorišćenje potencijala vode, bilo da se optimizuje obezbeđenje balansne rezerve za regulaciju energetskeg sistema. Planiranje može da se obavlja dugoročno, srednjeročno i kratkoročno. I dok kod prve dve vrste planiranja, utiču sezonske statistike merenih meteoroloških podataka, nepouzdanе prognoze, statistike prethodnih proizvodnji i planiranja itd, kod kratkoročnih planova podrazumevamo da su resursi vode poznati, ali da treba predvideti optimalno korišćenje, kako agregata, tako i raspoložive količine vode iz akumulacija.

### **1.1 Kratkoročno planiranje**

U okviru kratkoročnog planiranja zadata je proizvodnja elektrane od strane koordinatora elektroenergetskog sistema u definisanim vremenskim intervalima, pa je neophodno definisati plan uključivanja i isključivanja agregata, kao i plan otvaranja i zatvaranja ustava akumulacija u tim vremenskim intervalima. Pri tome treba voditi računa o raspoloživoj količini vode u akumulacijama, nivou vode u ulaznoj građevini i izboru agregata, a samim tim i cevovoda, za uključivanje ili isključivanje.

Jedan deo proračuna plana predstavlja izbor agregata za rad u zadatim vremenskim intervalima. Iako je princip rada elektrane relativno jednostavan - iskorišćenje potencijalne energije vode iz ulazne građevine - sam izbor agregata zavisi od mnogih faktora, a cilj treba da bude dobijanje željenih protoka po agregatu i cevovodu, kako bi se kota na ulaznoj građevini držala u zadatom opsegu. Naime ova kota ne sme biti ni visoka, da ne bi došlo do preliva, niti niska, kako cevovodi ne bi ostali bez vode. Dakle, da bi se dobila zahtevana proizvodnja elektrane, potrebno je postaviti jednačinu cilja, koja je predstavljena nelinearnom vezom više varijabli (u našem slučaju to su stepeni iskorišćenja i protoci svakog agregata) i izjednačena sa zahtevanom snagom.

## 1.2 Energetski bilans elektrane



Slika 1 - Utrošak energije od ulazne građevine do izlaza iz elektrane

Generalna formula za potencijalnu energiju može se napisati u sledećem obliku:

$$E_p = mgH$$

Deo ove energije se gubi pri konvertovanju potencijalne u električnu:

$$E_p = P_g t + E_l$$

Gde su:

$E_p$  – potencijalna energija elektrane

$P_g$  – izlazna snaga elektrane

$E_l$  – ukupni gubici pri konvertovanju

Ukupni gubici  $E_l$  od ulazne građevine do korisne energije troše se na gubitke u cevovodima, mehaničke gubitke na turbinama i električne gubitke na generatorima. Mehanički i električni gubici vezani su za sam agregat.

Sama raspodela gubitaka može se naknadno određivati, vodeći računa o karakterističnim topološkim grafikonima turbine i generatora, i karakteristikama cevovoda, kao jedan od kriterijuma za izbor rešenja ciljne funkcije.

## 2 POSTAVLJANJE CILJNE FUNKCIJE ELEKTRANE

Da bi se odredio raspored i broj agregata koji treba da budu angažovani treba postaviti ciljnu funkciju. Pretpostavlja se da je zadata potrebna proizvodnja elektrane po vremenskim intervalima. U svakom vremenskom intervalu, potencijalna energija vode u ulaznoj građevini biće utrošena na proizvodnju električne energije i na gubitke u cevovodima, na turbinama, u generatorima.

$$\sum_{t=1}^T E_{p,t} = \sum_{t=1}^T (E_{g,t} + E_{l,t}) \quad (2.1)$$

Korisna energija i energija gubitaka raspodeljuje se na n agregata:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n E_{p,i,t} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (E_{g,i,t} + E_{l,i,t}) \quad (2.2)$$

Pošto se zahtevana proizvodnja daje po satnim ili 15-minutnim intervalima u okviru dana, a obično izražava u MWh, radi jednostavnosti opisa rada genetičkog algoritma, uzećemo da je vremenski interval (t) 1 čas, a zadata energija za taj sat ( $E_z$ ). Za ciljnu funkciju se uzima jedan član sume po vremenskom intervalu:

$$\sum_{i=1}^n E_{p,i} = \sum_{i=1}^n (P_{g,i}t + E_{l,i}) \quad (2.3)$$

Kada se uvede stepen iskorišćenja agregata, i uzme u obzir da je suma proizvodnji agregata jednaka zadatoj energiji u tom satu, dobijamo:

$$\sum_{i=1}^n (E_{p,i} - E_{l,i}) = \sum_{i=1}^n P_{g,i}t \quad (2.4)$$

$$\sum_{i=1}^n E_{p,i} \frac{E_{p,i} - E_{l,i}}{E_{p,i}} = \sum_{i=1}^n P_{g,i}t, \quad \eta_i = \frac{E_{p,i} - E_{l,i}}{E_{p,i}} \quad (2.5)$$

$$\sum_{i=1}^n E_{p,i} \eta_i = \sum_{i=1}^n P_{g,i}t \quad (2.6)$$

Ovde treba napomenuti da se stepen iskorišćenja agregata odnosi na sve gubitke – i u cevovodu, i na turbini i generatoru. Kako je ukupni pad mnogo veći od promene nivoa u ulaznoj građevini, može se smatrati da je  $H$  konstantno. Kada se primeni formula za potencijalnu energiju:

$$\sum_{i=1}^n m_i g H \eta_i = \sum_{i=1}^n P_{g,i}t \Rightarrow \sum_{i=1}^n \rho V_i g H \eta_i = \sum_{i=1}^n P_{g,i}t \Rightarrow \rho g H \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{t} \eta_i = \sum_{i=1}^n P_{g,i} \quad (2.7)$$

Dobijamo ciljnu funkciju kao:

$$\rho g H \sum_{i=1}^n q_i \eta_i = \sum_{i=1}^n P_{g,i} = E_z \quad (2.8)$$

$$\rho g H \sum_{i=1}^n q_i \eta_i - E_z = 0 \quad (2.9)$$

$$F(q_i, \eta_i) = \sum_{i=1}^n q_i \eta_i - \frac{E_z}{\rho g H} = 0 \quad (2.10)$$

$E_{p,i}$ ,  $i = 1, \dots, 8$  – potencijalna energija vode po agregatu

$E_{l,i}$ ,  $i = 1, \dots, 8$  – ukupni gubici po agregatu

$P_{g,i}$ ,  $i = 1, \dots, 8$  – snage po agregatu

$m_i$ ,  $i = 1, \dots, 8$  – masa vode po agregatu

$V_i$ ,  $i = 1, \dots, 8$  – zapremina vode po agregatu

$q_i$ ,  $i = 1, \dots, 8$  – protoci po agregatu

$\eta_i$ ,  $i = 1, \dots, 8$  – ukupni stepen iskorišćenja po agregatu

$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$  – specifična težina vode

$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$  – gravitaciona konstanta

$H = 526 m$  – pad

$E_z$  – zadata proizvodnja elektrane

Jednačina (2.10) predstavlja ciljnu funkciju.

Pri tom treba definisati i tehnička ograničenja koja važe u datom sistemu:

$$\begin{aligned} 0 &\leq q_{1,2,3,4,5} \leq 8.5 \frac{m^3}{s} \\ 0 &\leq q_{6,7,8} \leq 12.75 \frac{m^3}{s} \\ 0 &\leq \eta_i < 100\%, \quad i=1,\dots,8 \end{aligned} \quad (2.11)$$

### 3 GA PRINCIPI

Princip genetičkog algoritma inspirisan je Darwinovom teorijom evolucije, koja tvrdi da unutar jedne vrste preživljavaju samo one jedinke koje su se prilagodile uslovima okoline, kroz proces selekcije, ukrštanja i mutacije. Kroz nekoliko generacija, tj. kroz iterativan postupak ova tri procesa, dobijaju se najbolji primerci populacije, koji su se prilagodili postavljenim uslovima.

Primenjeno na rešavanje matematičkog problema nelinearnog programiranja, moglo bi se reći da uslovi okoline mogu da se predstavljaju jednačinom cilja ili ciljnom funkcijom:

$$F(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) - c = 0 \quad (3.1)$$

Jedno rešenje  $[x_1, x_2, \dots, x_n]$  predstavlja jedinku vrste ili hromozom, a niz rešenja predstavlja populaciju u okviru jedne generacije. Varijable ( $x_i$ ) u okviru hromozoma predstavlja gene. Gen ima svoje osobine (ograničenja) u okviru kojih zadržava svoju namenu. Geni mogu biti grupisani u sekvence. Pri tome, geni ne gube svoje osobine, ali sekvence dodaju svoje, pa prema tome i svoja ograničenja.

Za rešavanje ciljne funkcije se mogu primeniti Darwinovi principi evolucije na skup potencijalnih rešenja - populaciju. Naime, izborom najboljih rešenja (hromozoma), ukrštanjem varijabli (gena) parova izabranih rešenja (hromozoma) i promenom izvesnog broja varijabli (gena), dobiće se nova generacija. Postupak se ponavlja sve dok se ne dobije zadovoljavajuće rešenje (hromozom) ili dok populacija ne postane klonalna.

#### Koraci algoritma

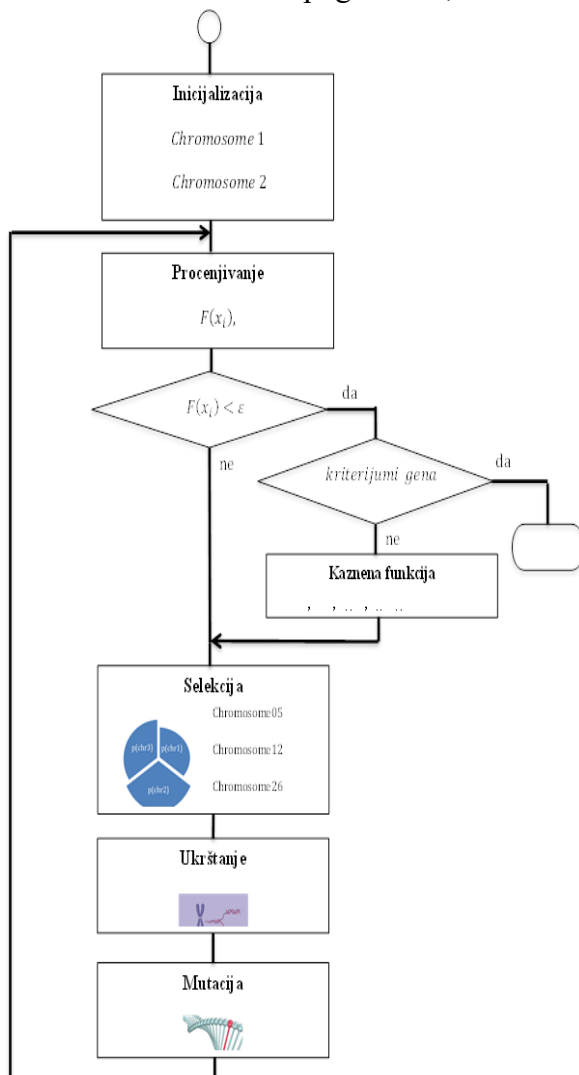
Zadaje se broj članova populacije, broj generacija i faktori selekcije i mutacije.

##### 1. korak - Generacija

Inicijalno se formira populacija hromozoma (rešenja), čije su vrednosti varijabli (geni) slučajno izabrani, ali u granicama svojih ograničenja.

##### 2. korak - Procena pogodnosti hromozoma

Za svaki hromozom se proverava tačnost ciljne funkcije. Što je veća tačnost, veća je verovatnoća da će taj hromozom biti pogodan za roditelja za sledeću generaciju. Da bi se izračunala verovatnoća pogodnosti, za svaki hromozom se računa njegova recipročna vrednost ciljne funkcije  $1/F(x)$ . Što je rešenje bliže nuli, veća mu je recipročna vrednost, pa time i verovatnoća da je taj hromozom rešenje ili da može da bude kandidat za roditelja prilikom selekcije. Istovremeno generiše se rulet vrednost, slučajni broj  $[0,1]$ , za svaki član populacije, koji će poslužiti za kriterijum selekcije.



Slika 2 – Dijagram genetičkog algoritma

Po završetku procene pogodnosti, proverava se da li neki od hromozoma zadovoljava kriterijume ograničenja i cilja.

### 3. korak - Selekcija

U okviru populacije jedne generacije biraju se hromozomi, koji zadovoljavaju ciljnu funkciju  $F(x)$  sa što većom verovatnoćom pogodnosti. Izabrani hromozomi predstavljaju potencijalne roditelje za sledeću generaciju.

Verovatnoća izbora hromozoma za roditelje iz populacije, prema biološkim zakonima, ide od 50-70%, tj. kada hromozom i prođe izbor, šanse da postane roditelj su 50-70%. Ovaj parametar se definiše kao faktor selekcije.

### 4. korak - Ukrštanje (crossover)

Novi hromozom nastaje ukrštanjem gena izabranih parova hromozoma - roditelja. Kod svakog izabranog para slučajno se određuje tačka prekida hromozoma, a onda

se formira novi hromozom, tako što se od jednog roditelja uzimaju geni do tačke prekida, a od drugog od tačke prekida. Mesta prekida može biti više, tako da ukrštanje može biti komplikovanije, što će dovesti do bolje raznovrsnosti populacije.

### 5. korak - Mutacija

Na kraju, u svakoj generaciji se javlja 5-10% mutacija. Ovaj parametar se naziva faktor mutacije. U ovom koraku se slučajno biraju geni koji će biti mutirani, tj. vrednost će im se promeniti slučajnim generisanjem u granicama gena.

Posle ovih koraka, formirana je nova generacija i postupak se ponavlja sve dok se ili ne dobije zadovoljavajuće rešenje, ili ne zaključi da rešenje nije moguće. Ukoliko se ustanovi da treba da se promene parametri gena hromozoma, odrađuje se kaznena funkcija, a postupak se nastavlja sa tako promenjenim parametrima gena ili sekvenci.

### 3.2 Obrada kriterijuma ograničenja

U okviru koraka 2 u tački 3.1, posle izračunavanja ciljne funkcije i verovatnoće pogodnosti, proveravaju se kriterijumi ograničenja i da li je vrednost ciljne funkcije nekog člana manja od zahtevane tačnosti za rešenje.

Postoje tri slučaja kada se ulazi u proveru kriterijuma gena hromozoma:

- kada je u generaciji pronađeno rešenje (ciljna funkcija je manja od zahtevane tačnosti)
- kada je broj hromozoma sa istim genima veći od zadatog procenta populacije
- kada je završen generacijski ciklus i nije pronađeno rešenje

Ako je pronađeno rešenje, i geni zadovoljavaju kriterijume, izlazi se iz algoritma. U ostalim slučajevima ide se na takozvanu kaznenu funkciju, prema kojoj se menja struktura hromozoma, tj. dodaju se ili oduzimaju geni ili se menja karakteristika gena, odnosno menjaju se kriterijumi. Ako algoritam dostigne maksimalni broj generacija ( $N$ ), smatra se da ne postoji rešenje sa zadatim ograničenjima.

## 4 PRIMENA

Prema ciljnoj funkciji energetskog bilansa elektrane (2.10), smatra se da su geni protoci i stepeni iskorišćenja svakog agregata. Par gena protok-stepen iskorišćenja tj. njihov proizvod, predstavlja  $\mathbf{A}$  sekvencu hromozoma, a ova sekvencu predstavlja agregat. Grupisane prve dve sekvence, tj. njihov zbir, predstavlja novu,  $\mathbf{B}_1$  sekvencu hromozoma, koja je, u stvari, prvi cevovod. Slično za zbir  $\mathbf{A}$  sekvenci tri, četiri i pet –  $\mathbf{B}_2$  sekvencu drugi cevovod, i preostale  $\mathbf{A}$  sekvence –  $\mathbf{B}_3$  sekvencu cevovod tri.

Ovo je značajno jer se, zbog preciznosti izračunavanja, mogu uvoditi kriterijumi ne samo po genima, nego i po skvencama i grupama sekvenci hromozoma. Prema tome:

$$\begin{aligned} & (q_{i1}, \eta_{i1}) - \text{hromozom} \\ & q_i, i = 1, \dots, 8 - \text{geni} - \text{protok} \\ & \eta_i, i = 1, \dots, 8 - \text{geni} - \text{stepen iskorišćenja} \\ & P_i = \rho g H \cdot \eta_i q_i, i = 1, \dots, 8 - \mathbf{A} \text{ sekvencu} - \text{snaga agregata} \\ & Q_1 = q_1 + q_2 - \mathbf{B}_1 \text{ sekvencu} - \text{cevovod 1} \\ & Q_2 = q_3 + q_4 + q_5 - \mathbf{B}_2 \text{ sekvencu} - \text{cevovod 2} \\ & Q_3 = q_6 + q_7 + q_8 - \mathbf{B}_3 \text{ sekvencu} - \text{cevovod 3} \end{aligned}$$

Na ovaj način je elektrana modelovana pogodno za korišćenje genetičkog algoritma. Posmatra se populacija od  $m$  hromozoma u  $N$  generacija. Faktori selekcije i mutacije biće 0,5 i 0,1 respektivno. Uslov za rešenje ciljne jednačine je  $\varepsilon = 0.01E_z$ , odnosno 1% zadate energije.

Uvode se i ograničenja, na primer:

$$\begin{aligned} & 75\% < \eta_i < 95\%, i = 1, \dots, 8 - \text{da gubici budu ekonomični} \\ & 5,5 < q_i < 8,5, i = 1, \dots, 5 - \text{da su protoci u granicama ekonomičnosti} \\ & 8,5 < q_i < 12,75, i = 6,7 \\ & q_8 = 0 - \text{protok agregata 8, jer ne postoji} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Skup ograničenja (4.1) predstavljaju zadate kriterijume. Oni su u granicama tehničkih ograničenja (2.11). Ove granice je moguće korigovati u okviru algoritma ili anulirati u slučaju kaznene funkcije.

Ovde je prikazan samo deo mogućih ograničenja. Za preciznije određivanje rešenja mogu se koristiti i drugi uslovi, kao što su vreme rada agregata, ravnomerna raspodela vode u cevovodima itd. Za grublje procene može se smanjiti procenat od nominalne snage ili opseg stepena iskorišćenja itd.

#### 4.1 Početna generacija (nulta generacija)

Inicijalno se slučajno generišu geni svakog od  $m$  hromozoma, tako da njihove vrednosti budu u granicama ograničenja. Tako se dobija niz hromozoma koja predstavljaju nultu generaciju.

$$\begin{aligned} F_1(q_{i1}, \eta_{i1}) &= F_1 \\ F_2(q_{i2}, \eta_{i2}) &= F_2 \\ &\vdots \\ F_k(q_{ik}, \eta_{ik}) &= F_k \\ &\vdots \\ F_m(q_{im}, \eta_{im}) &= F_m \end{aligned} \quad (4.2)$$

#### 4.2 Procenjivanje

Za celu populaciju ( $m$  rešenja) izračunavaju se:

- ciljna funkcija  $k$ -tog rešenja

$$F_k(q_{ik}, \eta_{ik}) = \sum_{i=1}^n q_{ik} \eta_{ik} - \frac{E_z}{\rho g H} \quad (4.3)$$

- funkcija pogodnosti  $k$ -tog rešenja u populaciji

$$f_k(q_{ik}, \eta_{ik}) = 1/|F_k(q_{ik}, \eta_{ik})| \quad (4.4)$$

- rulet vrednost - slučajan broj između 0 i 1 za  $k$ -to rešenje

$$r_k = \text{rnd}(0, 1) \quad (4.5)$$

Prilikom prolaska kroz celu populaciju formiraju se odgovarajuće sume ciljne funkcije, funkcije pogodnosti i ruleta, koje će poslužiti da se odrede verovatnoće funkcije pogodnosti i ruleta i statistički parametri populacije (srednja vrednost, standardna devijacija itd).

Zatim se izračunavaju verovatnoće pogodnosti i ruleta:

- verovatnoća funkcija pogodnosti  $k$ -tog rešenja u populaciji

$$p_k(f_k) = f_k(q_{ik}, \eta_{ik}) / \sum_{k=1}^m f_k(q_{ik}, \eta_{ik}) \quad (4.6)$$

- kumulativna verovatnoća funkcija pogodnosti  $k$ -tog rešenja u populaciji.

$$p_{ck}(f_k) = \sum_{j=1}^k p_j(f_j) \quad (4.7)$$

- verovatnoće ruleta



$$p_k(r_k) = r_k / \sum_{k=1}^m r_k \quad (4.8)$$

- kumulativna verovatnoća ruleta k-tog rešenja u populaciji

$$p_{ck}(r_k) = \sum_{j=1}^k p_j(r_j) \quad (4.9)$$

U okviru ovog koraka prati se i da li neki od hromozoma zadovoljava ciljnu funkciju i uslove postavljene za gene i sekvence. Ukoliko su svi uslovi zadovoljeni, prekida se algoritam i prikazuje se ili čuva dobijeno rešenje.

Ako uslovi nisu zadovoljeni, primenjuje se kaznena funkcija. U ovom slučaju za kaznenu funkciju je izabrano uključivanje ili isključivanje **A** sekvence hromozoma, što odgovara uključivanju ili isključivanju agregata. Pošto se prati srednja vrednost i standardna devijacija populacije, u slučaju da je srednja vrednost veća od nule, isključuje se jedna **A** sekvenca, odnosno uključuje, ako je manja od nule. Izbor **A** sekvence (agregata) obavlja se po dodatnim kriterijumima, napr. dužina rada **A** sekvence, pripadnost **A** sekvence **B** sekvenci (cevovod), itd. Postupak se dalje nastavlja sa ovako uključenom ili isključenom **A** sekvencom.

### 4.3 Selekcija

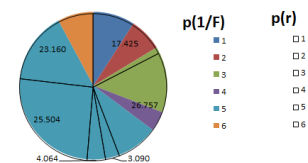
Na osnovu vrednosti verovatnoća pogodnosti i verovatnoća ruleta iz prethodnog koraka, biraju se iz populacije ona rešenja koja će predstavljati roditelje za sledeću generaciju. Postoji nekoliko načina selekcije:

- **elitistički izbor**, biraju se hromozomi iz populacije koji imaju najveću verovatnoću pogodnosti.
- **rulet izbor**, bira se prvi hromozom čija je verovatnoća pogodnosti manja od vrednosti ruleta.
- **kumulativni rulet izbor**, slično prethodnoj metodi, biraju se hromozomi, tako da kumulativna verovatnoća ruleta ne bude veća od kumulativne vrednosti verovatnoće pogodnosti.

Tabela 1

	F(x)	1/F(x)	p(1/F)	r	p(r)	
F1	886.32	0.0011	9.09	0.6192	17.43	
F2	1112.3	3	0.0009	7.24	0.9508	26.76
F3	554.90	0.0018	14.52	0.1098	3.09	
F4	1850.3	0	0.0005	4.36	0.1444	4.06
F5	141.53	0.0071	56.94	0.9063	25.50	
F6	1027.2	4	0.0010	7.84	0.8230	23.16
		0.0124		3.5535		

Slika 3 – rulet selekcija

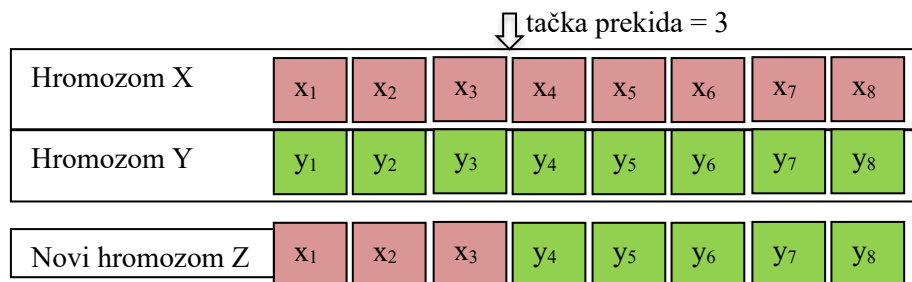


U radu je korišćen kumulativni rulet metod. Na Slici 3 je prikazan primer izbora pogodnih hromozoma iz populacije od šest hromozoma, čije su vrednosti date u tabeli 1. Preklapajući dijagram za verovatnoću pogodnosti (obojeni iseći) sa dijagramom sa vrednostima

verovatnoće ruleta (crne linije isečaka), dobija se da su za sledeću generaciju potencijalni roditelji  $F_1, F_2, F_4$  i  $F_5$ .

#### 4.4 Ukrštanje (crossover)

U ovom koraku parovi izabranih hromozoma iz prethodnog koraka učestvuju u razmeni gena i tako stvaraju nove hromozome za sledeću generaciju. Princip je da se paru hromozoma odredi tačka prekida kao slučajni broj od 1 do  $2n - 1$ . Novi hromozom se formira tako što se od prvog roditelja uzmu geni do tačke prekida, a od drugog od tačke prekida. U radu smo uzeli da postoji samo jedna tačka prekida.



Slika 4 – Postupak ukrštanja – crossing over

Takođe, izbor parova iz niza roditelja je takav da se kombinuje svaki sa svakim hromozomom i da svaki par kreira samo jedan novi hromozom.

Postoji nekoliko načina formiranja nove generacije. Moguće je kombinovati novodobijene hromozome sa postojećom generacijom, ili formirati generaciju samo od novih hromozoma, ili koristiti neki drugi biološki model. U ovom radu se koristi princip da je nova generacija dobijena samo od novih hromozoma.

#### 4.5 Mutacija

U svakoj generaciji javlja se oko 10% mutacija gena. Slučajnim izborom gena iz populacije, izabranom genu se dodeljuje, opet slučajna vrednost u opsegu tog gena.

Nakon ovog koraka formirana je nova generacija

$$\begin{aligned}
 &NF_1(q_{i1}, \eta_{i1}) \\
 &NF_2(q_{i2}, \eta_{i2}) \\
 &\vdots \\
 &NF_k(q_{ik}, \eta_{ik}) \\
 &\vdots \\
 &NF_m(q_{im}, \eta_{im})
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Ovim je proces stvaranja nove generacije završen i nova generacija (4.10) je spremna za procenu.

#### 4.6 Obrada kriterijuma i kaznena funkcija

Pre nego što se ponovo pređe na korak procene, proveravaju se statistički parametri populacije. Ukoliko je više od 70% hromozoma u granicama standardne devijacije, smatra se da je populacija klonska, pa se primenjuje kaznena funkcija i tek onda prelazi na korak procene.

Kada je u generaciji pronađeno rešenje ide se na proveru kriterijuma za svaki gen, svih hromozoma. Ovih provera može biti više po raznim kriterijumima ne samo za gene, nego i sekvence.

U ovom radu se proverava:

- da li je dobijena vrednost u granicama gena, tj. da li su protoci i stepeni iskorišćenja jednog rešenja u zadatim granicama prema kriterijumskim uslovima (4.1)
- da li je A sekvenca, tj. dobijena snaga za generatore (proizvod dva gena) veća od 20% nominalne snage (4.1).

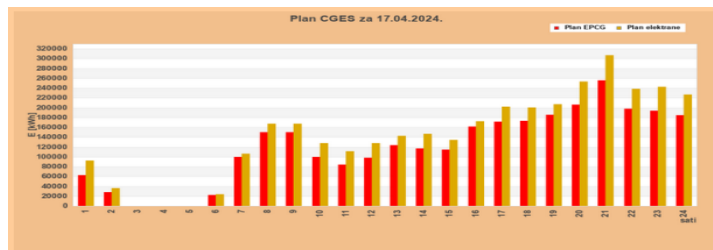
Ukoliko nisu ispunjeni uslovi ni za jedno od potencijalnih rešenja ili ako je populacija klonska primenjuje se kaznena funkcija. U ovom slučaju ova funkcija je krajnje jednostavna, uključuje se ili isključuje A<sub>j</sub> sekvenca iz ciljne funkcije, tj. dodaje se ili oduzima jedan agregat. Odluku o uključivanju ili isključivanju uzima se prema znaku srednje vrednosti populacije.

Praktično, prilikom isključivanja agregata *j*, dodeljuje se vrednosti gena za protok nula, odnosno, prilikom uključivanja generiše se slučajni broj u granicama kriterijumskih uslova (4.1).

Dalji postupak je vraćanje na korak procene. Algoritam radi dok se ne dobije rešenje u N generaciji, ili daje informaciju da nije moguće dobiti rešenje prema zadatim kriterijumima.

## 5 RASPORED RADA AGREGATA

Po dobijanju zadovoljavajućeg rešenja prelazi se na novu zadatu energiju elektrane prema (2.2). Kod kratkoročnog planiranja, elektrani je unapred određeno koliko energije je potrebno elektro-energetskom sistemu. Kao što je već napomenuto u radu je posmatrana dnevna proizvodnja po satima kao na Slici 5.



Slika 5 – Dnevni plan elektrane (crveno) i potrebna hidro-energija (narandžasto)

Primenom GA, uz zadate kriterijume (4.1) rezultat obrade predstavlja tabelu uključivanja i isključivanja agregata elektrane. Na slici 6 je dat primer rasporeda rada elektrane po zadatom planu.

PLAN RADA AGREGATA																									
sat	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	
plan EPCG	63	28	0	0	0	22	100	150	150	100	84	98	124	117	115	162	172	173	186	206	256	198	194	185	
agregat	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
A1								25	25								34	22	22	31	39	35	33	34	34
A2																					32	31	32	23	30
A3												29	28										37	23	25
A4																									
A5							30	29	29					35	31	31	36	34	36	27	37	25	37	22	
A6		20					40	50	50	52	34	35	46	45	46	41	58	58	60	59	59	34	34	34	40
A7		43	28				22	29	47	47	48	50	34	50	37	38	56	57	59	59	50	57	51	43	40
A8																									
ukupno	63	28	0	0	0	22	100	150	150	100	84	98	124	117	115	162	172	173	186	206	256	198	194	185	

Slika 6 – Raspored uključivanja i isključivanja agregata

U tabeli su prikazane snage agregata, ali postoje i vrednosti, protoka i stepena iskorišćenja, koje se takođe čuvaju kao rezultat GA. Vrednosti protoka predstavljaju ulazne podatke za

odlučivanje na koji način će se otvarati ustave na jezerima i kanalim, kako bi se obezbedila optimalna količina vode u ulaznoj građevini. Treba napomenuti da stepen iskorišćenja uzima ukupne gubitke i u cevovodu i na turbini i generatoru. Za tačnu raspodelu gubitaka, moraju se uzeti u obzir i topološke karakteristike agregata i karakteristike cevovoda. To se može postići ili dodatnim ograničenjima ili definisanjem nove ciljne funkcije.

## 6 ZAKLJUČAK

Iako se GA sastoji iz malog broja koraka, mogućnosti selekcije, ukrštanja i mutacije i njihove kombinacije mogu biti velike. Posmatrajući biološke fenomene u ovoj primeni genetički algoritam je krajnje jednostavan. Na primer, za selekciju se uzima rulet princip, ali u prirodi, biološki, ne znamo da li je baš sve slučajno ili postoji neka funkcionalna uslovljenost. Takođe, izbor parova za ukrštanje, u GA se generiše slučajnim izborom, a u prirodi to nije baš tako.

Ipak, inženjerski gledano, GA daje sasvim zadovoljavajuće rezultate sa relativno malim brojem članova generacije,  $m = 64$ , i ograničenjem na  $N = 200$  generacija pri uslovima (4.2). Prilikom testiranja, rešenja su pronalazena posle 30-tak generacija i brže.

Međutim, ako se uvedu strožiji kriterijumi, ili dodaju novi, izračunavanje postaje duže i sa neizvesnim očekivanjem da će se dobiti rezultat. Čak i ako se povećava broj generacija i članova populacije, strožiji kriterijumi mogu da dovedu do divergencije ili neodređenosti rešenja. Moguće je da tada treba uvesti novu vrstu kaznene funkcije, u smislu postepenog „popuštanja“ zadatih kriterijuma.

U svakom slučaju, vidi se da GA ima velikih mogućnosti za istraživanje u pronalaganju i primeni, bioloških, tehničkih i matematičkih modela.

## 7 LITERATURA

1. S.P. Bradley, A.C. Hax, T.L. Magnanti, Applied Mathematical Programming, Addison-Wesley, MIT, Boston, January 1977.
2. Denny Hermawanto, Genetic Algorithm for Solving Simple Mathematical Equality Problem, ResearchGate, LIDI, Indonesia, August 2013.
3. Randy L. Haupt, Sue Ellen Haupt, Practical Genetic Algorithms, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.

### APPLICATION OF THE GENETIC ALGORITHM (GA) IN THE SELECTION OF GENERATORS FOR PRODUCTION AT PERUCHICA HPP

**RADOMIR STAMATOVIĆ\*, DIPL.INŽ, GOJKO BLAGOJEVIĆ, DIPL.INŽ,  
PREDRAG ILIĆ, DIPL.INŽ, MILENA KRULJEVIĆ, DIPL.INŽ,  
MARIJA SAVIĆ, DIPL.INŽ.**

**INSTITUT MIHAJLO PUPIN-AUTOMATIKA, BELGRADE, SERBIA  
EPCG, AD NIKŠIĆ, NIKSHICH, MONTENEGRO**

***Abstract* - In order to make the best possible use of the water potential and ensure the balance reserve for the needs of energy system regulation, it is necessary to optimally plan the operation of the hydroelectric power plant.**

---

\* Beograd, Volgina15, radomir.stamatovic@pupin.rs

The values of hydropower production are set in defined time intervals based on short-term planning obtained by optimizing the production mix from the balance responsible party, and data on water resources and availability of generators are also known. Under these conditions, optimal use of generators and the available amount of water from reservoirs should be foreseen.

In HPPs with multiple generators, the selection of generators depends on pipeline losses, mechanical losses on turbines, electrical losses on generators, etc. The goal of planning should be the optimal use of water potential and the use of generators, and the result of the optimization is flows through generators and pipelines, such that the given production of the hydroelectric power plant is ensured. This objective is described by an objective function, which is defined by a non-linear relationship of several variables, in this case the degree of utilization and the flow of each unit individually.

The obtained results for flows represent input data for further planning, mainly for planning the provision of a sufficient amount of water in the input building, for the production of the power plant, which practically means maintaining the height of the input building in the given range.

The paper presents the procedure for obtaining and solving the objective function using a genetic algorithm (GA), with the simplest restrictions on the input variables. The principle of the genetic algorithm consists of evaluation, selection, crossover and mutation within a population. Through the iterative procedure of these four principles, through several generations, the solution of the objective function is obtained.

*Key words* — genetic algorithm, planning,, generation, population, chromosome, gene, hydropower plant, generator

**PRIMENA GENETIČKOG ALGORITMA (GA) KOD IZBORA AGREGATA ZA  
PROIZVODNJU NA HE PERUĆICA**

**APPLICATION OF THE GENETIC ALGORITHM (GA) IN THE SELECTION OF  
AGGREGATES FOR PRODUCTION AT PERUCHICA HPP**

**RADOMIR STAMATOVIĆ\*, DIPL.INŽ, GOJKO BLAGOJEVIĆ, DIPL.INŽ,  
PREDRAG ILIĆ, DIPL.INŽ, MILENA KRULJEVIĆ, DIPL.INŽ,  
MARIJA SAVIĆ, DIPL.INŽ.**

**INSTITUT MIHAJLO PUPIN-AUTOMATIKA, BEOGRAD, SRBIJA  
EPCG, AD NIKŠIĆ, NIKŠIĆ, CRNA GORA**

*Kratak sadržaj - Zbog što boljeg iskorišćenja potencijala vode i obezbeđenja balansne rezerve za potrebe regulacije energetskog sistema, neophodno je optimalno isplanirati rad hidroelektrane.*

*Vrednosti proizvodnje hidroelektrane su zadate u definisanim vremenskim intervalima na osnovu kratkoročnog planiranja dobijenog optimizacijom proizvodnog miksa od balansno odgovorne strane, a poznati su i podaci o vodnim resursima i raspoloživosti agregata. Pri ovim uslovima treba predvideti optimalno korišćenje agregata i raspoložive količine vode iz akumulacija.*

*Kod HE sa više agregata, izbor agregata zavisi od gubitaka u cevovodima, mehaničkih gubitaka na turbinama, električnih gubitaka na generatorima itd. Cilj planiranja treba da bude optimalno korišćenje potencijala vode i korišćenja agregata, a rezultat optimizacije su protoci po agregatima i cevovodima, takvi da se obezbedi zadata proizvodnja hidroelektrane. Ovaj cilj je opisan ciljnom funkcijom, koja je definisana nelinearnom vezom više varijabli, u ovom slučaju stepena iskorišćenja i protoka svakog agregata ponaosob.*

*Dobijeni rezultati za protoke predstavljaju ulazne podatke za dalje planiranje, uglavnom za planiranje obezbeđivanja dovoljne količine vode u ulaznoj građevini, za proizvodnju elektrane a to praktično znači održavanje kote ulazne građevine u zadanom opsegu.*

*U radu je prikazan postupak dobijanja i rešavanja ciljne funkcije pomoću genetičkog algoritma (GA), uz najjednostavnija ograničenja ulaznih varijabli. Princip genetičkog algoritma sastoji se iz procene, selekcije, ukrštanja i mutacije unutar jedne populacije. Kroz iterativan postupak ova četiri principa, kroz nekoliko generacija, dobija se rešenje ciljne funkcije.*

**Ključne reči —genetički algoritam, planiranje, generacija, populacija, hromozom, gen, hidroelektrana, agregat**

---

\* Beograd, Volgina15, radomir.stamatovic@pupin.rs



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.095B](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.095B)

C2 06

**DETEKCIJA ANOMALIJA U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA  
KORIŠĆENJEM PMU PODATAKA: PRIMENA STATISTIČKIH METODA I  
ALGORITAMA MAŠINSKOG UČENJA**

**DR VLADIMIR BEČEJAC\*, ALEKSANDAR GEORGIEV, MILOŠ JOVANOVIĆ  
ELEKTROMREŽA SRBIJE**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* — Ovaj rad istražuje metode detekcije anomalija u elektroenergetskim sistemima koristeći podatke prikupljene sa Phasor Measurement Units (PMU) uređaja. Fokus je na identifikaciji odstupanja u uglovima napona, što može ukazivati na potencijalne kvarove ili nestabilnosti. Korišćene su statističke metode i algoritmi mašinskog učenja, kao što su Isolation Forest i autoencoders, za analizu velikih količina podataka. Rezultati pokazuju da ove metode mogu efikasno identifikovati anomalije, omogućavajući operaterima da preduzmu preventivne mere i poboljšaju stabilnost elektroenergetskih sistema. Ova istraživanja pružaju osnovu za unapređenje sistema za praćenje i održavanje mreža.

*Ključne reči* — PMU, mašinsko učenje, big data analysis

## **1 UVOD**

Elektroenergetski sistemi su ključna infrastruktura savremenog društva, omogućavajući kontinuirano snabdevanje električnom energijom za industriju, transport, komunikaciju i svakodnevni život. Stabilnost ovih sistema je od suštinskog značaja jer čak i najmanji poremećaji mogu imati široke posledice, uključujući prekide u napajanju, ekonomske gubitke,

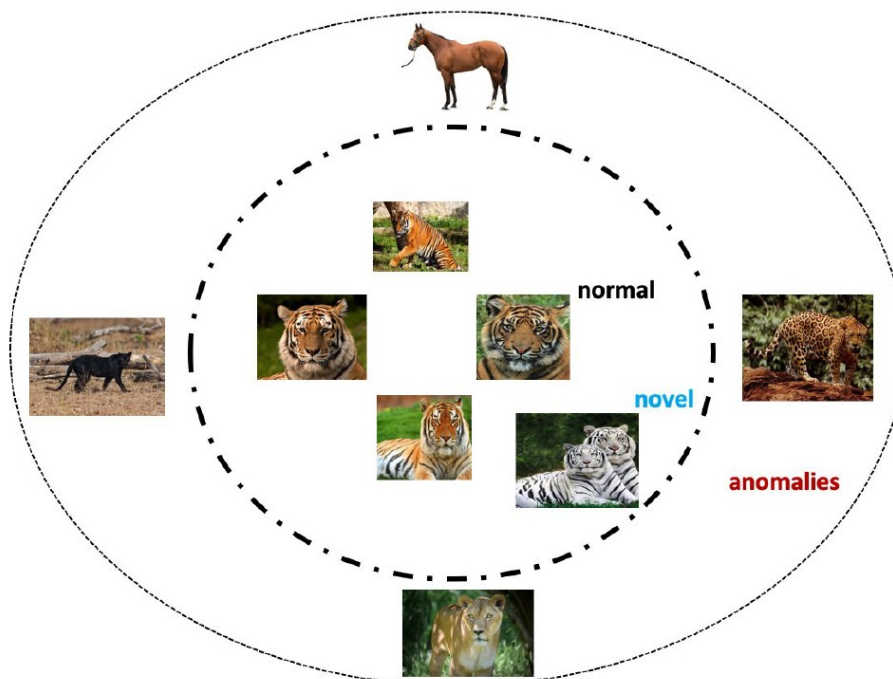
---

\*vladimir.becejac@ems.rs

i rizike po sigurnost. Zbog složenosti elektroenergetskih mreža, koje se sastoje od hiljada kilometara dalekovoda, brojnih elektrana i distribuiranih sistema, praćenje i održavanje stabilnosti predstavljaju veliki izazov.

Stabilnost elektroenergetskih sistema odnosi se na sposobnost sistema da održi ravnotežu između proizvodnje i potrošnje električne energije, kao i da se brzo oporavi od eventualnih poremećaja ili kvarova. Nestabilnost u mreži može dovesti do kaskadnih kvarova, koji mogu izazvati ozbiljne posledice kao što su isključenja velikih konzumnih oblasti, oštećenje opreme i ogromni ekonomski gubici. Na primer, veliki prekid napajanja u severoistočnoj Americi 2003. godine, koji je ostavio više od 50 miliona ljudi bez struje, bio je rezultat kombinacije tehničkih problema i neotkrivenih anomalija u mreži.

Anomalije, koje se manifestuju kao neočekivane promene u parametrima kao što su napon, frekvencija ili fazni ugao, mogu biti rani indikatori ozbiljnih problema. Pravovremena detekcija ovih anomalija omogućava operaterima da preduzmu preventivne mere, smanjujući rizik od kaskadnih kvarova i održavajući stabilnost sistema. Međutim, identifikacija anomalija u realnom vremenu predstavlja značajan izazov zbog količine i složenosti podataka koji se prikupljaju u modernim elektroenergetskim mrežama.



Slika 1. Primer normalnih uzoraka i anomalija preuzeta iz [1].

Identifikacija anomalija u elektroenergetskim sistemima je složen proces koji zahteva analizu velike količine podataka u realnom vremenu. Tradicionalni sistemi za praćenje oslanjaju se na statičke modele i pravila zasnovana na istorijskim podacima, što ih čini neefikasnim u detekciji novih ili neočekivanih anomalija. Osim toga, tradicionalne metode često ne mogu da obrade ogromne količine podataka koje savremeni elektroenergetski sistemi generišu, što može dovesti do propuštanja kritičnih informacija.

Jedan od ključnih izazova je razlikovanje stvarnih anomalija od normalnih fluktuacija u sistemu. Elektroenergetski sistemi su inherentno dinamični, sa promenama u opterećenju, proizvodnji i prenosu koji se dešavaju u milisekundama. Identifikacija anomalija u takvom



okruženju zahteva napredne analitičke alate koji mogu brzo i precizno obraditi podatke i identifikovati odstupanja od normalnog ponašanja.

Drugi izazov je vezan za skalabilnost rešenja. Kako se mreže šire i postaju sve složenije, sistemi za detekciju anomalija moraju biti sposobni da obrade sve veće količine podataka bez kompromisa u tačnosti i brzini. Ovo zahteva napredne tehnologije koje mogu paralelno obrađivati podatke sa više izvora i automatski prilagoditi svoje modele u skladu sa promenama u mreži.

Phasor Measurement Units (PMU) uređaji predstavljaju značajan napredak u tehnologiji praćenja elektroenergetskih sistema. PMU uređaji omogućavaju prikupljanje preciznih podataka o fazorima napona i struje u realnom vremenu, sa frekvencijom uzorkovanja koja može biti i do 50 puta u sekundi. Ovi uređaji pružaju tačne informacije o faznim uglovima, frekvenciji i amplitudi napona i struje, što omogućava detaljan uvid u stanje mreže u bilo kom trenutku.

PMU uređaji omogućavaju operaterima da detektuju promene u mreži gotovo trenutno, što je ključno za identifikaciju i odgovor na anomalije. Na primer, nagla promena faznog ugla između dva čvora može ukazivati na potencijalni problem u prenosnoj mreži, kao što je opterećenje ili kvar na liniji. PMU uređaji takođe omogućavaju sinhronizovano merenje na više lokacija, što je ključno za analizu širih poremećaja koji mogu zahvatiti velike delove mreže.

Jedan od primera koristi PMU uređaja je analiz širokopojasnih poremećaja, kao što su fluktuacije u frekvenciji koje se šire kroz mrežu. PMU podaci omogućavaju operaterima da prate širenje ovih poremećaja u realnom vremenu i identifikuju njihovo poreklo, što omogućava brže i efikasnije odgovaranje na poremećaje i sprečavanje njihovog širenja.

Neotkrivene anomalije mogu imati katastrofalne posledice za elektroenergetske sisteme. Na primer, u incidentu koji se dogodio u zapadnoj Evropi 2006. godine, neuspeh u pravovremenoj detekciji anomalije doveo je do prekida napajanja koji je zahvatio više zemalja i ostavio milione ljudi bez struje. Incident je započeo kao rutinska operacija, ali se zbog neotkrivenih promena u faznom uglu proširio na celu mrežu, uzrokujući široke poremećaje.

U ovom slučaju, da su PMU uređaji bili pravilno implementirani i korišćeni, anomalije u faznim uglovima i frekvenciji mogle su biti otkrivene pre nego što su izazvale prekid napajanja. Operateri bi tada mogli da preduzmu preventivne mere, kao što su preraspodela opterećenja ili isključenje ugroženih linija, čime bi se sprečio širi prekid.

Sličan primer se dogodio u indijskom elektroenergetskom sistemu 2012. godine, kada je masivni prekid napajanja ostavio više od 600 miliona ljudi bez struje. Anomalije u opterećenju koje su prethodile incidentu prošle su neopaženo zbog nedostatka efikasnih sistema za detekciju. Integracija PMU uređaja i naprednih algoritama za detekciju anomalija mogla je omogućiti ranije otkrivanje problema i sprečavanje prekida.

Stabilnost elektroenergetskih sistema je od suštinskog značaja za funkcionisanje modernog društva, a detekcija anomalija igra ključnu ulogu u održavanju te stabilnosti. PMU uređaji predstavljaju moćan alat za detekciju i analizu anomalija u realnom vremenu, pružajući operaterima ključne informacije potrebne za pravovremeno reagovanje na potencijalne probleme. U narednim delovima rada, biće istraženi različiti pristupi za analizu PMU podataka, uključujući primenu statističkih metoda i algoritama mašinskog učenja, kako bi se unapredila stabilnost i pouzdanost elektroenergetskih sistema.

## 2 ISOLATION FOREST ALGORITAM

Algoritam Isolation Forest (IF) predstavlja inovativnu tehniku za detekciju anomalija. Ovaj algoritam polazi od pretpostavke da su anomalije „retke i različite“. Umesto da se bavi profilisanjem normalne distribucije i merenjem udaljenosti svake tačke od normalnih, algoritam se fokusira na izolovanje anomalija od ostatka tačaka i procenu njihove razlike koristeći Isolation Tree (iTree). Ova strategija, uz kombinaciju više Isolation Trees i metodu poduzorkovanja, omogućava izgradnju modela sa niskim memorijskim zahtevima i logaritamskom složenosti u fazama obuke i evaluacije.

### 2.1 Princip izolacije

U ovom kontekstu, termin izolacija odnosi se na „odvajanje jedne instance od ostalih instanci“. Zamislite binarno stablo odlučivanja zasnovano na podacima koje sadrži anomaliju. Pretpostavka da su anomalije „retke i različite“ podrazumeva da će anomalije biti odlučene bliže korenu, dok će se normalne tačke nalaziti dublje u stablu. Binarno stablo se konstruiše kako bi izolovalo sve tačke i izmerilo njihove individualne dužine putanja od korena. Sledeće definicije potiču iz pomenutog rada [4].

Definicija 1. Izolaciono stablo (iTree). Neka  $T$  bude čvor izolacionog stabla.  $T$  može biti spoljašnji čvor bez potomaka ili unutrašnji čvor sa jednim testom i tačno dva čvora kceri ( $T_l$ ,  $T_r$ ). Test se sastoji od atributa  $q$  i vrednosti za deljenje  $p$  tako da test  $q < p$  deli tačke podataka na  $T_l$  i  $T_r$ .

Definicija 2. Dužina putanje  $h(x)$ . Dužina putanje tačke  $x$  se meri brojem ivica koje  $x$  prelazi kroz iTree od korenog čvora do trenutka kada putanja završava u spoljašnjem čvoru.

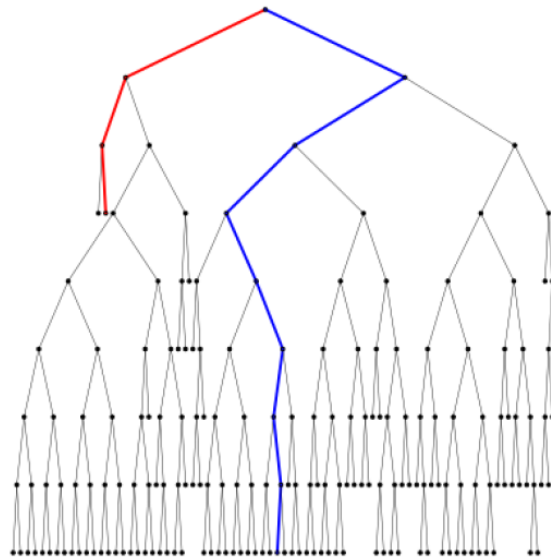
Pretpostavimo da su podaci u tabelarnom formatu tj. podaci organizovani u redove i kolone. Pretprocesiranje podataka zavisi od korisnika. Algoritmi pretpostavljaju da je tip podataka realan broj. Jedan red se često označava kao varijabla  $x$  ili tačka, posmatranje, instanca, dok se kolone nazivaju karakteristikama. Moguće je označiti redove kao normalne ili kao anomalije. Ove oznake se nazivaju etiketama. Varijabla  $N$  označava broj redova, dok  $P$  predstavlja broj kolona (karakteristika).

Podaci se koriste za kreiranje modela za detekciju anomalija. Proces kreiranja modela često se naziva izgradnjom, treniranjem ili učenjem. Kreirani model se zatim koristi za određivanje da li je neka instanca anomalija ili nije. Ovaj proces može se nazivati evaluacijom, testiranjem ili predikcijom.

Ukratko, PODACI su matrice realnih brojeva dimenzije  $N \times P$ , gde je  $N$  broj redova, a  $P$  broj karakteristika. U fazi treniranja, algoritam Isolation Forest gradi ansambl izolacionih stabala (iTree) nad PODACIMA. U fazi evaluacije, za bilo koju vrednost  $x$ , izračunava se prosečna dužina putanje  $h(x)$  u ansamblu iTree stabala. U narednim odeljcima koristi se prosek  $h(x)$  za izračunavanje ocene anomalije.

Priroda Isolation Forest algoritma pruža mogućnost izbegavanja problema maskiranja i preplavlivanja primenom metode poduzorkovanja. Poduzorkovanje se odnosi na nasumično odabiranje redova podataka bez ponavljanja. Prednost poduzorkovanja u IF algoritmu za detekciju anomalija je kontrola veličine podataka, što pomaže algoritmu da bolje izoluje tačke, a takođe poboljšava raznovrsnost svakog izolacionog stabla (iTree), s obzirom da se ansambl

stabala gradi. Osnovna pretpostavka je da su anomalije „retke i različite“. Verovatnoća da se čak i odabere gust klaster anomalija manja je nego verovatnoća odabira klastera koji sadrži zaista normalne instance. Na kraju, poduzorak podataka kreira se pre nego što se izgradi svako izolaciono stablo (iTree) u okviru šume (iForest).



Slika 2. Isolation tree

Takođe, može se proučiti uticaj veličine poduzorka. Kod IF algoritma, postoji gornja granica za veličinu poduzorka kako bi se postigla ista efikasnost detekcije bez povećanja memorijskih zahteva. Ta veličina je empirijski određena na 256 redova.

## 2.2 Računanje ocene anomalije

Izlazni rezultat Isolation Forest algoritma je ocena anomalije. Na osnovu unapred definisanog praga, IF algoritam označava pojedinačne tačke kao normalne ili kao anomalije. U suštini, ocena anomalije predstavlja prosečnu dužinu putanje  $h(x)$  u iForest-u, normalizovanu prosečnom dužinom neuspešnih pretraga u binarnom stablu pretrage (Binary Search Tree - BST). U narednom delu biće prikazani pojedinačni sastavni elementi formule za ocenu anomalije.

Prosečna dužina putanje  $h(x)$  za neuspešnu pretragu u binarnom stablu pretrage (BST) za skup podataka veličine  $i$  je data sledećom formulom:

$$h(x) = \begin{cases} 2H(i-1) - \frac{2(i-1)}{i}, & i > 2 \\ 1, & i = 2 \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (2.1)$$

gde je  $H(i)$  harmonijska suma i definisana je kao:

$$H(i) = \ln(i) + \gamma,$$

gde  $\gamma$  predstavlja Euler-Macheroni konstantu i iznosi približno  $\gamma \approx 0,577$ . Visina izolacionog stabla (iTree) je ograničena kako bi se upravljalo memorijskim zahtevima. Formula 2.1 koristi

se za procenu visine stabla u slučajevima kada iTree nije u mogućnosti da izoluje tačku. Ova situacija se naročito javlja kod gustih klastera normalnih tačaka.

Formula za ocenu anomalije je:

$$s(x, N) = 2 \frac{E(h(x))}{c(N)} \quad (2.2)$$

gde je  $x$  bilo koji red u PODACIMA,  $N$  je broj redova u PODACIMA, dok je  $E(h(x))$  prosečna dužina putanje  $h(x)$  u ansamblu.

Ocena anomalije se tumači na sledeći način:

- Ako instanca ima ocenu  $s$  vrlo blizu 1, to znači da je definitivno anomalija.
- Ako instanca ima ocenu  $s$  znatno manju od 0.5, može se prilično sigurno smatrati normalnom instancom.
- Ako sve instance imaju ocenu  $s$  oko 0.5, to znači da u uzorku nema jasnih anomalija.

### 2.3 Isolation Forest Algoritam

Hiperparametri Isolation Forest (IF) modela su:

- $t$  - broj stabala;
- $\psi$  - veličina poduzorka.

Algoritam se sastoji iz dve faze. Prva je faza treniranja u kojoj se kreira šuma (Forest). Druga faza je faza evaluacije, gde se svaka tačka ubacuje u svako stablo I izračunava se prosečna dužina putanje  $h(x)$  za tu tačku. Složenost IF algoritma je ista za obe faze:

$$O(t \cdot \psi \cdot \log \psi)$$

### 2.4 Treniranje

U fazi treniranja vrši se poduzorkovanje i gradi se ansambl izolacionih stabala (iTrees). Visina svakog iTree stabla je ograničena na vrednost  $\log_2 \psi$ , što je približno prosečna visina binarnog stabla pretrage (BST - binary search tree) za veličinu datih podataka [4]. Svako iTree stablo se fokusira na tačke koje imaju kraću putanju od prosečne. Algoritam za treniranje je podeljen u dve funkcije. Rekurzija se koristi u Algoritmu 2 za izgradnju iTree stabla. Izlaz faze treniranja je iForest koji je spreman za ocenjivanje svake tačke.

**Algorithm 1:** *iForest*( $X, t, \psi$ )

**Input:**  $X$  - ulazni podaci,  $t$  - broj stabala,  $\psi$  - veličina poduzorka

**Output:** Skup od  $t$  iTree stabala

Inicijalizuj **Forest**;

Postavi ograničenje visine  $l = \lfloor \log_2 \psi \rfloor$ ;

**for**  $i = 1$  **to**  $t$  **do**

$X' \leftarrow$  poduzorak( $X, \psi$ );

**Forest**  $\leftarrow$  **Forest**  $\cup$  *iTree*( $X', 0, l$ );

**return Forest**;

**Algorithm 2:** *iTree*( $X, e, l$ )

**Input:**  $X$  - ulazni podaci,  $e$  - trenutna visina stabla,  $l$  - ograničenje visine

**Output:** *iTree stablo*  
**if**  $e \geq l$  **or**  $|X| \leq l$  **then**  
    **return** **exNode**  $\{Veličina \leftarrow |X|\}$   
**else**  
    *Neka  $Q$  bude lista atributa u  $X$ ;*  
    *Nasumično izaberi atribut  $q \in Q$ ;*  
    *Nasumično odredi tačku razdvajanja  $p$  između maksimalne i minimalne vrednosti atributa  $q$  u  $X$ ;*  
     $X_l \leftarrow filter(X, q \leq p)$ ;  
     $X_r \leftarrow filter(X, q > p)$ ;  
    **return inNode** $\{ Left \leftarrow iTTree(X_l, e + 1, l),$   
    *Right*  $\leftarrow iTTree(X_r, e + 1, l),$   
    *SplitAtt*  $\leftarrow q,$   
    *SplitValue*  $\leftarrow p\}$ ;

## 2.5 Faza Evaluacije

Izlazni rezultat algoritma u fazi evaluacije je dužina putanje  $h(x)$  za datu tačku. Prosečna vrednost  $h(x)$  u iForest-u se izračunava i koristi se u formuli za ocenu anomalije u relaciji 2.2. U Algoritmu 3, formula 2.1 se koristi za procenu  $h(x)$  u slučajevima kada IF nije u mogućnosti da izoluje tačke.

**Algorithm 3:**  $PathLength(\vec{x}, T, e)$

**Input:**  $\vec{x}$  - instanca,  $T$  - *iTree stablo*,  $e$  - trenutna dužina putanje (inicijalizovana na nulu pri prvom pozivu)

**Output:** Dužina putanje instance  $\vec{x}$

**if**  $T$  je spoljašnji čvor **then**

**return**  $e + c(T.size) // c(\cdot)$  je definisano u formuli (2.1)

**else**

$a \leftarrow T.splitAtt$ ;

**if**  $xa \leq T.splitValue$  **then**

**return**  $PathLength(\vec{x}, T.left, e + 1)$ ;

**else**

**return**  $PathLength(\vec{x}, T.right, e + 1)$ ;

## 2.6 Primer

### 2.6.1 Generisanje Sintetičkih Podataka

U ovom primeru, prvo smo generisali sintetičke podatke koji simuliraju fazne uglove napona u elektroenergetskom sistemu sa tri čvora (Node 1, Node 2, Node 3). Svaki čvor ima 500 uzoraka faznih uglova, gde su vrednosti uglova nasumično generisane koristeći normalnu distribuciju.

- Node 1: Vrednosti faznih uglova su generisane oko nule sa standardnom devijacijom 1.
- Node 2: Vrednosti faznih uglova su generisane oko jedan sa standardnom devijacijom 1.
- Node 3: Vrednosti faznih uglova su generisane oko minus jedan sa standardnom devijacijom 1.

U ovaj skup podataka smo veštački dodali anomalije na nekoliko mesta, kako bismo simulirali moguće abnormalne događaje u elektroenergetskom sistemu:

- Node 1: Anomalije su dodane između 100. i 105. uzorka, gde su vrednosti faznih uglova značajno povećane.
- Node 2: Anomalije su dodane između 250. i 255. uzorka, gde su vrednosti faznih uglova značajno smanjene.
- Node 3: Anomalije su dodane između 400. i 405. uzorka, gde su vrednosti faznih uglova značajno povećane.

Cilj ovog koraka bio je da simulira realne situacije gde se mogu pojaviti nepredviđene promene u sistemu, koje mogu ukazivati na potencijalne kvarove ili nestabilnosti.

## 2.6.2 Treniranje Isolation Forest Modela

Nakon generisanja podataka, primenili smo Isolation Forest algoritam na ove podatke. Isolation Forest koristi nasumično generisana stabla za izolaciju tačaka podataka i detekciju anomalija. Broj stabala (numTrees): Za ovaj primer, postavili smo broj stabala na 100. To znači da smo generisali 100 izolacionih stabala (iTree). Veličina poduzorka (sampleSize): Svako stablo je trenirano na poduzorku veličine 256 uzoraka. Poduzorkovanje pomaže da se smanje efekti "maskiranja" i "swamping-a" anomalija, što su česti problemi kod drugih metoda detekcije. Za svako stablo u šumi izolacionih stabala, nasumično su izabrani atributi i tačke razdvajanja, a zatim je stablo konstruisano na osnovu tih odluka. Na kraju, svaka tačka u podacima je prolazila kroz sva stabla u šumi kako bi se izračunala njena ocena anomalije.

## 2.6.3 Implementacija iTree i PathLength Algoritama

iTree Algoritam (Generisanje izolacionog stabla):

- iTree algoritam koristi nasumično odabrane attribute i tačke razdvajanja za konstrukciju stabla. Stablo se gradi tako da izoluje tačke podataka što brže moguće.
- Svaka grana stabla deli podatke na dva dela (levo i desno podstablo) na osnovu vrednosti atributa u odnosu na nasumično odabranu tačku razdvajanja.
- Stablo se gradi sve dok se ne dostigne maksimalna dubina (ograničenje visine) ili dok svi podaci u čvoru ne budu isti, u kojem slučaju se čvor označava kao "spoljašnji čvor" (leaf node).

PathLength Algoritam (Računanje dužine putanje):

- Za svaku tačku podataka, PathLength algoritam računa dužinu putanje od korena do čvora gde se tačka izoluje.
- Dužina putanje je merilo koliko brzo se tačka izoluje u stablu. Anomalijske tačke se obično izoluju brže (kraće putanje), dok normalne tačke imaju duže putanje.
- Konačna ocena anomalije za svaku tačku se dobija prosekom dužine putanja preko svih stabala u šumi.

## 2.6.4 Detekcija i Vizuelizacija Anomalija

Konačna ocena anomalije za svaku tačku je izračunata na osnovu dužine putanja kroz sva stabla. Ova ocena pokazuje koliko je verovatno da je neka tačka anomalija.

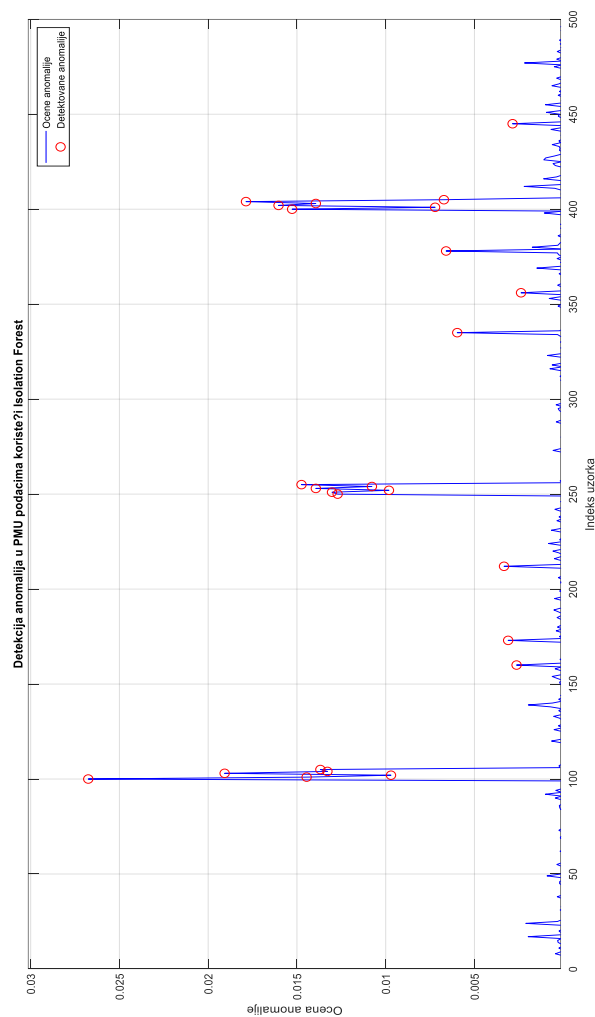
- Prag za detekciju: Postavili smo prag na 95. percentil ocena anomalija. To znači da su tačke sa ocenom anomalije većom od ovog praga označene kao anomalije.
- Vizualizacija rezultata: Ocene anomalija su prikazane na grafikonu, gde su tačke iznad praga označene crvenim tačkama. Ova vizualizacija omogućava operaterima da brzo identifikuju i analiziraju anomalijske tačke.

Slika 3 prikazuje ocene anomalija za svaki uzorak podataka izračunate korišćenjem Isolation Forest algoritma. Na ovom grafikonu su prikazane sve ocene anomalija duž  $y$ -ose, dok je  $x$ -osa indeks uzorka. Na slici plava linija predstavlja ocene anomalija za svaki uzorak. Svaka tačka na ovoj liniji odgovara oceni koja je dodeljena uzorku na osnovu njegove dužine putanje kroz šumu izolacionih stabala. Crvene tačke označavaju uzorke koji su detektovani kao anomalije. Prag za detekciju je postavljen na 95. percentil, tako da su samo uzorci sa najvišim ocenama (iznad praga) označeni kao anomalije. Ove tačke su od velikog interesa jer predstavljaju odstupanja od normalnog ponašanja u sistemu. Apscisa predstavlja redni broj svakog uzorka u skupu podataka. Kroz ovaj prikaz može se videti gde se tačno u skupu podataka pojavljuju anomalije. Ocena anomalije je smeštena na ordinatu i predstavlja izračunatu vrednost koja pokazuje koliko je verovatno da je uzorak anomalija. Više vrednosti ukazuju na veću verovatnoću da je uzorak anomalija.

Postavlja se suštinsko pitanje kako tumačiti rezultate. Ako se uočava da određene crvene tačke (anomalije) značajno odstupaju od ostatka uzoraka, to može ukazivati na ozbiljne probleme u sistemu. Prikaz distribucije ocena anomalija kroz sve uzorke može pomoći u razumevanju koliko su anomalije raširene i da li su koncentrisane na određenim mestima.

Operatorima prenosnog sistema nakon detekcija anomalija predstoji da istraže njihov uzrok. Prvi korak uključuje upoređivanje detektovanih anomalija sa podacima iz SCADA sistema (Supervisory Control and Data Acquisition). SCADA podaci mogu pružiti informacije o stanju opreme, tokovima snage, i drugim relevantnim parametrima u vremenu kada su anomalije detektovane. Upoređivanjem ovih podataka sa rezultatima Isolation Forest algoritma, operateri mogu odrediti da li su anomalije posledica fizičkih promena u sistemu, kao što su preopterećenje linija, kvarovi na opremi, ili nepravilnosti u prenosu snage. Operatori bi trebalo da pregledaju istorijske podatke sa PMU uređaja kako bi utvrdili da li su slične anomalije primećene u prošlosti. Ako su slične anomalije već zabeležene, analize tih događaja mogu pomoći u razumevanju potencijalnih uzroka trenutnih anomalija.

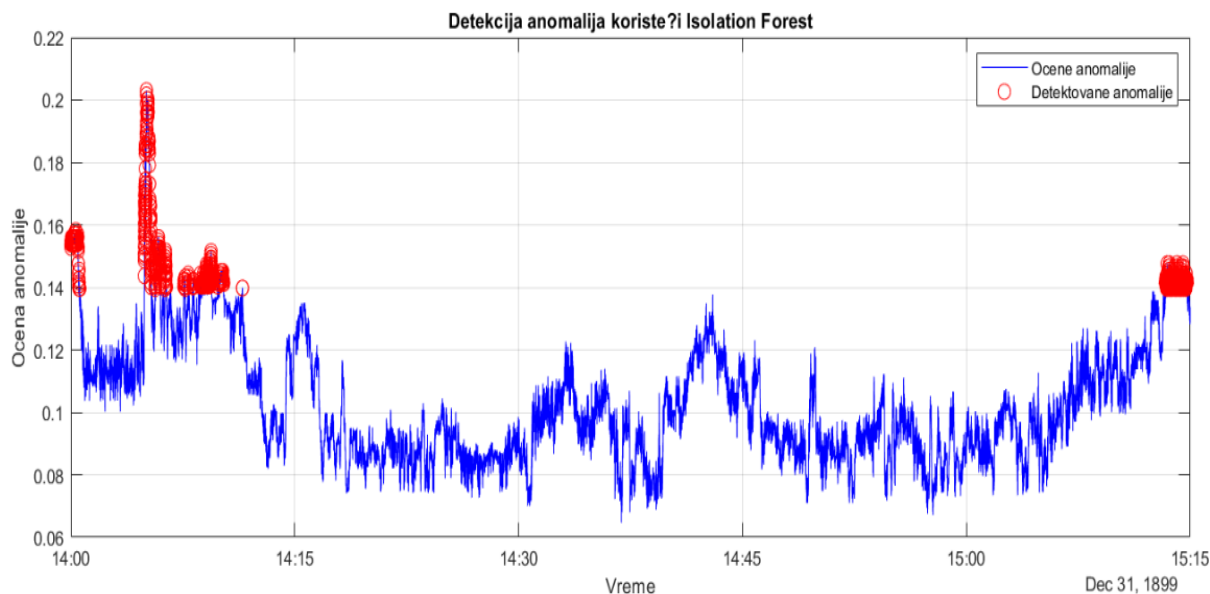
U slučajevima gde SCADA i istorijski podaci ne pružaju dovoljno informacija, operateri mogu odlučiti da sprovedu vizuelnu inspekciju na terenu ili koriste daljinsku dijagnostiku kako bi procenili stanje opreme na lokacijama gde su anomalije detektovane. Ovaj korak može biti posebno koristan ako se sumnja na fizički kvar opreme ili nepravilnosti u postrojenju.



Slika 3. Detekcija anomalija u PMU podacima

Uzet je još jedan primer iz veoma značajnog događaja od 8. januara 2021. godine kada je došlo do razdvajanja ENTSO-e interkonekcije na dva dela. Isolation forest algoritam je urađen na realnim merenjima sa PMU uređaja koja su dostavljena u cilju analize događaja. Analizirana je frekvencija sa 17 PMU uređa iz Švajcarske, Italije, Hrvatske, Slovenije, Danske, Turske, Grčke, Portugalije, Nemačke i Španije. Možemo jasno videti sa slike 4 anomalije u dva vremenska trenutka i to razdvajanje i ponovno spajanje interkonekcije. Operatori jasno mogu uočiti probleme.





Slika 4. Isolation forest algoritam za razdvajanje interkonekcije

### 3 AUTOENCODERS ALGORITAM

Autoencoders su vrsta neuronske mreže koja se često koristi za detekciju anomalija, posebno u situacijama gde je potrebno raditi sa visokodimenzionalnim podacima. Oni funkcionišu tako što uče da rekonstruišu ulazne podatke, a razlika između ulaznih i rekonstruisanih podataka može biti indikator anomalije. U nastavku ću vam objasniti kako autoencoders funkcionišu u kontekstu detekcije anomalija, prikazaću ključne matematičke formule i algoritme.

#### 3.1 Struktura autoencoders algoritma

Autoencoder se sastoji od tri glavne komponente:

- Enkoder: Ovaj deo mreže kompresuje ulazne podatke u manji broj dimenzija, stvarajući latentni prostor (eng. latent space) sa značajnim informacijama.
- Latentni prostor: Ovo je srednji sloj koji sadrži kompresovanu reprezentaciju ulaznih podataka.
- Dekoder: Ovaj deo mreže pokušava da rekonstruiše originalne ulazne podatke iz latentnog prostora.

#### 3.2 Matematička formulacija problema

Neka je  $x$  ulazni podatak. Cilj autoencoder-a je da nauči funkcije  $f(\cdot)$  i  $g(\cdot)$  koje minimiziraju razliku između ulaznog podatka  $x$  i njegovog rekonstruisanog oblika  $\hat{x}$ .

Enkoder funkciju  $f(\cdot)$  može se uvesti na sledeći način:

$$z = f(x) = \sigma(\mathbf{W}_1 \mathbf{x} + \mathbf{b}_1),$$

gde je  $\mathbf{z}$  latentna reprezentacija,  $\mathbf{W}_1$  je težinska matrica,  $\mathbf{b}_1$  je bias, dok je  $\sigma(\cdot)$  aktivaciona funkcija.

Dekoder funkciju  $g(\cdot)$  može se uvesti na sledeći način:

$$\hat{\mathbf{x}} = g(\mathbf{z}) = \sigma(\mathbf{W}_2 \mathbf{z} + \mathbf{b}_2),$$

gde je  $\hat{\mathbf{x}}$  rekonstruisani podatak,  $\mathbf{W}_2$  je težinska matrica,  $\mathbf{b}_2$  je bias, dok je  $\sigma(\cdot)$  aktivaciona funkcija.

Funkcija gubitaka, u oznaci  $\mathcal{L}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}})$  definiše se kao

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) = \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|^2,$$

gde se minimizuje razlika (*rekonstrukciona greška*) između originalnog podatka  $\mathbf{x}$  i rekonstruisanog podatka  $\hat{\mathbf{x}}$ .

### 3.3 Detekcija anomalija

Nakon što je autoenkoder treniran na normalnim podacima, može se koristiti za detekciju anomalija. Ako je ulazni podatak anomalija, autoenkoder će imati veći *rekonstrukciona greška*, jer će biti teško rekonstruisati podatak koji se razlikuje od onih na kojima je mreža trenirana. *Rekonstrukciona greška* biće definisana kao:

$$\varepsilon(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|^2.$$

Smatra se da ako je  $\varepsilon(\mathbf{x})$  veće od određenog praga,  $\mathbf{x}$  se smatra anomalijom.

### 3.4 Algoritam za treniranje i detekciju anomalija

Treniranje autoenkodera u ovom radu je urađeno prema sledećem algoritmu:

**Algorithm 4:** *Treniranje Autoencoder-a*

**Input:** *Skup podataka  $\mathbf{X}$ , broj epoha  $N$ , stopa učenja  $\eta$*

**Output:** *Trenirani model autoencoder-a*

*Inicijalizuj težinske matrice  $\mathbf{W}_1$ ,  $\mathbf{W}_2$  i bias vektore  $\mathbf{b}_1$ ,  $\mathbf{b}_2$ ;*

**for** *epoch = 1 to  $N$  do*

**for** *svaki podatak  $\mathbf{x}$  iz skupa  $\mathbf{X}$  do*

*Prođi podatak kroz encoder da dobiješ  $\mathbf{z} = f(\mathbf{x})$ ;*

*Prođi  $\mathbf{z}$  kroz decoder da dobiješ  $\hat{\mathbf{x}} = g(\mathbf{z})$ ;*

*Izračunaj rekonstrukcionu grešku  $\varepsilon(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|^2$ ;*

*Izvrši unazadno propagiranje (backpropagation) da ažuriraš težine*

*$\mathbf{W}_1$ ,  $\mathbf{W}_2$  i bias-ove;*

**return** *trenirani model autoencoder-a;*

Algoritam za detekciju anomalija, korišćenjem autoenkodera je urađen prema sledećem algoritmu:

**Algorithm 5:** *Detekcija Anomalija koriscenjem Autoencoder-a*

**Input:** *Trenirani model autoencoder-a, novi podatak  $\mathbf{x}$ , prag  $\tau$*

**Output:** *Da li je  $\mathbf{x}$  anomalija*

*Prođi  $\mathbf{x}$  kroz encoder da dobiješ  $\mathbf{z} = f(\mathbf{x})$ ;*

*Prođi  $\mathbf{z}$  kroz decoder da dobiješ  $\hat{\mathbf{x}} = g(\mathbf{z})$ ;*

*Izračunaj rekonstrukcionu grešku  $\varepsilon(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|^2$ ;*

**if**  $\varepsilon(\mathbf{x}) > \tau$  **then**

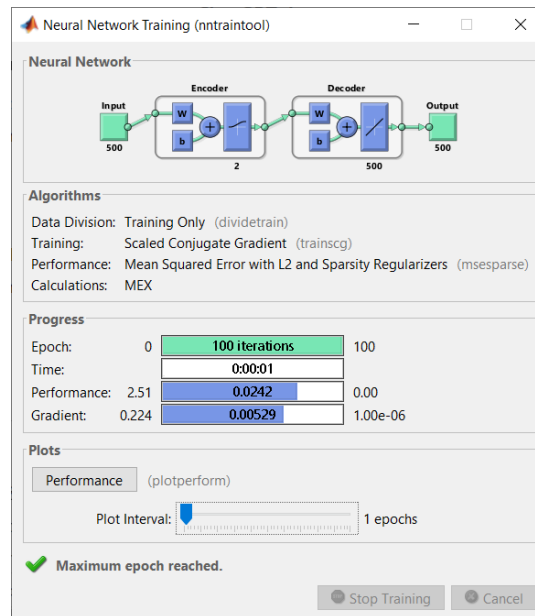
*Obeleži  $\mathbf{x}$  kao anomaliju;*

**else**

*$\mathbf{x}$  je normalan podatak;*

### 3.5 Primer

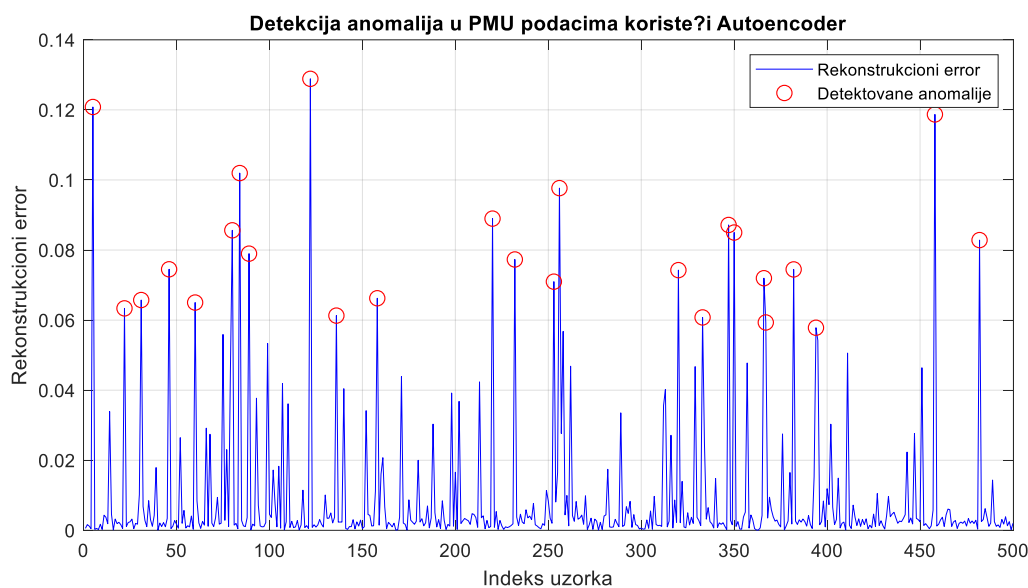
Uzet je isti primer kao za Isolation Forest algoritam, gde su generisani sintetički podaci za tri čvora (Node 1, Node 2, Node 3) u elektroenergetskom sistemu. Svaki čvor sadrži 500 uzoraka faznih uglova napona, gde su vrednosti uglova nasumično generisane korišćenjem normalne distribucije. U ovaj skup podataka dodate su veštačke anomalije kako bi se simulirale abnormalne situacije u sistemu. Treniranje Autoencoder-a Neuronska mreža, u formi autoencoder-a, trenirana je korišćenjem normalnih podataka bez anomalija, slika 5.



Slika 5. testiranje neuralne mreže

Autoenkoder je mreža sa tri sloja: Ulazni sloj koji prima originalne podatke, Latentni sloj (hidden layer) sa manjim brojem neurona, koji kompresuje podatke i omogućava modelu da nauči značajne karakteristike, Izlazni sloj koji pokušava da rekonstruiše originalne podatke iz latentnog prostora. Latentni prostor je kreiran sa dva neurona, što omogućava modelu da nauči kompresovanu reprezentaciju podataka. Mreža je trenirana da minimizira razliku između ulaznih podataka i rekonstruisanih podataka. Nakon treninga, model je sposoban da precizno rekonstruiše normalne podatke, dok rekonstrukcija anomalijskih podataka ima veći *rekonstrukcionu grešku*. Nakon treninga, autoenkoder je korišćen za rekonstrukciju svih uzoraka u skupu podataka, uključujući one sa anomalijama. *Rekonstrukciona greška* za svaki uzorak izračunat je kao kvadratna razlika između originalnih i rekonstruisanih podataka. Očekuje se da će uzorci koji sadrže anomalije imati značajno veću rekonstrukcionu grešku poređenju sa normalnim uzorcima, jer autoenkoder nije treniran na takvim uzorcima i nije u mogućnosti da ih precizno rekonstruiše. Prag za detekciju anomalija postavljen je na 95. percentil rekonstrukcione greške. Uzorci čiji *rekonstrukciona greška* prelazi ovaj prag označeni su kao anomalije. Ovaj pristup omogućava identifikaciju najekstremnijih odstupanja u skupu podataka.

Na slici 6, prikazane su *rekonstrukcione greške* za sve uzorke. Plava linija prikazuje *rekonstrukcionu grešku* za svaki uzorak, dok crvene tačke označavaju uzorke koji su identifikovani kao anomalije. Ovaj prikaz omogućava jasan uvid u to gde se u skupu podataka nalaze anomalije i koliki je njihova *rekonstrukciona greška* u odnosu na normalne uzorke.



Slika 6. rezultati Autoencoder algoritma

#### 4 ZAKLJUČAK

U ovom radu, dva različita algoritma za detekciju anomalija — Isolation Forest i Autoencoder — primenjena su na isti skup sintetičkih podataka sa ciljem da se uporedi njihova efikasnost i ponašanje u identifikaciji anomalija u elektroenergetskom sistemu.

Oba pristupa koriste identičan skup podataka, koji sadrži 500 uzoraka za svaki od tri čvora (Node 1, Node 2, Node 3). Ovi podaci uključuju normalne vrednosti faznih uglova napona, kao i veštački generisane anomalije koje simuliraju abnormalne događaje u sistemu.

Isolation Forest pristup koristi nasumično generisana stabla za izolaciju podataka, gde je dužina putanje kroz stablo ključna metrika za identifikaciju anomalija. Kratke putanje obično označavaju anomalijске tačke.

Autoencoder pristup koristi neuronsku mrežu za učenje kompresovane reprezentacije normalnih podataka, i detektuje anomalije na osnovu rekonstrukcione greške, gde se veća greška koristi kao indikator anomalije.

Što se efikasnosti u detekciji anomalija isolation forest je pokazao sposobnost da identifikuje anomalije koristeći karakteristiku kratke putanje kroz šumu izolacionih stabala. Ovaj pristup je robustan u detekciji odstupanja, čak i kada su anomalije relativno retke. Isolation Forest je efikasan u radu sa velikim skupovima podataka, jer koristi poduzorkovanje i ne zavisi od dimenzionalnosti podataka. Algoritam zahteva unapred definisan broj stabala i veličinu poduzorka, što može uticati na rezultate ako nisu optimalno postavljeni.

Autoencoder je uspešno detektovao anomalije na osnovu rekonstrukcione greške, gde su anomalijске tačke imale značajno veću grešku u poređenju sa normalnim uzorcima. Ovaj pristup je posebno koristan za rad sa visokodimenzionalnim podacima, gde su odnosi između varijabli složeni. Treniranje autoencoder-a zahteva više vremena i resursa, posebno za optimizaciju hiperparametara kao što su broj neurona u latentnom sloju, broj epoha, i regularizacija. Takođe, performanse autoencoder-a zavise od kvaliteta podataka na kojima je treniran, i može se desiti da ne uspe da precizno rekonstruiše kompleksne anomalije.

Što se prednosti i nedostataka tiče:

- **Isolation Forest:**
  - Prednosti: Jednostavan za implementaciju i brzo treniranje. Nije potrebno unapred poznavanje distribucije podataka. Efikasan za rad sa velikim skupovima podataka.
  - Nedostaci: Performanse mogu zavisiti od izbora hiperparametara (broj stabala, veličina poduzorka). Može biti manje efikasan za detekciju složenijih anomalija koje nisu lako izolovane.
- **Autoencoder:**
  - Prednosti: Može detektovati složene anomalije u visokodimenzionalnim podacima. Fleksibilan pristup koji se može prilagoditi različitim tipovima podataka.
  - Nedostaci: Trening je složeniji i zahteva više resursa. Osetljiv na kvalitet podataka na kojima je treniran; može imati problema sa generalizacijom.

U praksi, izbor između Isolation Forest i Autoencoder pristupa zavisi od specifičnog konteksta i potreba aplikacije. Isolation Forest može biti preferirani izbor kada je brzina treniranja i jednostavnost implementacije ključna, dok bi Autoencoder mogao biti bolji izbor za detekciju anomalija u složenijim sistemima gde su odnosi između varijabli kompleksni i teško ih je modelovati sa tradicionalnim metodama.

## 5 LITERATURA

- [1] Khaledian, Ehdieh, et al. "Real-time synchrophasor data anomaly detection and classification using isolation forest, kmeans, and loop." *IEEE Transactions on Smart Grid* 12.3 (2020): 2378
- [2] Wu, Tong, Ying-Jun Angela Zhang, and Xiaoying Tang. "Isolation forest based method for low-quality synchrophasor measurements and early events detection." *2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*. IEEE, 2018.
- [3] Liu, Fei Tony, Kai Ming Ting, and Zhi-Hua Zhou. "Isolation forest." *2008 eighth ieee international conference on data mining*. IEEE, 2008.
- [4] Ding, Zhiguo, and Minrui Fei. "An anomaly detection approach based on isolation forest algorithm for streaming data using sliding window." *IFAC Proceedings Volumes* 46.20 (2013): 12-17.
- [5] Ehsani, Narges, Farrokh Aminifar, and Hamed Mohsenian-Rad. "Convolutional autoencoder anomaly detection and classification based on distribution PMU measurements." *IET Generation, Transmission & Distribution* 16.14 (2022): 2816-2828.
- [6] Niazazari, Iman, and Hanif Livani. "A PMU-data-driven disruptive event classification in distribution systems." *Electric Power Systems Research* 157 (2018): 251-260.
- [7] Lin, You, Jianhui Wang, and Mingjian Cui. "Reconstruction of power system measurements based on enhanced denoising autoencoder." *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. IEEE, 2019.
- [8] Adam, Valenta. *Anomaly detection using the Extended Isolation Forest algorithm*. MS thesis. Czech Technical University in Prague. Computing and information center., 2020.
- [9] Mahapatra, Kaveri. *Data Anomaly Detection and Correction in PMU Measurements for Wide-Area Monitoring Applications*. Diss. The Pennsylvania State University, 2020.
- [10] Phadke, Arun G. "Synchronized phasor measurements-a historical overview." *IEEE/PES transmission and distribution conference and exhibition*. Vol. 1. IEEE, 2002.

**ANOMALY DETECTION IN POWER SYSTEMS USING PMU DATA:  
APPLICATION OF STATISTICAL METHODS AND MACHINE LEARNING  
ALGORITHMS**

**VLADIMIR BEČEJAC, ALEKSANDAR GEORGIJEV, MILOŠ JOVANOVIĆ  
JSC ELEKTROMREŽA SRBIJE**

**BELGRADE**

**SERBIA**

*Abstract*— This paper explores anomaly detection methods in power systems using data collected from Phasor Measurement Units (PMU) devices. The focus is on identifying deviations in voltage angles, which may indicate potential faults or instabilities. Statistical methods and machine learning algorithms, such as Isolation Forest and autoencoders, were used to analyze large datasets. The results demonstrate that these methods can effectively identify anomalies, allowing operators to take preventive measures and enhance the stability of power systems. This research provides a foundation for improving network monitoring and maintenance systems.

*Key words* — PMU, machine learning, big data analysis

**DETEKCIJA ANOMALIJA U ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA  
KORIŠĆENJEM PMU PODATAKA: PRIMENA STATISTIČKIH METODA I  
ALGORITAMA MAŠINSKOG UČENJA**

**ANOMALY DETECTION IN POWER SYSTEMS USING PMU DATA:  
APPLICATION OF STATISTICAL METHODS AND MACHINE LEARNING  
ALGORITHMS**

**VLADIMIR BEČEJAC, ALEKSANDAR GEORGIEV, MILOŠ JOVANOVIĆ  
AD ELEKTROMREŽA SRBIJE**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj - Ovaj rad ispituje metode za detekciju anomalija u elektroenergetskim sistemima korišćenjem podataka prikupljenih sa Phasor Measurement Units (PMU) uređaja. PMU uređaji omogućavaju precizna merenja fazora napona i struje u realnom vremenu, što pruža uvid u stanje mreže u svakom trenutku. Fokus je na prepoznavanju odstupanja u uglovima napona, koja mogu ukazivati na potencijalne kvarove ili nestabilnosti u sistemu. U radu se primenjuju statističke metode i algoritmi mašinskog učenja, kao što su Isolation Forest i autoencoders, za analizu velikih količina podataka. Ovi algoritmi omogućavaju identifikaciju anomalija koje bi mogle proći neopaženo tradicionalnim metodama detekcije. Isolation Forest koristi nasumično generisana stabla za izolaciju podataka, gde je dužina putanje kroz stablo ključna za prepoznavanje anomalija. S druge strane, autoencoders su neuronske mreže koje uče da rekonstruišu ulazne podatke, a velika razlika između originalnog i rekonstruisanog podatka može ukazivati na anomaliju. Rezultati pokazuju da obe metode mogu efikasno identifikovati anomalije u elektroenergetskim sistemima, omogućavajući operaterima da reaguju preventivno i preduzmu mere koje će poboljšati stabilnost sistema. Isolation Forest algoritam se pokazao kao robustan za detekciju odstupanja čak i u situacijama gde su anomalije relativno retke. Autoencoder algoritmi su posebno efikasni u radu sa visokodimenzionalnim podacima, gde su odnosi između varijabli složeni i teško ih je modelovati tradicionalnim tehnikama. Ovo istraživanje pruža osnovu za unapređenje sistema za nadzor i održavanje mreža, čime se smanjuje rizik od kaskadnih kvarova i povećava pouzdanost elektroenergetskih sistema.*

**Ključne reči – PMU, machine learning, big data analysis**



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.112B](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.112B)

C2 07

## OPTIMIZACIJA POSTAVLJANJA PMU UREĐAJA ZA POBOLJŠANU OPSERVABILNOST MREŽE KORIŠĆENJEM MATLAB-A

DR VLADIMIR BEČEJAC  
ELEKTROMREŽA SRBIJE

BEOGRAD

SRBIJA

***Kratak sadržaj*** — U ovom radu predstavljen je razvoj i implementacija MATLAB aplikacije za optimalno postavljanje PMU (Phasor Measurement Units) uređaja u elektroenergetski sistem. Cilj aplikacije je maksimizacija pouzdanosti i efikasnosti nadzora sistema, osiguravajući potpunu topološku opservabilnost mreže. Kroz korišćenje linearnih i naprednih optimizacionih metoda (Particle Swarm Optimization), aplikacija identifikuje najbolje lokacije za PMU uređaje uzimajući u obzir klasične analize, N-1 analize i postojeće PMU uređaje. Opisane aktivnosti su sprovedene kroz evropski Horizon 2020 projekat Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R2D2.

***Ključne reči*** — Optimisation, PSO, N-1, linear programming

### 1 UVOD

Elektroenergetski sistem je sastavljen od različitih komponenti koje omogućavaju pretvaranje različitih vrsta energije u električnu, kao i njeno prenošenje, distribuciju i korišćenje. Ključne veličine koje opisuju stanje elektroenergetskog sistema uključuju napon, struju, fazore i frekvenciju. Svi ovi parametri, osim frekvencije, variraju u različitim delovima sistema. Da bi sistem funkcionisao ispravno, neophodno je pratiti ove parametre kako bi se obezbedilo optimalno funkcionisanje, pouzdanost, bezbednost, analiza kritičnih situacija, kao i obnova sistema u slučaju kvara [1]. Nadzorni sistemi obavljaju tri osnovne funkcije: određivanje



topologije mreže, utvrđivanje posmatranja sistema i procenu stanja sistema. Tradicionalno, parametri kao što su napon i struja prate se putem SCADA sistema (sistema za nadzor i prikupljanje podataka). Međutim, SCADA sistemi ne zadovoljavaju zahteve savremenih elektroenergetskih sistema [2–4], jer imaju nisku rezoluciju (od 2 do 4 sekunde) i ne mogu pružiti informacije o fazorima, frekvenciji i brzini promene frekvencije. Izveštaj o nestanku struje koji se desio 14. avgusta 2003. godine na severoistoku SAD-a, a koji je objavila Severnoamerička korporacija za pouzdanost električne energije (NERC), pokazao je da je fazni ugao između zapadnog Mičigena i Klivlenda kontinuirano rastao tokom jednog sata. Da su operateri na vreme imali pristup tim informacijama, mogli su preduzeti odgovarajuće mere kako bi sprečili dalje širenje nestanka električne energije tj. blackout-a [5,6].

Savremeni elektroenergetski sistemi sve više uključuju obnovljive izvore energije, inteligentne uređaje, baterije, pumpe i napredne sisteme zaštite i kontrole, što zahteva brze i pouzdane nadzorne sisteme za sigurno upravljanje i funkcionisanje sistema. Pored praćenja veličina kao što su napon i struja, važno je pratiti i fazorske informacije. Ekstremno važan podatak je ugao napona.

Koncept praćenja fazora u elektroenergetskim sistemima prvi put je predstavljen 1980. godine od strane profesora Phadkea na Virginia Tech univerzitetu u SAD. Prvi praktični uređaj za merenje fazora, poznat kao fazorska merna jedinica (PMU), razvijen je 1988. godine, a komercijalna proizvodnja PMU uređaja počela je 1991. godine zahvaljujući saradnji između kompanije Macrodyne i Virginia Tech univerziteta [7,8].

Danas, PMU uređaji imaju široku primenu u elektroenergetskim sistemima, uključujući primenu u pametnim mrežama, integraciju obnovljivih izvora energije, dinamičko upravljanje, kontrolu u realnom vremenu, kontrolu frekvencije, procenu stanja sistema, adaptivnu zaštitu, automatizovane sisteme za upravljanje energijom (EMS), praćenje preopterećenja, nadzor stabilnosti, obnovu sistema nakon poremećaja, i analizu incidenata [9–12]. Široko područje monitoringa elektroenergetskog sistema, poznato kao sistem za merenje u širokom području (WAMS), ne bi bilo moguće bez integracije PMU uređaja. U tabeli 1 je dato kratko poređenje SCADA i PMU tehnologije.

Tabela 1. Karakteristike SCADA i PMU tehnologije

Karakteristika	SCADA	PMU
<b>Sinhronizacija sa univerzalnim vremenom</b>	Nije precizna	Precizna
<b>Lokalno određivanje faznih uglova</b>	Nije moguće	Moguće
<b>Brzina izveštavanja</b>	Jednom u (2 do 4) sekundi	(10/12/15/20/30/60 okvira) u sekundi
<b>Kašnjenje u protoku podataka</b>	Visoko	Zanemarljivo
<b>Prikaz stanja elektroenergetskog sistema</b>	Statičko stanje	Dinamičko stanje

<b>Ukupan broj ulazno/izlaznih kanala</b>	100+ analognih i digitalnih	10 fazora, 32+ analognih i digitalnih
<b>Način komunikacije</b>	Serijska komunikacija	Mrežna komunikacija

U ovom radu će biti predstavljena metoda i aplikacija programirana u Matlabu, sa grafičkim interfejsom.

## 2 OPTIMIZACIJA INSTALACIJE PMU UREĐAJA

Za poslednjih nekoliko decenija razvijeno je mnogo metoda, što klasičnih, što metaheurističkih, kako bi se problem optimalne postavke PMU uređaja prevazišao. Lako se pokazuje da bi mreža bila potpuno opservabilna u topološkom smislu, nije potrebno postavljati PMU uređaje u svaki čvor. Prolazeći kroz sve objavljene radove i praveći kriterijum prema optimizacionoj metodi dolazimo do tabele 2.

Tabela 2. Kriterijumi prema optimizacionoj metodi

<b>Tehnike</b>	<b>Podkategorije</b>	<b>Metode</b>
<b>Konvencionalne tehnike (Optimalno rešenje)</b>	<b>Matematička alternativna pretraga</b>	Proždrljivi algoritam, Linearno programiranje, Nelinearno programiranje
	<b>Iscrpna pretraga</b>	Teorija grafova, Binarna pretraga
<b>Nekonvencionalne tehnike (Optimalno rešenje)</b>	<b>Heuristika</b>	Monte Karlo simulacija, Fazi odlučivanje, Ujedinjeni algoritam
	<b>Metaheuristika</b>	Hemijska reakcija, Kukavica pretraga, Diferencijalna evolucija, Gravitaciona pretraga, Genetski algoritam, Rojevi čestica, Automata sa učenjem, Veštačka pčelinja kolonija, Kolonija mrava, Binarna imperijalistička kompeticija, Tabu pretraga, Simulirano kaljenje

### 2.1 Formulacija problema

Problem može biti formulisan na sledeći način: Kriterijumska funkcija koju posmatramo se može predstaviti kao

$$\min \sum_{k=1}^n w_k x_k, \quad (1)$$

gde je  $x_k = \{0,1\}$  promenljiva,  $w_k$  težinski faktor i može da predstavlja cenu instalacije PMU uređaja u nekom čvoru,  $n$  je broj čvorova. Ukoliko je  $x_k = 0$  u čvoru  $k$  ne treba postaviti PMU, dok  $x_k = 1$  implicira da treba postaviti. Uslovi (linearnog karaktera) su

$$Ax \geq 1 \quad (2)$$

gde  $A$  predstavlja matricu incidencije i njeni članovi, oblika,  $a_{ij}$ , su takođe binarne vrednosti, opšteg oblika

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ako } i = j \\ 1, & \text{ako su } i \text{ i } j \text{ povezani} \\ 0, & \text{ako } i \text{ i } j \text{ nisu povezani} \end{cases} \quad (3)$$

### 3 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

Ciljna funkcija je minimizacija broja PMU uređaja potrebnih za potpuno opažanje elektroenergetskog sistema.

$$\text{Minimize } f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

gde je:

- $N$  broj čvorova u elektroenergetskoj mreži.
- $x_i$  binarna promenljiva koja označava da li je PMU postavljen u čvor.

Ograničenja osiguravaju da svi čvorovi u mreži budu potpuno opaženi PMU uređajima. Ovo znači da svaki čvor mora ili direktno imati PMU ili biti povezan sa čvorom koji ima PMU.

$$\sum_{j \in N(i)} x_j \geq 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

gde je  $N(i)$  skup svih susednih čvorova (uključujući i sam čvor  $i$ ) u mreži.

U PSO algoritmu, populacija (roj) se sastoji od  $P$  čestica, gde svaka čestica predstavlja potencijalno rešenje problema postavljanja PMU uređaja.

a) *Pozicija čestice:*

Pozicija svake čestice  $i$  u iteraciji  $t$  predstavlja rešenje i definisana je kao:

$$\mathbf{x}_i^{(t)} = [x_{i1}^{(t)}, x_{i2}^{(t)}, \dots, x_{iN}^{(t)}] \quad (6)$$

gde je:

- $x_{ij}^{(t)} \in \{0, 1\}$  binarna promenljiva koja označava prisustvo PMU uređaja na čvoru  $j$ .

b) *Brzina čestice:*

Brzina čestice  $i$  u iteraciji  $t$  je definisana kao:

$$\mathbf{v}_i^{(t+1)} = w\mathbf{v}_i^{(t)} + c_1r_1(\mathbf{p}_i^{\text{best}} - \mathbf{x}_i^{(t)}) + c_2r_2(\mathbf{g}^{\text{best}} - \mathbf{x}_i^{(t)}) \quad (7)$$

gde je:

- $\mathbf{v}_i^{(t)}$  brzina čestice  $i$  u iteraciji  $t$ .
- $w$  inercioni faktor.
- $c_1$  i  $c_2$  faktori ubrzanja.
- $r_1$  i  $r_2$  slučajne vrednosti između 0 i 1.
- $\mathbf{p}_i^{\text{best}}$  najbolja prethodna pozicija čestice  $i$ .
- $\mathbf{g}^{\text{best}}$  globalno najbolja pozicija među svim česticama.

c) *Ažuriranje pozicije čestice:*

Nova pozicija čestice  $i$  u iteraciji  $t+1$  se ažurira na sledeći način:

$$\mathbf{x}_i^{(t+1)} = \mathbf{x}_i^{(t)} + \mathbf{v}_i^{(t+1)} \quad (8)$$

Pošto se radi o binarnom problemu, potrebno je brzinu transformisati u verovatnoću, te koristiti sigmoidnu funkciju:

$$s(\mathbf{v}_i^{(t+1)}) = \frac{1}{1 + e^{-\mathbf{v}_i^{(t+1)}}} \quad (9)$$

Nakon toga, pozicija se ažurira kao:

$$x_{ij}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, & \text{ako } r < s(v_{ij}^{(t+1)}) \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (10)$$

gde je  $r$  slučajna vrednost između 0 i 1.

PSO algoritam se izvršava sve dok se ne ispuni jedan od sledećih uslova:

- Maksimalan broj iteracija.
- Konvergencija rešenja.

Ovim matematičkim modelom, Particle Swarm Optimization može se koristiti za optimizaciju postavljanja PMU uređaja, minimizirajući broj potrebnih PMU uređaja i obezbeđujući potpuno posmatranje elektroenergetskog sistema.

Metodom možemo dobiti više rešenja koja zadovoljavaju sva navedena ograničenja i minimiziraju kriterijumsku funkciju. Kako bi se kvantitativno uporedila sva dobijena rešenja i najbolje moguće izdvojilo, uveden je pojam SORI (System Observability Redundancy Index) koji se dobija kao zbir svih BOI (Bus Observability Index). Indeks BOI se matematički definiše kao broj PMU uređaja koji nadgleda neki čvor mreže, bilo direktno ili indirektno.

### 3.1 Primer

U nastavku će biti predstavljen primer problema optimizacije postavljanja PMU uređaja u malom elektroenergetskom sistemu sa 5 čvorova korišćenjem Particle Swarm Optimization (PSO) tehnike.

Pretpostavimo da imamo elektroenergetski sistem sa 5 čvorova. Mreža se može opisati matricom povezanosti (adjacency matrix), gde je vrednost 1 između čvorova označava da su povezani, a 0 da nisu povezani:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Svaki čvor mora biti pokriven PMU uređajem. To znači da čvor može ili imati PMU direktno na sebi ili biti povezan sa nekim čvorom koji ima PMU.

Ograničenja za ovaj sistem su:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + x_3 &\geq 1 && \text{(za čvor 1)} \\ x_1 + x_2 + x_4 &\geq 1 && \text{(za čvor 2)} \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_5 &\geq 1 && \text{(za čvor 3)} \\ x_2 + x_4 + x_5 &\geq 1 && \text{(za čvor 4)} \\ x_3 + x_4 + x_5 &\geq 1 && \text{(za čvor 5)} \end{aligned}$$

Pretpostavimo da imamo populaciju (roj) od 3 čestice, i svaka čestica predstavlja moguće rešenje.

a) *Početne pozicije:*

Početne pozicije (čestice) mogu biti:

- Čestica 1:  $\mathbf{x}_1 = [1, 0, 0, 1, 0]$
- Čestica 2:  $\mathbf{x}_2 = [0, 1, 0, 0, 1]$
- Čestica 3:  $\mathbf{x}_3 = [0, 0, 1, 1, 0]$

*b) Izračunavanje ciljne funkcije:*

Za svaku česticu izračunajmo vrednost ciljne funkcije (broj PMU uređaja):

- $f(\mathbf{x}_1) = 2$  (PMU uređaji su na čvorovima 1 i 4)
- $f(\mathbf{x}_2) = 2$  (PMU uređaji su na čvorovima 2 i 5)
- $f(\mathbf{x}_3) = 2$  (PMU uređaji su na čvorovima 3 i 4)

Sve čestice trenutno zadovoljavaju ograničenja jer svi čvorovi imaju pokrivenost PMU uređajima.

*c) Ažuriranje brzine i pozicije:*

Brzina i pozicija svake čestice se ažuriraju na osnovu pravila PSO algoritma koristeći prethodno opisanu formulu. Na primer, pretpostavimo da nakon ažuriranja imamo:

- $\mathbf{x}_1^{(1)} = [1, 0, 0, 0, 1]$
- $\mathbf{x}_2^{(1)} = [0, 1, 1, 0, 0]$
- $\mathbf{x}_3^{(1)} = [1, 0, 0, 1, 0]$

*d) Provera ograničenja i konvergencija:*

Nakon nekoliko iteracija, PSO će konvergirati ka rešenju koje minimizuje broj PMU uređaja dok i dalje pokriva sve čvorove. Konačno rešenje izgleda ovako:

- $\mathbf{x}^{\text{best}} = [1, 0, 0, 0, 1]$  sa vrednošću ciljne funkcije  $f(\mathbf{x}) = 2$ .

Ovo znači da je optimalno rešenje postavljanje PMU uređaja na čvorovima 1 i 5, čime se postiže potpuno pokrivanje svih čvorova sistema uz minimalan broj uređaja.

## 4 APLIKACIJA

U Matlab okruženju je formiran GUI (Graphical User Interface) aplikacije. Korisniku su na raspolaganju tri scenarija: Osnovni proračun,  $N-1$  proračun i Već postavljeni PMU uređaji. Program je razvijen da, ukoliko korisnik ima RunTime aplikaciju, koja je potpuno besplatna, može pokrenuti program potpuno nezavisno od Matlab-a.

Pokratanjem npr. **Basic Calculation** u okviru aplikacije, proces obuhvata sledeće ključne korake i karakteristike:

**1. Učitavanje Podataka:**

- Korisnik učitava dva Excel fajla preko grafičkog interfejsa:
  - Prvi fajl sadrži podatke o povezanosti čvorova energetske mreže (topologija mreže u obliku liste veza između čvorova).
  - Drugi fajl sadrži mapiranje brojeva čvorova sa nazivima postrojenja, što omogućava korisnički prijateljski prikaz rezultata.

**2. Optimizacija Postavljanja PMU Uređaja:**

- Algoritmi za optimizaciju su implementirani tako da mogu efikasno da obrade i veće mreže, koristeći napredne tehnike - PSO algoritam

**3. Paralelna Obrada:**

- Za povećanje efikasnosti, algoritmi optimizacije se izvršavaju u paralelnim procesima. Ovo omogućava bržu obradu i istovremeno testiranje više potencijalnih konfiguracija PMU uređaja.
- Broj paralelnih procesa zavisi od dostupnosti hardverskih resursa i može se konfigurisati prema potrebama korisnika.

**4. Izračunavanje SORI:**

- Kako postoji više rešenja, izračunava se SORI indeks (System Observability Redundancy Index). Ovaj indeks pomaže u evaluaciji kvaliteta rešenja gledajući koliko efektivno svaki PMU doprinosi opservabilnosti sistema.

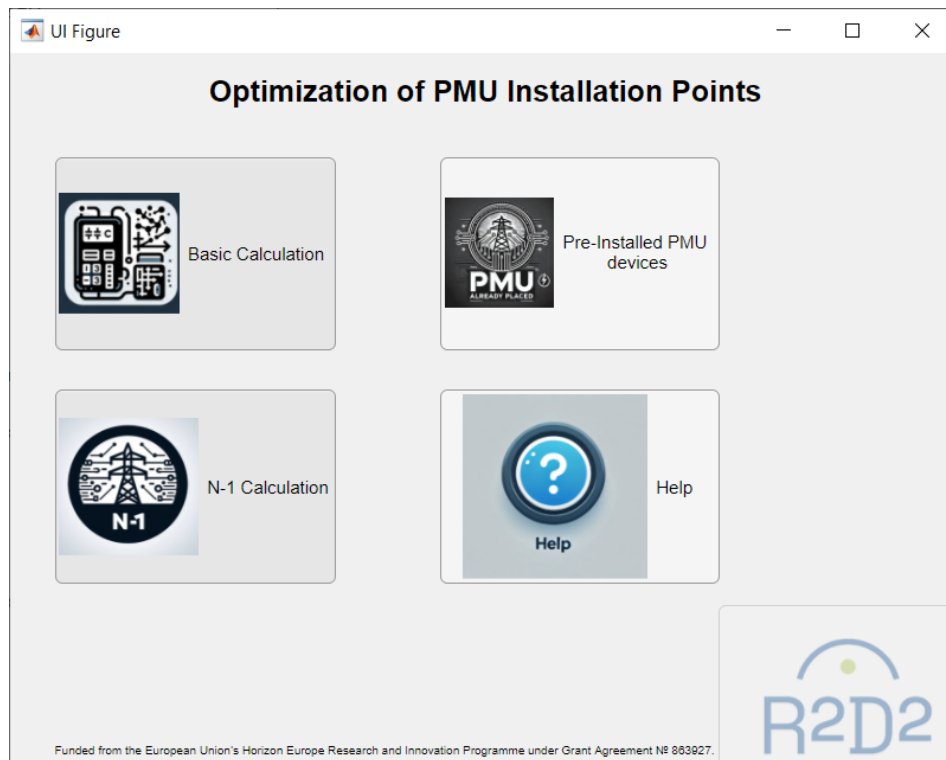
**5. Prikaz Rezultata:**

- Sva rešenja i njihovi SORI indeksi se prikazuju u aplikaciji. Korisnik može da vidi listu svih rešenja, kao i detaljno najbolje rešenje sa najvišim SORI indeksom. Rešenja se ispisuju u tekstualni fajl.
- Najbolje rešenje se vizuelno prikazuje na grafu mreže, sa jasno označenim lokacijama PMU uređaja (crvenom bojom).

**6. Interaktivnost i Korisnički Interfejs:**

- Korisnički interfejs je dizajniran tako da pruža jednostavan i intuitivan način za interakciju sa softverom, omogućavajući korisnicima da lako menjaju parametre izračunavanja i analiziraju rezultate.

Ovaj proces omogućava temeljitu analizu i optimizaciju mreže, pružajući korisnicima moćan alat za planiranje i unapređenje mrežne infrastrukture.



Slika 1. Glavni prikaz aplikacije

Klikom na dugme Pomoć otvara se dokument koji sadrži detaljne korake i primere kako korisnik treba da postupi za svaki odabrani proces optimizacije.

Prolazak kroz program će biti demonstriran na primeru IEEE mreže sa 24 čvora. Odabirom opcije Osnovni proračuni i nakon učitavanja podataka o sistemu dobijaju se sva rešenja (slika 2), od kojih iz grafički predstavljeno rešenje sa najvećim SORI (slika 3).



```

basic calculations detailed.txt - Notepad
File Edit Format View Help
Minimal value of the objective function: 7.000000

Solutions of the system of equations:
Solution 1:
x3=1 (Cibuk)
x4=1 (Mladost)
x7=1 (Kraljevo)
x10=1 (Djerdap)
x16=1 (Beograd 10)
x21=1 (EVP Markovac)
x23=1 (RP Mladost)
sori_index=28

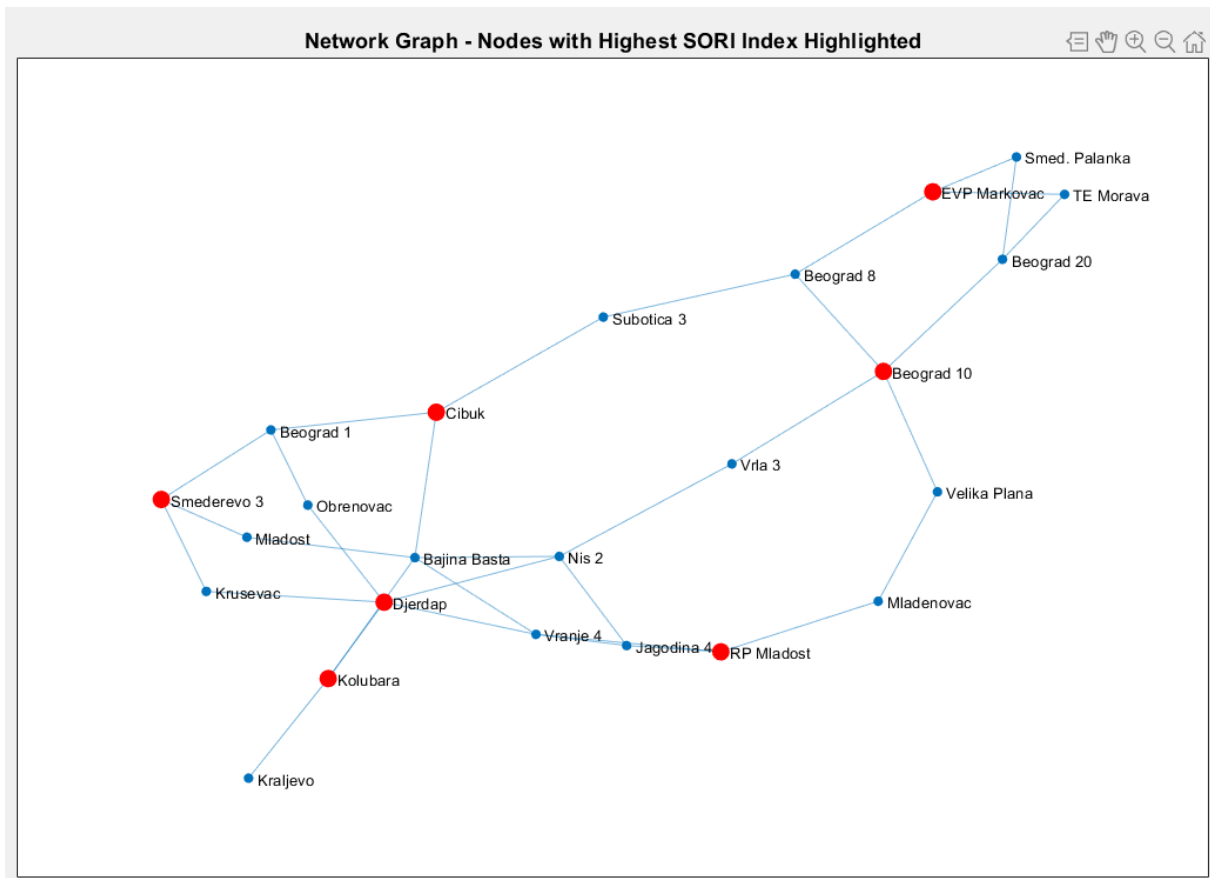
Solution 2:
x2=1 (Smederevo 3)
x8=1 (Kolubara)
x10=1 (Djerdap)
x16=1 (Beograd 10)
x21=1 (EVP Markovac)
x23=1 (RP Mladost)
x24=1 (Subotica 3)
sori_index=30

Solution 3:
x2=1 (Smederevo 3)
x3=1 (Cibuk)
x8=1 (Kolubara)
x10=1 (Djerdap)
x16=1 (Beograd 10)
x21=1 (EVP Markovac)
x23=1 (RP Mladost)
sori_index=31

Solution 4:
x2=1 (Smederevo 3)
x3=1 (Cibuk)
x7=1 (Kraljevo)
x10=1 (Djerdap)
x16=1 (Beograd 10)
x21=1 (EVP Markovac)
x23=1 (RP Mladost)
sori_index=29

```

Slika 2. Prikaz svih rešenja



Slika 3. Prikaz rešenja sa najvećim SORI

Odabirom N-1 ili odabirom već postojećih PMU dobijamo rezultate u istoj formi kao što je predstavljeno.

## 5 ZAKLJUČAK

U radu je razvijena MATLAB aplikacija, koja na bazi naprednog algoritmi, kao što je Particle Swarm Optimization (PSO), identifikuje najbolje lokacije za postavljanje PMU uređaja u elektroenergetskoj mreži.

Detaljno su opisane funkcionalnosti aplikacije, uključujući unos podataka, optimizaciju postavljanja PMU uređaja, izračunavanje System Observability Redundancy Index (SORI), i korisnički interfejs za jednostavnu interakciju. Kroz primenu algoritma PSO, aplikacija omogućava minimizaciju broja PMU uređaja, uz istovremeno obezbeđivanje potpune opservabilnosti elektroenergetskog sistema. Dodatna vrednost rada je uključivanje analize različitih scenarija, poput N-1 analize i razmatranja već postojećih PMU uređaja.

Implementacija je testirana na primerima elektroenergetskih sistema, uključujući i IEEE mrežu sa 24 čvora. Rezultati pokazuju da aplikacija uspešno identifikuje optimalne lokacije za postavljanje PMU uređaja, pružajući vizualizaciju rešenja sa najvećim SORI. Ovim je potvrđena praktična upotrebljivost razvijenog alata za operatere elektroenergetskih sistema, posebno u procesu planiranja i unapređenja mrežne infrastrukture.

## 6 ZAHVALNICA

Finansirano iz programa Evropske unije Horizon Europe za istraživanje i inovacije, u okviru grant sporazuma broj 883827.

## 7 LITERATURA

1. Khaledian, Ehdieh, et al. "Real-time synchrophasor data anomaly detection and classification using isolation forest, kmeans, and loop." *IEEE Transactions on Smart Grid* 12.3 (2020): 2378
2. Wu, Tong, Ying-Jun Angela Zhang, and Xiaoying Tang. "Isolation forest based method for low-quality synchrophasor measurements and early events detection." *2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*. IEEE, 2018.
3. Liu, Fei Tony, Kai Ming Ting, and Zhi-Hua Zhou. "Isolation forest." *2008 eighth ieee international conference on data mining*. IEEE, 2008.
4. Ding, Zhiguo, and Minrui Fei. "An anomaly detection approach based on isolation forest algorithm for streaming data using sliding window." *IFAC Proceedings Volumes* 46.20 (2013): 12-17.
5. Ehsani, Narges, Farrokh Aminifar, and Hamed Mohsenian-Rad. "Convolutional autoencoder anomaly detection and classification based on distribution PMU measurements." *IET Generation, Transmission & Distribution* 16.14 (2022): 2816-2828.
6. Niazazari, Iman, and Hanif Livani. "A PMU-data-driven disruptive event classification in distribution systems." *Electric Power Systems Research* 157 (2018): 251-260.
7. Lin, You, Jianhui Wang, and Mingjian Cui. "Reconstruction of power system measurements based on enhanced denoising autoencoder." *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. IEEE, 2019.
8. Adam, Valenta. *Anomaly detection using the Extended Isolation Forest algorithm*. MS thesis. Czech Technical University in Prague. Computing and information center., 2020.
9. Mahapatra, Kaveri. *Data Anomaly Detection and Correction in PMU Measurements for Wide-Area Monitoring Applications*. Diss. The Pennsylvania State University, 2020.

10. Phadke, Arun G. "Synchronized phasor measurements—a historical overview." *IEEE/PES transmission and distribution conference and exhibition*. Vol. 1. IEEE, 2002.

## **OPTIMIZATION OF PMU PLACEMENT FOR IMPROVED NETWORK OBSERVABILITY USING MATLAB**

**VLADIMIR BEČEJAC  
JSC ELEKTROMREŽA SRBIJE**

**BELGRADE**

**SERBIA**

***Abstract***— This paper presents the development and implementation of a MATLAB application for the optimal placement of PMU (Phasor Measurement Units) devices in the power system. The aim of the application is to maximize the reliability and efficiency of system monitoring, ensuring full topological observability of the network. By utilizing linear and advanced optimization methods (Particle Swarm Optimization), the application identifies the best locations for PMU devices, taking into account classical analyses, N-1 analyses, and existing PMU devices. The described activities were carried out through the European Horizon 2020 project Reliability, Resilience, and Defense Technology for the Grid-R2D2.

***Key words*** — PMU, PSO, N-1, linear programming

**OPTIMIZACIJA POSTAVLJANJA PMU UREĐAJA ZA POBOLJŠANU  
OPSERVABILNOST MREŽE KORISĆENJEM MATLAB-A**

**OPTIMIZATION OF PMU PLACEMENT FOR IMPROVED NETWORK  
OBSERVABILITY USING MATLAB**

**VLADIMIR BEČEJAC  
AD ELEKTROMREŽA SRBIJE**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj - Ovaj rad se bavi problematikom optimalnog postavljanja fazorskih mernih jedinica (PMU) u elektroenergetskim sistemima, koristeći MATLAB aplikaciju koja je razvijena za tu svrhu. PMU uređaji predstavljaju ključnu tehnologiju za praćenje i kontrolu modernih elektroenergetskih mreža jer omogućavaju precizno i sinhronizovano merenje električnih veličina kao što su napon, struja i fazni ugao. Glavni cilj ove aplikacije je da identifikuje optimalne lokacije za postavljanje PMU uređaja, maksimizujući pouzdanost i efikasnost nadzora sistema, uz obezbeđivanje potpune topološke opservabilnosti mreže.*

*U radu se koristi kombinacija klasičnih i naprednih optimizacionih metoda, uključujući Particle Swarm Optimization (PSO), za rešavanje problema optimalne instalacije PMU uređaja. PSO algoritam je implementiran u aplikaciji sa ciljem da minimizira broj PMU uređaja potrebnih za potpunu opservabilnost mreže, uz istovremeno zadovoljavanje tehničkih i operativnih ograničenja elektroenergetskog sistema. Aplikacija takođe uzima u obzir N-1 analize i postojeće PMU uređaje, što dodatno poboljšava proces odlučivanja i omogućava operatorima mreže da planiraju optimalnu konfiguraciju sa visokom otpornošću na kvarove.*

*Aplikacija je razvijena u MATLAB okruženju, pružajući korisnički interfejs koji omogućava unos podataka o topologiji mreže i konfiguraciji sistema. Kroz interfejs, korisnici mogu izabrati različite scenarije analize, kao što su osnovni proračun, N-1 proračun i analiza sa već postojećim PMU uređajima. Implementacija algoritama za optimizaciju, kao i paralelna obrada podataka, omogućava efikasno rešavanje problema i za veće mreže.*

*Rezultati simulacija pokazuju da razvijena aplikacija uspešno identifikuje optimalne lokacije za PMU uređaje, čime se postiže potpuno posmatranje sistema sa minimalnim brojem uređaja. Pored toga, aplikacija izračunava System Observability Redundancy Index (SORI) kako bi kvantitativno ocenila kvalitet svakog rešenja. Rešenja sa najvećim SORI indeksom predstavljaju optimalnu konfiguraciju za postavljanje PMU uređaja, pružajući operaterima elektroenergetskog sistema mogućnost da poboljšaju stabilnost i nadzor mreže.*

*Ovaj rad je sproveden u okviru evropskog projekta Horizon 2020 pod nazivom "Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R2D2." U budućnosti, predloženi pristup može biti proširen i na druge mreže različitih veličina i konfiguracija, uz dodatne analize koje uključuju varijacije opterećenja i integraciju obnovljivih izvora energije.*

**Ključne reči – PMU, PSO, N-1, linear programming**



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.126M](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.126M)

C2 08

## UTICAJ NEKOMPLETNIH SKUPOVA PODATAKA NA MODELIRANJE PROCESA U ENERGETICI

DRAGAN MARINOVIĆ\*, GORAN JOVANOVIĆ\*, BOJAN RAKIĆ\*, PETAR  
NIKOLIĆ\*, ŽARKO NESTOROVIĆ\*  
SLOBODAN STAMENOV\*

\*EPS AD BEOGRAD, OGRANAK ĐERDAP KLADOVO

KLADOVO

SRBIJA

***Kratak sadržaj*** — Procesi u energetici prate se putem podataka koji reprezentuju određene parametre stanja sistema ili pojedinih njegovih delova. Dobiijeni podaci predstavljaju diskretizovane procese u vremenu i postavlja se pitanje mogućnosti modeliranja ovih procesa odnosno određivanja kontinualnih modela koji sa dovoljnom tačnošću aproksimiraju posmatrani proces. Na taj način se, umesto diskretnog skupa podataka koji može biti izuzetno obiman, koristi funkcija što značajno povećava efikasnost analize posmatranog procesa. Veliki obim diskretnog skupa podataka može značajno otežati analizu procesa dok nepravilna diskretizacija procesa u vremenu može dovesti do gubitaka značajnih podataka o posmatranom procesu. Navedena činjenica motivisala je autore da istraže proces promene temperature vodećeg ležaja turbine agregata A6 na HE Đerdap 1 sa ciljem da utvrde promenu modela odnosno njegovo odstupanje u odnosu na merene podatke u zavisnosti od isključenih podskupova podataka. Rezultati istraživanja ukazuju na mogućnost statističkog slaganja merenih i rezultata dobijenih modeliranjem.

***Ključne reči*** — statistika, diskretizacija, polinomna regresija, kontinuirani proces.

---

\* Trg Kralja Petra 1, Kladovo, Dragan.Marinovic@eps.rs

## 1 UVOD

Procesi u proizvodnji električne energije prate sed preko vrednosti pojedinih parametara (veličina) koje se dobijaju merenjem. Dobijene veličine (vrednosti parametara) koje reprezentuju pojedine procese tokom proizvodnje električne energije mogu se opisati diskretnim skupom podataka koji opisuje kontinuirani proces. Kako je proces proizvodnje električne energije neprekidna funkcija neposredno sledi da skupovi podataka koji opisuju pojedine podprocesse mogu imati veliku količinu podataka i time otežati analizu i proces donošenja odluka. Svi podaci dobijeni po nekom parametru koji opisuje posmatrani proces ili neki njegov deo smatraće se kompletnim skupom podataka, dok će se pod nekompletnim skupom smatrati podskup kompletnog skupa podataka.

Diskretizacija kontinuirane funkcije odnosno kompletni skup podataka koji opisuje posmatrani proces može se prikazati na sledeći način:

$$\varphi(t) \rightarrow \{\varphi(t_0), \varphi(t_1), \dots, \varphi(t_i), \dots, \varphi(t_n)\} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_n\}, n \rightarrow \infty \quad (1)$$

gde je:

- $\varphi(t)$  – funkcija koja opisuje proces;
- $t$  – vreme,
- $\varphi(t_i)$  – vrednost funkcije u trenutku  $\varphi(t_i)$  odnosno izmerena vrednost;
- $\varphi_i = \varphi(t_i)$  – skraćena notacija za vrednost funkcije u trenutku  $t_i$  i
- $n$  – broj podataka koji u opštem slučaju teži beskonačnosti (ili velikom broju).

Nekompletni skup podataka predstavlja skup merenih podataka od  $m$  elemenata pri čemu važi  $m < n$  ili  $m \ll n$ . Na osnovu navedenog neposredno se može zaključiti da se predstava o nekom procesu zasniva na skupu postojećih diskretnih podataka. Međutim, sticanje predstave o procesu na osnovu numeričkih podataka nije jednostavno i može zahtevati veliki interval vremena. Iz tog razloga je izvršeno istraživanje mogućnosti da se na osnovu raspoloživog skupa diskretnih vrednosti funkcije odredi funkcija koja najbolje opisuje proces kao što je to prikazano u iskazu (2).

$$\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_n\} \rightarrow \varphi(t) = M \quad (2)$$

Testiranje različitih funkcija pokazalo je da polinom šestog stepena daje prihvatljive rezultate sa aspekta odstupanja izmerenih vrednosti u odnosu na funkciju pa je ovaj model usvojen kao polazni za dalje istraživanje. Odstupanje je određeno po sledećoj formuli:

$$\Delta = \max_i |\varphi_i - M_i| \leq \epsilon \quad (3)$$

gde je:

- $\Delta$  - maksimalno odstupanje apsolutne vrednosti razlike izmerenih vrednosti i vrednosti dobijene na osnovu usvojenog modela;
- $M_i$  – vrednost modela u tački  $i$  i
- $\epsilon$  – unapred zadata vrednost razlike pri čemu je  $\epsilon > 0$ .

U ovom istraživanju je vršeno testiranje hipoteza o jednakosti modela. Test veličine su koeficijenti dobijeni na osnovu skupa merenih podataka i njihove srednje greške određene na osnovu primene metode najmanjih kvadrata.

U ovom radu prikazani su rezultati istraživanja formiranja modela zasnovanih na redukovanim

skupovima podataka, njihovom poređenju sa kompletnim skupom merenih podataka i rezultati o međusobnom poređenju modela. Modeli su bazirani na polinomnoj regresiji šestog stepena, određivanje koeficijenata polinoma je izvršeno po metodi najmanjih kvadrata dok je poređenje izvršenom primenom statističke analize i testiranjem hipoteza o jednakosti modela primenom nraspodele studenta [1, 2].

## 2 MATERIJALI I METODE

Za analizu su korišćeni podaci o promenama temperature vodećeg ležaja turbine agregata A6 an HE Đerdap 1. Pregledom podataka pronađen je skup podataka kada je došlo do rasta temperature na vodećem ležaju turbine agregata A6 na HE Đerdap 1. Kompletan skup podataka sadrži 61 izmerenu vrednost temperature i dat je u tabeli 1. Merenja su vršena u jednakim intervalima vremena.

Tabela 1. redni broj merenja i temperature vodećeg ležaja turbine agregata A6 na HE Đerdap 1

Merenje	Temperatura [°C]	Merenje	Temperatura [°C]	Merenje	Temperatura [°C]
0	49.0	21	58.8	42	59.8
1	50.6	22	58.9	43	59.8
2	52.1	23	59.0	44	59.8
3	53.1	24	59.1	45	59.9
4	53.9	25	59.1	46	59.9
5	54.6	26	59.2	47	59.9
6	55.2	27	59.2	48	59.9
7	55.8	28	59.3	49	60.0
8	56.1	29	59.3	50	60.0
9	56.5	30	59.4	51	60.0
10	56.8	31	59.4	52	60.1
11	57.2	32	59.5	53	60.1
12	57.4	33	59.5	54	60.1
13	57.6	34	59.6	55	60.1
14	57.8	35	59.6	56	60.1
15	58.0	36	59.6	57	60.1
16	58.2	37	59.6	58	60.1
17	58.3	38	59.7	59	60.2
18	58.5	39	59.7	60	60.2
19	58.6	40	59.7		
20	58.7	41	59.8		

Korišćen je matematički model polinoma šestog stepena koji je formiran za svaki mereni podatak po formuli:

$$Y_i = \sum_{j=0}^s a_j t_i^j + \varepsilon_i \quad (4)$$

gde je:

- $Y_i$  – zavisna promenljiva (vrednost izmerene temperature u trenutku  $t_i$ );
- $a_j$  – koeficijenti polinoma – nepoznate veličine ( $j = 0 \sim 6$ );
- $t_i$  – nezavisna promenljiva (trenutak u kome je izvršeno merenje)



- $s$  - stepen polinoma ( $s = 6$ ) i
- $\varepsilon_i$  – slučajno odstupanje izmerene vrednosti od modela.

Kako je  $n \gg s$  sistem jednačina (4) je preodređen i rešenje se traži po metodi najmanjih kvadrata pri čemu su koeficijenti uz nepoznate  $t_i^j$ .

Rešenje sistema jednačina (4) pod uslovom:

$$[vv] = \min \quad (5)$$

glasi

$$x = \begin{bmatrix} a_0 \\ \dots \\ a_i \\ \dots \\ a_6 \end{bmatrix} = -(A^T A)^{-1} A^T Y = -Q_x A^T Y \quad (6)$$

gde je:

- $x$  – vektor nepoznatih koeficijenata;
- $A$  – matrica koeficijenata uz nepoznate i
- $Y$  – vektor izmerenih vrednosti.

Ukupan broj nepoznatih iznosi  $s + 1$  dok je broj jednačina jednak broju izmerenih vrednosti koje se koriste za određivanje koeficijenata u formuli (4). srednja greška jedinice težine određuje se na osnovu vrednosti popravaka (odstupanja izmerenih vrednosti u odnosu na model) po formuli:

$$m_0 = \sqrt{\frac{[vv]}{n - s - 1}} \quad (7)$$

Srednja greška jedinice težine predstavlja srednje kvadratno odstupanje izmerenih vrednosti u odnosu na model. Izraz  $n - s - 1$  predstavlja broj stepeni slobode koji se koristi u statističkoj analizi.

Srednja greška koeficijenta dobija se po formuli:

$$m_{a_i} = m_0 \sqrt{q_{a_i}} \quad (8)$$

gde je  $q_{a_i}$  odgovarajući član sa dijagonel matrice  $Q_x$ .

Model ( $M$ ) predstavlja formulu (4) sa konkretnim koeficijentima određenih po metodi za dati skup podataka.

Testiranje jednakosti modela vrši se testiranjem jednakosti srednjih grešaka koje opisuju model i testiranjem jednakosti koeficijenata. Testiranje jednakosti srednjih grešaka vrši se pomoću  $F$  – testa dok se jednakost koeficijenata između dva modela vrši primenom statistike studenta.

Testiranje jednakosti srednjih grešaka vršeno je proverom test statistike za najveću srednju grešku u odnosu na grupu preostalih srednjih grešaka po sledećem postupku:

$$F = \frac{m_{max}^2}{m_g^2} \sim F_{f_{max}, f_g, 1-\alpha} \quad (9)$$

$$m_g^2 = \frac{\sum_{k=1}^{l-1} f_i * m_i^2}{\sum_{i=1}^{l-1} f_i} \quad (10)$$

gde je:

- $F$  – statistika srednjih grešaka modela;
- $m_{max}^2$  – maksimalna srednja kvadratna greška modela;
- $m_g^2$  – srednja kvadratna greška modela sa isključenom maksimalnom srednjom greškom;
- $f_{max}$  – broj stepeni slobode modela sa maksimalnom srednjom greškom;
- $f_g$  – broj stepeni slobode u preostaloj grupi modela;
- $f_i$  – broj stepeni slobode za svaki model pojedinačno;
- $\alpha$  – nivo značajnosti  $i$
- $l$  – ukupan broj razmatranih modela.

Jednakost modela vrši se testiranjem statistike:

$$t = \frac{d_a}{m_a} = \frac{a_{i,j} - a_{i,k}}{\sqrt{\frac{m_{a_{i,j}}^2}{n_i} + \frac{m_{a_{i,k}}^2}{n_k}}} \sim t_{f,1-\alpha} \quad (11)$$

gde je:

- $t$  – test statistika;
- $a_{i,j}, a_{i,k}$  – koeficijent polinoma  $a_i$  u modelima  $M_j$  i  $M_k$  respektivno;
- $m_{a_{i,j}}^2, m_{a_{i,k}}^2$  – srednje kvadratne greške koeficijenata u modelima  $M_j$  i  $M_k$  respektivno;
- $n_i, n_k$  – broj rezultata iz kojih su određeni koeficijenti u modelima  $M_j$  i  $M_k$  respektivno
- $t_{f,1-\alpha}$  – kvantili studentove raspodele za  $f$  – stepeni slobode i nivo značajnosti  $\alpha$ .

Broj stepeni slobode za statistiku određuje se po formuli:

$$\frac{1}{f} = \frac{c^2}{f_i} + \frac{(1-c)^2}{f_k} \quad (12)$$

$$c = \frac{\frac{m_{a_{i,j}}^2}{n_i}}{\frac{m_{a_{i,j}}^2}{n_i} + \frac{m_{a_{i,k}}^2}{n_k}} \quad (13)$$

gde  $n_i$  i  $n_k$  predstavljaju broj merenih veličina u  $M_j$  i  $M_k$  respektivno.

Značajnost koeficijenata testira se primenom studentove test statistike:

$$t = \frac{a_j}{m_{a_j}} = \frac{a_j}{m_0 \sqrt{q_{jj}}} \sim t_{f,1-\alpha} \quad (14)$$

gde imenilac ima isto značenje kao u formuli (8) a  $f$  je broj stepeni slobode sa kojim je određen model na osnovu koga je dobijen posmatrani koeficijent.

Za određivanje raspona u kome modeli daju rezultate za merene veličine koristi se  $L_2$  norma (Euklidova distanca):

$$\|L_2\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (M_{ij} - M_{ref,j})^2} \quad (15)$$

gde je  $M_{ref,j}$  -  $j$ -ta tačka u referentnom modelu a  $M_{ij}$  -  $j$ -ta tačka određena prema  $i$ -tom modelu. U svim statističkim testovima usvojen je nivo značajnosti  $\alpha=0.05$ .

### 3 REZULTATI I DISKUSIJA

Istraživanje je obuhvatilo formiranje ukupno pet modela: referentni i još četiri kontrolna modela. Prvi kontrolni model određen je tako što je samo eliminisan prvi rezultat. Drugi kontrolni model dobijen je eliminacijom svakog petog rezultata. Treći kontrolni model dobijen je eliminacijom svakog trećeg rezultata i četvrti kontrolni model dobijen je eliminacijom svakog drugog rezultata. Istovremeno je izvršeno i testiranje značajnosti koeficijenata u Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2.

		$a_6$	$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$		
Referentni $n=61$	$a_j$	0.00029	0.01108	-0.26370	2.00670	-7.14259	12.77091	49.54725	$f=$	54
	$m_{a_j}$	0.00117	0.02105	0.14504	0.47502	0.74728	0.49880	0.10364	$m_0=$	0.14
	Hipoteza	Ho	Ho	Ho	Ha	Ha	Ha	Ha		
Kontrolni 1 $n=60$	$a_j$	-0.00104	0.03197	-0.37010	2.12037	-6.53245	10.96835	50.99035	$f=$	53
	$m_{a_j}$	0.00084	0.01488	0.10086	0.32478	0.50228	0.32950	0.06728	$m_0=$	0.09
	Hipoteza	Ho	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha		
Kontrolni 2 $n=48$	$a_j$	-0.00823	0.16506	-1.31707	5.37702	-12.14260	15.62013	49.25451	$f=$	41
	$m_{a_j}$	0.00089	0.01609	0.11139	0.36910	0.59488	0.41561	0.09008	$m_0=$	0.08
	Hipoteza	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha		
Kontrolni 3 $n=41$	$a_j$	-0.00131	0.03705	-0.41269	2.34498	-7.29679	12.43663	49.77311	$f=$	34
	$m_{a_j}$	0.00107	0.01964	0.13803	0.46377	0.75641	0.53322	0.11688	$m_0=$	0.10
	Hipoteza	Ho	Ho	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha		
Kontrolni 4 $n=31$	$a_j$	-0.00886	0.17857	-1.42373	5.76793	-12.82306	16.14376	49.10689	$f=$	24
	$m_{a_j}$	0.00113	0.02048	0.14080	0.45814	0.71055	0.46001	0.09188	$m_0=$	0.10
	Hipoteza	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha		

Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da u pojedinim modelima (referentnom i prvom kontrolnom) postoje koeficijenti koji prema kriterijumu (14) nisu značajni. U ovom istraživanju ti koeficijenti nisu isključivani niti su posebno diskutovani.

Testiranje srednjih kvadratnih grešaka dovodi do prihvatanja alternativne hipoteze o jednakosti srednjih grešaka modela i vidi se da referentni model ima značajno odstupanje jer je:

$$F = \frac{m_{max}^2}{m_g^2} = \frac{0.14^2}{0.0082} = 2.3456 > F_{54,152,0.95} = 1.4775$$

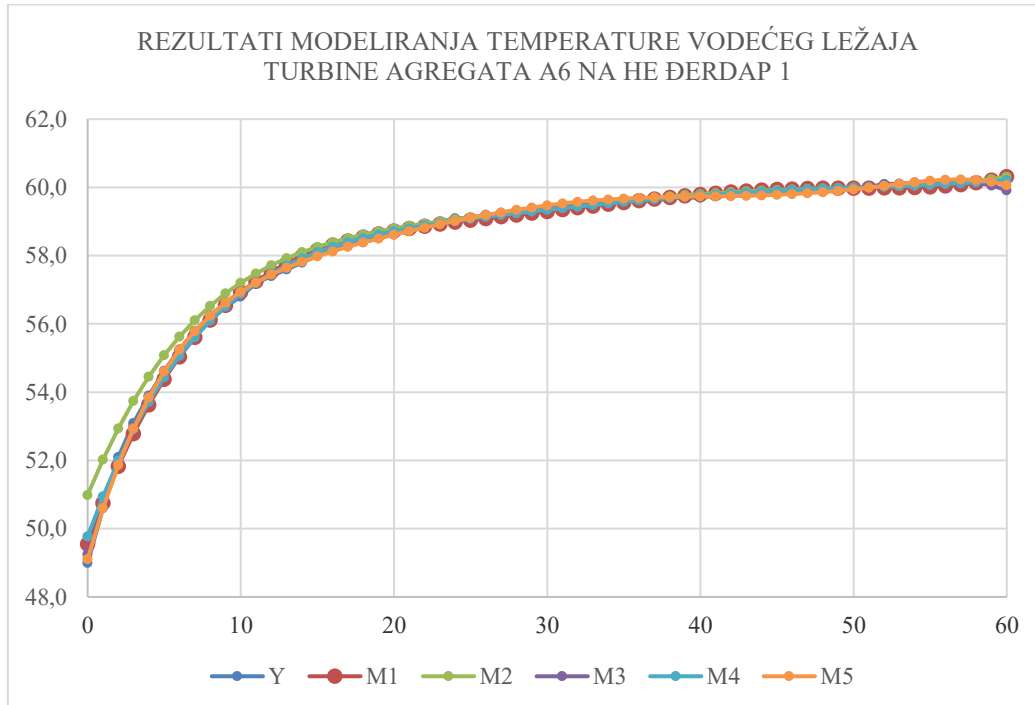
Testiranje jednakosti koeficijenata modela primenom testa (11) ukazuje na značajna odstupanja između modela. Kako minimalni broj stepeni slobode izračunat po formuli (12) iznosi  $f=34$  to sledi da će svi testovi koji zadovoljavaju uslov  $t > t_{34,0.95}=2.0322$  imati za posledicu prihvatanje alternativne hipoteze. Rezultati testiranja dati su u tabeli 3.

Tabela 3. Rezultati međusobnog testiranja jednakosti koeficijenata modela

$M_i$	$M_j$	$a_6$	$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
1	2	Ha	Ha	Ha	Ho	Ha	Ha	Ha
1	3	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha
1	4	Ha	Ha	Ha	Ha	Ho	Ha	Ha
1	5	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha
2	3	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha
2	4	Ho	Ho	Ho	Ha	Ha	Ha	Ha
2	5	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha
3	4	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha
3	5	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha
4	5	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha

Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da se nulta hipoteza o jednakosti koeficijenata između modela može usvojiti u samo 5 slučajeva dok se u ostalim slučajevima nema razloga za odbacivanje alternativnih hipoteza.

Odstupanja modela, u odnosu na izmerene vrednosti temperature, merena  $L_2$  normom pripadaju skupu  $L_2 = \{1.02, 3.02, 0.66, 1.01, 0.67\}$ . Ovaj rezultat znači da redukovani skupovi podataka mogu dovesti do odstupanja od  $3^\circ\text{C}$ . Ovaj slučaj pojavio se samo u modelu  $M_2$  odnosno kada je eliminisana samo početna tačka merenja ali on upućuje na oprez pri modeliranju procesa kada se koriste redukovani skupovi podataka. Grafički prikaz merenih i vrednosti dobijenih primenom modela dat je na slici 1.



Sl.1. Grafički prikaz merenih i modelskih vrednosti temperature

Prikazani model primenjen je na relativno malom uzorku i kao takav predstavlja početni stadijum analize korišćenja redukovanih skupova podataka pri modeliranju procesa u

elektroenergetici. Dalji razvoj navedene metodologije treba da obuhvati skupove sa značajno većim brojem podataka uz analizu efikasnosti.

#### **4 ZAKLJUČAK**

U radu su prikazani rezultati istraživanja matematičkih modela koji opisuju proces promene temperature vodećeg ležaja turbine na agregatu A6 i njihovog poređenja sa rezultatima dobijenih merenjem. Statistička analiza ukazala je na mogućnost redukovanja skupa merenih rezultata bez značajnih odstupanja u odnosu na izmerene vrednosti ali je  $L_2$  norma ukazala na moguća odstupanja koja u jednom slučaju dostiže vrednost od  $3^\circ\text{C}$  dok u drugim slučajevima ova norma ne prelazi značajno vrednost od  $1^\circ\text{C}$ . Kako je ovo istraživanje inicijalnog karaktera ono je sprovedeno na relativno malom uzorku dok bi u daljim istraživanjima trebalo koristiti uzorke većeg obima uz proveru efikasnosti.

#### **5 ZAHVALNICA**

Istraživanje je izvršeno u okviru redovnih aktivnosti autora zaposlenih u EPS AD Beograd, ogranak Đerdap Kladovo.

#### **LITERATURA**

- [1] Perović, G.: Račun Izravnjanja, Knjiga 1, Teorija Grešaka Merenja, Naučna knjiga, Građevinski fakultet, Beograd, 1989.  
[2] Perović, G.: Metod Najmanjih Kvadrata, Naučna knjiga, Građevinski fakultet, Beograd, 2005.

### **ON THE INFLUENCE OF INCOMPLETE SETS OF DATA ON MODELING PROCESSES IN ELECTRICITY INDUSTRY**

**DRAGAN MARINOVIĆ\*, GORAN JOVANOVIĆ\*, BOJAN RAKIĆ\*, PETAR  
NIKOLIĆ\*, ŽARKO NESTOROVIĆ\*  
SLOBODAN STAMENOV\***

**\*EPS JSC BELGRADE, BRANCH ĐERDAP KLADOVO**

**KLADOVO**

**SERBIA**

***Abstract*— Processes in electricity industry are monitored by the data which represents the certain state parameters of the system or its parts. Obtained data represent the processes which are discretized in time and the question is if those processes could be**

---

\* Trg Kralja Petra 1, Kladovo, Dragan.Marinovic@eps.rs

\* Kraljevića Marka 2, Negotin, Goran.I.Jovanovic@eps.rs

\* Trg Kralja Petra 1, Kladovo, Bojan.Rakic@eps.rs

\* Trg Kralja Petra 1, Kladovo, Petar.Nikolic@eps.rs

\* Trg Kralja Petra 1, Kladovo, Zarko.Nestorovic@eps.rs

\* Trg Kralja Petra 1, Kladovo, Slobodan.Stamenov@eps.rs

**modelled with the adequate accuracy to approximate certain process. In that way, instead of discrete set with potentially huge amount of data, it is possible to utilize the function what could significantly increase the analysis of certain process. The large scale of data could result with difficulties in process analysis while the inadequate discretization could lead to the loses of important data about analyzed process. This fact motivated the authors to research the process of temperature changes of A6 turbine's guide bearing in the Djerdap 1 power plant with the aim to find out the model's changes i.e. its deviation from the measured data depending on the excluded substes of data.**

***Key words* — statistics, discretization, polynomial regression, continual process.**

**UTICAJ NEKOMPLETNIH SKUPOVA PODATAKA NA MODELIRANJE  
PROCESA U ENERGETICI**

**ON THE INFLUENCE OF INCOMPLETE SETS OF DATA ON MODELING  
PROCESSES IN ELECTRICITY INDUSTRY**

**DRAGAN MARINOVIĆ\*, GORAN JOVANOVIĆ\*, BOJAN RAKIĆ\*, PETAR  
NIKOLIĆ\*, ŽARKO NESTOROVIĆ\*  
SLOBODAN STAMENOV\*  
EPS AD BEOGRAD, OGRANAK ĐERDAP KLADOVO**

**KLADOVO**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj - Procesi u elektroindustriji prate se na osnovu podataka pojedinih parametara koji predstavljaju diskretne vrednosti u vremenu. Skupovi diskretnih podataka mogu zauzimati veliku količinu memorije i predstavljati značajan problem pri obradi podataka ili brzom donošenju odluka. Takođe, pojedini procesi mogu zahtevati analizu postojećeg diskretnog skupa podataka koji zbog svog obima može rezultirati ili značajnim intervalom vremena potrebnim za analizu ili potencijalno pogrešnim zaključcima. Sa druge strane, modeliranje procesa odnosno nalaženje funkcije koja na najbolji način aproksimira posmatrani proces može dovesti do značajnih odstupanja dobijenih rezultata merenja u odnosu na model. Navedeni razlozi motivisali su istraživanje uticaja nekompletnih skupova podataka na modeliranje pojedinih procesa u energetici. Pod nekompletnim skupom podataka podrazumevamo podskup skupa podataka koji opisuju posmatrani proces a koji se koristi za modeliranje posmatranog procesa. Kako je pri velikom broju podataka praktično nemoguće obraditi sve moguće kombinacije sa eliminacijom podataka u ovom istraživanju eliminisani su pojedini podaci i određen model primenom polinomne regresije šestog stepena. Nakon definisanja metode istraživanja prihvaćeni metod primenjen je na podatke o promeni temperature vodećeg ležaja turbine agregata A6 na HE Đerdap 1. Na uzorku od 60 rezultata merenja temperature vodećeg ležaja agregata A6 izvršeno je modeliranje po metodi najmanjih kvadrata za polinom šestog stepena i dobijena su odstupanja manja od 0.6 °C.*

---

\* Trg Kralja Petra 1, Kladovo, Dragan.Marinovic@eps.rs

*Zatim su iz skupa podataka eliminisani pojedini podaci po izboru autora i dobijeni su različiti koeficijenti za polinom šestog stepena. U daljem istraživanju ovi koeficijenti su korišćeni za izračunavanje različitih funkcija i izračunata su odstupanja za svaku od funkcija u odnosu na podatke dobijene merenjem. Dobijeni rezultati ukazuju na mogućnost da i redukovani (nekompletni) skupovi mogu rezultirati sličnim odnosno statistički jednakim modelima. Ova činjenica ukazuje na mogućnost dobijanja modela koji opisuju procese na zadovoljavajućem nivou pouzdanosti i uz povećanu efikasnost. Dobijeni rezultati ukazuju da postoji mogućnost statistički dobrog slaganja rezultata dobijenih merenjem i modeliranjem.*

**Ključne reči – statistika, diskretizacija, polinomna regresija, kontinuirani proces.**





DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.137J](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.137J)

C2 09

**PRIMENA IZOLOVANIH OKRUŽENJA I DIGITALNIH BLIZANACA U  
ELEKTROENERGETICI NA PRIMERU TEHNIČKIH REŠENJA HORIZON  
EUROPE PROJEKTA R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>**

**GORAN JAKUPOVIĆ, MARIJA POPOVIĆ, IGOR BUNDALO, MILAN JOSIFOVIĆ  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN  
DUŠAN PREŠIĆ  
CENTAR ZA KOORDINACIJU SIGURNOSTI -SCC  
NEMANJA VUKOJIĆIĆ  
ELEKTROMREŽA SRBIJE – EMS AD**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* - U ovom radu su prvo opisani osnovni koncepti digitalnih blizanaca („digital twin”) i izolovanih okruženja („sandboxing“), sa posebnim osvrtom na primene u elektroenergetici i SCADA/EMS sistemima. Izolovano okruženje je skup sajber bezbednosnih mera koja podrazumevaju kreiranje okruženja, poznatog kao „sandbox“, u kojem je moguće pokretati, testirati i analizirati kod ili aplikaciju bez uticaja na ostatak aplikacije, druge aplikacije, sisteme ili mreže. Digitalni blizanac podrazumeva stvaranje virtuelnog okruženja koje odražava ponašanje fizičkog sistema, omogućavajući testiranje i analizu bez uticaja na stvarni fizički sistem. Koncept i termin digitalni blizanac koristi se od početka ovog veka. Primena termina digitalni blizanac u tehnologiji elektroenergetskih sistema postala je vrlo popularna u poslednjih nekoliko godina, međutim to ne znači da su digitalni blizanci potpuno novi koncept u tehnologiji elektroenergetskih sistema, budući da modeli elektroenergetskih sistema koji se široko koriste u aplikacijama za elektroenergetske sisteme (EMS) često, ali ne uvek, predstavljaju digitalne blizance fizičkog elektroenergetskog sistema. U okviru ovog rada je dat pregled i opis primene izolovanih okruženja i digitalnih blizanaca u okviru tehničkih rešenja i radnih paketa Horizon Europe projekta „Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R2D2“ (Grant agreement ID: 101075714).

**Ključne reči** —Digitalni blizanci. Izolovana okruženja.

## 1 UVOD

Ovaj rad se sastoji od opšteg pregleda problematike izolovanih okruženja (sandboxing) i digitalnih blizanaca (digital twin) primenjenih u domenu elektonergetike, sa posebnim osvrtom na povezane aktivnosti u sklopu Horizon Europe projekta „Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>” (u daljem tekstu će biti skraćeno referisan kao projekat R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>).

Strateški cilj projekta R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> je poboljšanje otpornosti i pouzdanosti trenutnih elektroenergetskih sistema protiv sve većeg broja pretnji i ranjivosti koje mogu uticati na takvu kritičnu infrastrukturu, otkrivajući slabosti sa štetnim efektima na različite zainteresovane strane i krajnje korisnike. Ovo će se postići primenom četiri proizvoda posvećena prevenciji, zaštiti i obnovi EES u dva različita nezavisna, ali komplementarna scenarija u energetskom lancu vrednosti – od regionalne koordinacije između TSO-ova do privatnosti korisnika. Projekat će biti demonstriran na 4 testne lokacije (Portugal, Slovenija, Srbija i Grčka) oslanjajući se na snažne energetske koordinacione akcije i prateći EU zakonodavstvo, a sve u skladu sa nedavnim aktivnostima koje promovise ENTSO-E o sajber bezbednosti u prenosnim sistemima. Kroz demonstraciju i integraciju inovativnih rešenja koje predlaže R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>, biće moguće postići sigurniji, pouzdaniji i otporniji elektroenergetski sistem u Evropi. U ovom kontekstu, R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> će isporučiti paletu komplementarnih rešenja sintetisanih u četiri proizvoda: “Okvir za procenu višestrukih rizika za elektroenergetski sistem” (*Multi-risk assessment framework for power system*) - **C3PO**, “Paket žilavosti za TSO i DSO” (*Resilience suite for TSO & DSO*) - **IRIS**, “Sistemi prevencije za bezbednost energetskih infrastruktura” (*Prevention Systems For Energy Infrastructures Security*) - **PRECOG** i “Poboljšani alati za održavanje i upravljanje resursima” (*Enhanced Assets Maintenance And Management Toolkit*) - **EMMA**.

U sklopu aktivnosti na celini projekta R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> i u sklopu aktivnosti na razvoju navedenih proizvoda (koji se svi sastoje od više različitih alata) planirano je da se, gde god je to izvodljivo, funkcionalnosti razvijenih proizvoda demonstriraju u izolovanim okruženjima uz korišćenje digitalnih blizanaca kao ekvivalenta fizičkih sistema krajnjih korisnika. U izolovanim okruženjima i pomoću digitalnih blizanaca biće postavljeni ekvivalenti stvarnih sistema krajnjih korisnika u manjem obimu, ali zadržavajući pun opseg funkcionalnosti i interfejsa između komponenti. Različite vrste rizika za EES biće testirane kako bi se stekla relevantna iskustva iz simuliranog odgovora EES-a pre nego što budu demonstrirane na stvarnim sistemima krajnjih korisnika. U slučajevima kada bi demonstracija proizvoda R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> mogla da poremeti normalne operacije EES-a, kontrolisana okruženja će se koristiti za svrhe testiranja.

## 2 IZOLOVANA OKRUŽENJA (SANDBOXING)

Pod izolovanim okruženjem (sandbox) se obično podrazumevaju sigurnosni mehanizmi koji se koriste za izolaciju aplikacija ili procesa u kontrolisanom okruženju, sprečavajući ih da utiču na host sistem ili druge aplikacije. Ova tehnika je ključna za testiranje i razvoj, posebno u sajber bezbednosti i softverskom inženjeringu [1].

Izolovana okruženja se obično koriste kad god se softverske komponente moraju testirati ili koristiti ali trenutno ne mogu biti verifikovane, odnosno kada ih nije moguće smatrati pouzdanim. Sa primerima izolovanih okruženja se sreću, iako toga možda nisu svesni, i korisnici standardnog softvera u njihovom svakodnevnom korišćenju. Svi popularni internet pretraživači (*Microsoft Edge, Google Chrome, itd*), standardni alati za obradu teksta i tabelarne proračune (*Microsoft Word, Microsoft Excel, itd.*), kao i jezgra modernih operativnih sistema primenjuju izolovana okruženja do izvesne mere u cilju zaštite korisnika od zlonamernog koda

(„malware-a“). Korisnici virtualizovanih okruženja, kao što su *Vmware Workstation* i *Oracle Virtualbox*, takođe koriste izolovana okruženja, čak i kada to nije primarni razlog korišćenja virtuelizacije [2].

U kontekstu softverske bezbednosti termin „izolovano okruženje“ je često nejasno definisan. U jednom od prvih radova [3] koji su referisali na ovaj termin je korišćen u kontekstu softverske tehnike „izolacije otkaza“ (*fault isolation*) između softverskih komponenti koje međusobno interaguju u zajedničkom memorijskom prostoru. Međutim, već navedeni primeri izolovanih okruženja u komercijalnim softverskim produktima daju mnogo širu definiciju „izolovanog okruženja“ („sandbox“) od one korišćene u literaturi [3], i u mnogim akademskim radovima je pokušana sistematizacija termina, npr. u [4].

Prema literaturi [2] većina definicija izolovanih okruženja mogu da se podele u dve osnovne grupe:

- Izolovano okruženje u formi enkapsulacije
- Izolovano okruženje u formi primene sigurnosnih politika

Izolovano okruženje u formi enkapsulacije kao analogija najbolje odgovara engleskom terminu „sandbox“ (dečije igralište sa peskom, koje istovremeno štiti dete od povreda, a ograda oko pešćanog igrališta sprečava presipanje peska u okruženje). Enkapsulirano izolovano okruženje obezbeđuje istovremeno zaštitu spoljašnjeg okruženja od otkaza ili štetnog uticaja softverskog modula koji se izoluje, i zaštitu izolovanog modula od štetnog uticaja iz spoljnjih sistema. Najčešće, međutim, izolovana okruženja obično štite spoljnje sisteme od neželjenih uticaja izolovanog („enkapsuliranog“) modula. Primer enkapsuliranog izolovanog okruženja može da bude softverski modul koji se izvršava unutar virtualizovanog okruženja, virtuelne mašine, koja nema mogućnost da utiče na spoljašnje sisteme (a može istovremeno biti i zaštićena od uticaja spoljašnjih sistema).

Izolovano okruženje u formi primene sigurnosnih politika, podrazumeva da postoji softversko okruženje i/ili hardverska oprema koja može da izoluje određene softverske sisteme/module primenom sigurnosnih politika koje definišu šta je dozvoljeno, odnosno zabranjeno sistemu koji se izoluje, zatim kojim resursima iz okruženja mu je dozvoljen pristup, a kojim nije. Mogući primer izolovanog okruženja ovog tipa je softver koji se izvršava na računaru koji se nalazi iza zaštitnog zida („firewall“) na kome su definisana pravila koja ga izoluju od ostatka sistema – mreže.

Za potrebe projekta R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> odlučeno je da će se izolovanim okruženjem smatrati svako rešenje koje se uklapa u bilo koju od ovih definicija i tipova izolovanih okruženja.

Primena izolovanih okruženja u elektroenergetici je originalno povezana sa primenom izolovanih okruženja u zaštiti industrijskih upravljačkih sistema i SCADA sistema čija je bezbednost od ekstremnog značaja za elektroenergetsku infrastrukturu [5]. Izolovana okruženja se u SCADA sistemima mogu primeniti, na primer, u sledećim scenarijima:

- **Za testiranje i validaciju.**  
Izolovana okruženja omogućavaju bezbedno testiranje novog softvera i softverskih „zakrpa“ pre puštanja na produkcione SCADA platforme. Na ovaj način je moguće identifikovati potencijalne probleme bez ugrožavanja aktivnog sistema.
- **Zaštita od malvera i analiza uticaja malvera.**

Na ovaj način je moguće testiranje otpornosti SCADA sistema na uticaj zlonamernog koda u kontrolisanom okruženju bez kompromitovanja produkcionog sistema. Identifikacijom slabosti i potencijalnih bezbednosnih propusta moguće preduzeti preventivne mere za zaštitu produkcionog sistema od napada zlonamernog koda.

- **Reakcija na incident.**

U slučaju da se identifikuje narušavanje bezbednosti u produkcionom sistemu, izolacijom delova sistema može se sprečiti propagacija upada na ostale delove sistema i analiza upada nad izolovanim delom sistema. Da bi ove mere bile zaista efikasne poželjno je da postoje unapred definisana pravila i mehanizmi izolacije sistema, uključujući i automatske mehanizme, koji bi omogućili brzu izolaciju pre širenja problema na druge delove sistema.

- **Obuka i simulacija.**

Izolovana okruženja mogu da se koriste kao okruženje za obuku kako krajnjih korisnika, tako i osoblja zaduženog za bezbednost SCADA sistema, koje može da u simuliranom i izolovanom okruženju da analizira različite scenarije da se priprema za aktivnosti vezane za reakcije na incidente.

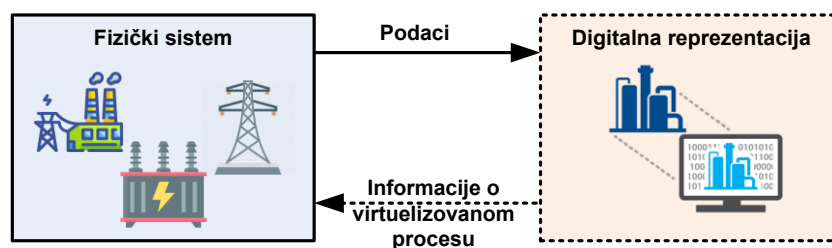
### 3 DIGITALNI BLIZANCI (DIGITAL TWINS)

#### 3.1 Osnovni koncepti digitalnih blizanaca

U literaturi je dostupno više definicija digitalnih blizanaca, ali one nisu uvek dosledne, a detalji definicije obično zavise od specifičnog industrijskog sektora u kome se primenjuju digitalni blizanci.

Sam koncept digitalnog blizanca (digital twin) je u upotrebi od 2002. godine, kada je iskorišćen u prezentaciji Univerziteta u Mičigenu o upravljanju životnim ciklusom proizvoda [6]. Od samog početka pod digitalnim blizancem se podrazumeva digitalni informacioni konstrukt koji reprezentuje fizički sistem. Digitalna informacija predstavlja „blizanca“ informacija koje generiše „stvarni“ fizički sistem i postoji informaciona veza blizanca sa fizičkim sistemom. Osnovni elementi digitalnog blizanca, čiji je uprošćeni koncept dat na Slici 1, su:

- Realni (fizički) prostor/sistem
- Virtuelni prostor/sistem
- Tok podataka između fizičkog i virtuelnog prostora
- Tok podataka između virtuelnog i fizičkog prostora
- Podsystemi (podprostori) digitalne (virtuelne) reprezentacije



Slika 1 Uprošćeni koncept digitalnog blizanca

U [6] su date definicije nekoliko različitih koncepata povezanih sa pojmom digitalnih blizanaca koji su vezani za prvobitnu primenu u kontekstu upravljanja životnim ciklusom proizvoda („Product Lifecycle Management“), koje su date u ovom radu u modifikovanoj formi koja više odgovara primeni u domenu elektroenergetike:

- **Digitalni blizanac** („Digital Twin“ - **DT**): „Digitalni blizanac je skup virtuelnih informacionih konstrukata koji u potpunosti opisuju potencijalni ili stvarni fizički proces ili sistem“;
- **Prototipski digitalni blizanac** („Digital Twin Prototype“ - **DTP**): „Tip digitalnog blizanca koji opisuje prototipski fizički artefakt“. Ovo je tip digitalnog blizanca koji sadrži informacione skupove potrebne za opisivanje i proizvodnju fizičke verzije koja duplira virtuelnu verziju (blizanca). U ovom slučaju se pretpostavlja da se prvo kreira digitalni blizanac, a zatim proizvod, proces ili sistem koga digitalni blizanac reprezentuje.
- **Instancirani digitalni blizanac** („Digital Twin Instance“ - **DTI**): „Tip digitalnog blizanca koji opisuje specifičan fizički sistem, proces ili proizvod sa kojim pojedinačni digitalni blizanac može biti povezan tokom celog životnog ciklusa tog fizičkog procesa ili proizvoda“.
  - Ovde instanca digitalnog blizanca opisuje ponašanje postojećeg fizičkog, procesa, proizvoda ili sistema.
- **Agregacija digitalnih blizanaca** („Digital Twin Aggregate“ – **DTA**): „Tip digitalnog blizanca koji agregira više DTI“. Agregacija digitalnih blizanaca ne predstavlja sama po sebi digitalnog blizanca, već softversko okruženje koje povezuje više digitalnih blizanaca u jedinstveno okruženje i omogućava kreiranje agregiranog „blizanca“ složenog sistema, procesa ili proizvoda agregacijom blizanaca koji reprezentuju komponente sistema manje složenosti.
- **Digitalno blizanačko okruženje** („Digital Twin Environment“ – **DTE**): „Integrirano, multidomensko fizičko aplikativno okruženje za rad sa digitalnim blizancima“.

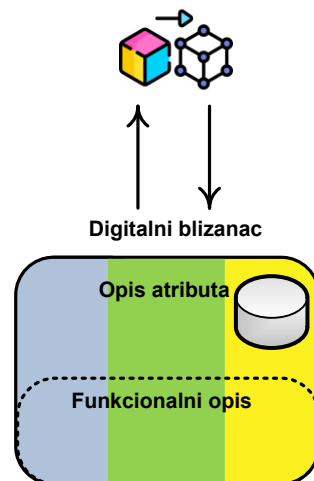
### 3.2 Digitalni blizanci u elektroenergetici

Koncept i terminologija digitalnih blizanaca do skora nisu bili posebno popularni i pominjani u domenu elektroenergetskih sistema i u domenu upravljanja elektroenergetskim sistemima, iako je posebno problematika upravljanja i modelovanja EES vrlo interesantna za primenu digitalnih blizanaca. Ovde treba napomenuti da se u upravljanju EES već decenijama koriste modeli i alati koji se barem delimično uklapaju u originalne definicije vezane za digitalne blizance date u [6], ali bez upotrebe termina i definicija povezanih sa digitalnim blizancima.

Uvođenje distribuiranih i obnovljivih izvora, koji dovode npr. to toga da tok energije više nije obavezno jednosmeran od viših naponskih nivoa ka nižim, već dvosmeran, kao i druge promene u modernim EES, dovele su do povećane kompleksnosti sistema i modela koji ih opisuju u različitim domenima. Povećanje kompleksnosti sistema i njegovih modela rezultira da operatori prenosnog sistema moraju da rešavaju kompleksnije probleme kako u domenu upravljanja tako i u domenu planiranja EES. Digitalni blizanci su prepoznati kao jedan od načina za prevazilaženje ovih novih zahteva [7].

U literaturi [8] je dat sistematski pregled mogućnosti primene digitalnih blizanaca u elektroenergetici i definicije digitalnih blizanaca u elektroenergetici. Prema [8] definicija digitalnog blizanca u elektroenergetici je sledeća: „*Digitalni blizanac u elektroenergetici je virtuelna reprezentacija postojećeg ili budućeg stvarnog objekta, koja se sastoji od*

identifikujućih komponenti, opisa njegovih atributa i njegovih funkcionalnih svojstava. Digitalni blizanac je povezan sa stvarnim objektom i prati ga od početne ideje do reciklaže. Ovo povezivanje sa stvarnim objektom treba da se obavlja autonomno putem digitalne komunikacione infrastrukture, iako je moguće i ručno indirektno povezivanje“. Slika 2 prikazuje grafičku predstavu date definicije



Slika 2 Digitalni blizanac u elektroenergetici

Digitalni blizanac nekog objekta ili sistema se sastoji od dve osnovne komponente [8]: opisa atributa i funkcionalnog opisa, pri čemu se opis atributa sastoji od opisa modela i specifičnih vrednosti atributa. Pristup atributima, kao i obrada atributa, na primer, unutar funkcija analize i evaluacije, omogućeni su kroz funkcionalni opis.

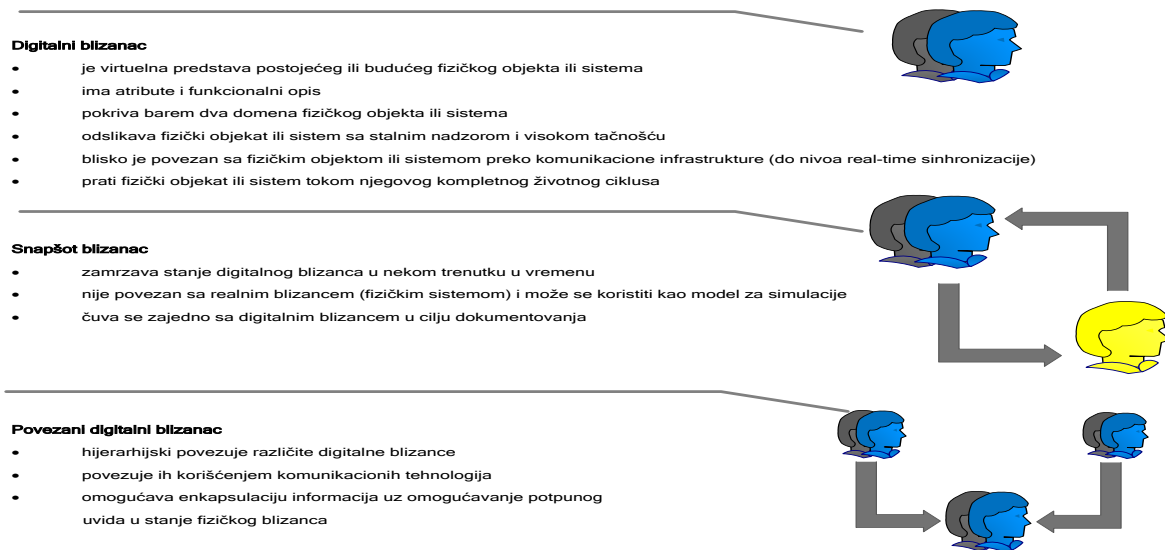
Model koji koristi digitalni blizanac u elektroenergetici (DBEE) mora da simulira ponašanje fizičkog objekta ili sistema sa dovoljnom tačnošću i verodostojnošću, u skladu sa slučajem upotrebe. Osnovno svojstvo DBEE je da pruži opis stanja objekta koji se može ažurirati ili prilagoditi tokom životnog ciklusa objekta. Generalno, model za DBEE treba da poseduje sledeće osobine [9]:

- **Pravovremenost:** Parametri unutar modela mogu se ažurirati na osnovu novih informacija (npr. iz telemetrije) i da su dobijeni rezultati smisleni.
- **Tačnost mapiranja:** Model mora biti dovoljno tačan da ažurirane vrednosti parametara budu relevantne i upotrebljive za odgovarajuću namenu.
- **Vreme odziva** (unutar funkcionalnog opisa): Odluke se mogu donositi u potrebnom vremenskom okviru za odgovarajuću namenu.

**Vrednosti atributa.** Osnovna komponenta DBEE je opis kroz vrednosti atributa, koje se održavaju kao „jedini izvor istine“ (*Single Source of Truth - SSoT*) ili se dobijaju iz drugih DBEE. Podaci bi trebali da budu objektno orijentisani, kontinuirano ažurirani i arhivirani. Oni čine osnovu za opisivanje različitih funkcija. U tu svrhu neophodna je jedinstvena identifikacija svih korišćenih objekata tokom njihovog životnog ciklusa sa mašinski čitljivim, globalno važećim identifikatorima (UUID, univerzalno jedinstveni identifikator). Mora se osigurati da su vrednosti dovoljno validne, strukturirane i mašinski čitljive. Korišćenjem vremenske dimenzije, može se postići sinhronizacija trenutnih ili istorijskih vrednosti atributa sa specifičnim vremenskim stanjem (*snapshot*).

**Funkcionalni opis.** Unutar funkcionalnog opisa, podaci i modeli iz opisa atributa mogu se dalje obrađivati kako bi se mapirale funkcije povezane sa trenutnim ili istorijskim stanjima stvarnog objekta. Ovo može uključivati analizu, praćenje, optimizaciju ili upravljačke funkcije, na primer. Ključno je da sve funkcije isključivo zavise od informacija iz opisa atributa sopstvenih ili drugih DBEE-ova, čime se implementira koncept „jedinstvenog izvora istine“.

**Snepšot blizanac.** Za potrebe simulacije, može se izdvojiti „snapshot blizanac“, koji zamrzava informacije iz određenog trenutka kako bi se izvršile analize kao što su planiranje, „šta-ako“ analize, simulacije u realnom vremenu, sistemi za obuku, itd. Prateći paradigmu čuvanja svih informacija o stvarnom objektu unutar DBEE, snapshot blizanac i rezultati njegove simulacije takođe bi trebali da se čuvaju u bazi podataka DBEE.



Slika 3 Sumarni pregled DBEE koncepta

Navedene definicije, ako se posmatraju striktno, prave distinkciju između digitalnih blizanaca i klasičnih simulatora (dispečerski trening simulator – DTS) i klasičnih modela EES i modela komponenti EES. Konkretno model EES ili neke komponente obično posmatra samo specifične osobine, relevantne za domen primene, i predstavlja samo aproksimaciju realnog sistema. Takođe, modeli ne moraju da imaju sve osobine digitalnih blizanaca kao što su formalni opisi atributa i funkcija. Simulatori, kao što je DTS, koji su široko prisutni u modernim dispečerskim centrima, imaju više zajedničkih komponenti sa digitalnim blizancima. Npr. u konfiguraciji simulatora je moguće identifikovati i opise atributa fizičkog sistema, kao i funkcionalni opis, čak i ako nisu eksplicitno deklarirani kao takvi. Ono što simulaciju razdvaja od digitalnog blizanca je nepostojanje konstantne veze između virtuelnog modela procesa ili objekta i fizičkog modela, odnosno digitalni blizanac podrazumeva postojanje komunikacionog interfejsa između DBEE i realnog fizičkog sveta. Slika 3 sumira objašnjeni DBEE koncept.

### 3.3 Viđenje digitalnih blizanaca u kontekstu projekta R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>

Gornje definicije značajno limitiraju šta se može smatrati digitalnim blizancem, pri čemu je posebno zahtevno ograničenje o postojanju stalnog komunikacionog interfejsa sa fizičkim sistemom. U tom smislu, a posebno u kontekstu povezanosti digitalnih blizanaca sa izolovanim sistemima, u sklopu projekta R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> smo kao digitalne blizance posmatrali i module i sisteme koji mogu, a ne moraju imati stalnu povezanost sa fizičkim sistemom i koji neke funkcije digitalnih blizanaca rade u „simulacionom režimu“ kao neka vrsta „snapshot blizanca“. Posebno sve instance digitalnih ekvivalenata locirane na izolovanim sistemima same po sebi

nisu digitalni blizanci, prema gore navedenim definicijama, pošto nemaju konstantnu informacionu povezanost sa fizičkim procesima i sistemima, ali njihove instance izvan izolovanih sistema se mogu posmatrati kao digitalni blizanci.

Takođe, relaksirani su zahtevi po pitanju modela i atributa u smislu da su kao digitalni blizanci posmatrani i modeli čiji se atributi i funkcionalni opisi odnose na partikularne aspekte posmatranog sistema, bez insistiranja da pokrivaju sve ili veći deo aspekata modela celine sistema. Na primer, ako nas u posmatranom slučaju zanima ponašanje dinamičke topologije sistema, kao „digitalni bliznac“ fizičke elektorenergetske mreže nismo smatrali da je neophodno modelovanje drugih funkcionalnih aspekata i atributa mreže sve dok su korišćeni funkcionalni aspekti i atributi dovoljno verodostojna reprezentacija dinamičke topologije fizičkog sistema.

Takođe, u kontekstu rada u izolovanim okruženjima gde se digitalni blizanci manifestuju kao „snapshot blizanci“ nismo smatrali da je od krucijalnog značaja da se „snapshot bliznac“ nalazi na istom sistemu ili da deli iste baze podataka kao „pravi“ digitalni bliznac, sve dok postoje mehanizmi prenosa „snapshot“-a iz baza digitalnog blizanca u baze „snapshot blizanca“ na izolovanom sistemu, kao i sinhronizacije i ažuriranja modela (funkcionalnih opisa i atributa) između sistema.

## **4 PRIMERI PRIMENE IZOLOVANIH OKRUŽENJA I DIGITALNIH BLIZANACA U PROJEKTU R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>**

### **4.1 Testne lokacije**

Kao što je pomenuto u uvodnom poglavlju, u sklopu projekta R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> je odlučeno da se kod realizacije različitih alata i rešenja u sklopu opisana 4 osnovna proizvoda gde god je moguće adresiraju i dva važna aspekta koji su od posebnog značaja kod kreiranja modernih softverskih rešenja u domenu elektroenergetike. Jedan od ta dva aspekta je aspekt sajber bezbednosti koji se može rešavati na različite načine, a jedna od vrlo efikasnih metoda je primena izolovanih okruženja („sandboxing“), posebno u domenu razvoja i prototipskog testiranja, ali i u domenu implementacije produkcionih okruženja, gde je to god moguće. Drugi aspekt je problem modelovanja kompleksnih sistema gde primena digitalnih blizanaca može da dovede do značajnih unapređenja.

Učesnici u projektu su zaduženi da, u sklopu preliminarog izveštaja o integraciji, demonstraciji i validaciji tehničkih rešenja opišu i dokumentuju i mogućnosti primene izolovanih okruženja i digitalnih blizanaca u sklopu svojih tehničkih rešenja. Na bazi analize dostavljenih opisa u preliminarom izveštaju biće utvrđeno da li i koliko se opisana rešenja uklapaju u usvojene definicije izolovanih okruženja i digitalnih blizanaca. Primeri primene izolovanih okruženja i digitalnih blizanaca dati u ovom poglavlju su generisani na bazi ovog preliminarog izveštaja. U projektu R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> su predviđena 4 testne lokacije, ali su rešenja koja koriste izolovana okruženja i/ili digitalne blizance, u trenutku pisanja ovog rada, prijavljena samo za 3 testne lokacije, data u Tabeli 1 ispod, zajedno sa partnerima odgovornim za testnu lokaciju.



Tabela 1 Lista testnih lokacija na kojima je planirana primena izolovanih okruženja i digitalnih blizanaca

Testna lokacija	Odgovorni partneri
Grčka	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>HEDNO</b> – Grčki operator distributivne mreže</li> <li>• <b>Cyber Noesis</b> – Grčka kompanija specijalizovana za sajber bezbednost</li> <li>• <b>ICL</b> – Imperial College London</li> <li>• <b>Guardtime</b> – Estonska softverka kompanija specijalizovana za sajber bezbednost i blokčejn tehnologije</li> <li>• <b>S2 Grupo</b> – Španska kompanija za sajber bezbednost i zaštitu kritične informacione infrastrukture</li> </ul>
Srbija	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>EMS</b> – Elektromreža Srbije</li> <li>• <b>SCC</b> – Centar za koordinaciju sigurnosti</li> <li>• <b>IMP</b> – Institut Mihajlo Pupin</li> <li>• <b>Guardtime</b></li> </ul>
Slovenija	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Elektro Ljubljana</b> – Slovenački operator distributivne mreže</li> <li>• <b>Guardtime</b></li> </ul>

Uzimajući u obzir ograničenja dozvoljenog broja stranica u okviru ovog rada nećemo opisati sva predložena rešenja već samo neka od njih, tako da bude predstavljeno barem po jedno do dva rešenja (primene izolovanog okruženja i/ili digitalnih blizanaca) po testnoj lokaciji.

## 4.2 Primeri primene izolovanih okruženja i/ili digitalnih blizanaca na testnoj lokaciji Grčka

### 4.2.1 Kaskadni simulator [HEDNO, UCY]

Modeli kaskadnih kvarova za analizu žilavosti („resilience analysis“) su ključni za simulaciju kaskadnih događaja i identifikaciju metoda za poboljšanje žilavosti elektroenergetskih mreža. AC model kaskadnog kvara (AC-CFM) je posebno dizajniran za analizu žilavosti i lako se uklapa u unapred uspostavljene okvire za merenje žilavosti. Može da se nosi sa velikim kontingentima i ekstremnim uslovima rešavanjem problema konvergencije. Model je validiran pristupima radne grupe IEEE PES za kaskadne kvarove. Kaskadni kvar je vođen sukcesivnom aktivacijom zaštitnih mehanizama. Ovo može izazvati dezintegraciju mreže u ostrva; u tom slučaju kaskadni poremećaj se može nastaviti unutar svakog ostrva nezavisno.

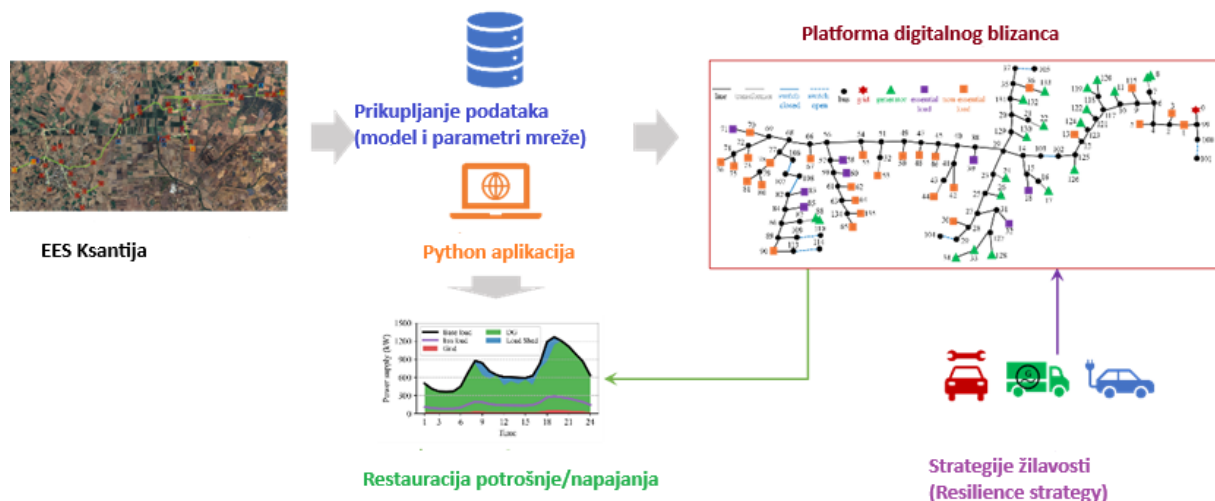
Implementirane su sledeće funkcionalnosti:

- **Rekurzivna primena zaštitnih mehanizama:** Kaskadni kvar je vođen sukcesivnom aktivacijom zaštitnih mehanizama. Ovo može izazvati dezintegraciju mreže u ostrva, u kom slučaju kaskada može nastaviti unutar svakog ostrva nezavisno.
- **Implementacija zaštitnih mehanizama:** AC-CFM model primenjuje različite tipove zaštite sistema, uključujući isključivanje potrošnje pri niskoj i visokoj frekvenciji, itd.
- **Vizualizacija kaskade:** AC-CFM pruža novi način vizualizacije kaskadnih kvarova kao graf nalik stablu. Graf prikazuje uzročnosti u kaskadnim kvarovima i pomaže u ublažavanju uticaja velikih i široko rasprostranjenih nestanaka struje.

Za potrebe implementacije i testiranja u okviru grčke testne lokacije HEDNO će obezbediti *Ubuntu Linux* virtualnu mašinu izolovanu od ostatka sistema. Podaci od SCADA sistema, zajedno sa AMI („Advanced Metering Infrastructure“) skupovima podataka će biti periodično preuzimani korišćenjem namenskih API-ja („Application Programming Interface“). Ovi podaci će bit smeštani u namensku bazu podataka koja će sadržati repliku podataka iz produkcionog okruženja. Na izolovanim serverima ove baze podataka biće dodatno primenjeni isti sigurnosni protokoli koji se koriste i u produkcionim SCADA i AMI okruženjima. Na ovaj način će biti obezbeđeno izolovano okruženje u formi enkapsulacije.

#### 4.2.2 Planiranje i rad napredne multi-energetske mikromreže za poboljšanje žilavosti [ICL]

Rad i planiranje naprednih multi-energetskih mikromreža za poboljšanje žilavosti je alat zasnovan na simulaciji, koji će biti demonstriran u grčkoj testnoj lokaciji na distributivnoj elektroenergetskoj mreži u Ksantiju. Alat ima za cilj optimizaciju predpozicioniranja, kao i odluka o rutiranju i rasporedu mobilnih izvora unutar mreže Ksanti kako bi se maksimizirao proces obnove potrošnje, sa posebnim naglaskom na zahteve ključnih potrošača. Detaljna arhitektura alata je prikazana na Slici 4.



Slika 4 Arhitektura alata za planiranje i rad napredne multi-energetske mikromreže za poboljšanje žilavosti

Konkretno, alat uključuje četiri koraka:

- **Korak 1:** Prikupljanje podataka. Alat će prikupiti stvarne podatke mreže Ksanti, uključujući topologiju mreže, otpornost i reaktansu linija, lokaciju i napon sabirnica, lokaciju opterećenja i aktivnu i reaktivnu snagu, lokaciju generatora i kapacitet aktivne i reaktivne snage, kao i tipove ključnih i manje važnih opterećenja.
- **Korak 2:** Programiranje u *Python*-u. Alat će konstruisati simulaciono okruženje mreže zasnovano na *Python-Gurobi* interfejsu za testiranje strategija planiranja i rada mobilnih izvora, kao i procesa obnove opterećenja za poboljšanje žilavosti.
- **Korak 3:** Scenario prekida. Scenariji prekida će biti generisani kako bi se procenili uslovi opterećenja cele mreže zasnovane na simulacionom okruženju u *Python*-u.
- **Korak 4:** Strategija žilavosti. Planiranje i operativna raspodela mobilnih izvora će biti optimizovani i testirani na osnovu simulacionog okruženja mreže zasnovanog na *Python*-u.

- **Korak 5:** Restauracija potrošnje. Proces restauracije potrošnje cele mreže će biti procenjen na osnovu simulacionog okruženja mreže zasnovanog na *Python*-u nakon implementacije strategija žilavosti planiranja i rada.

Ovo je simulacioni alat, ali kako koristi podatke i telemetriju iz realnog sistema i realne podatke i parametre distributivne mreže Ksanti, može se tvrditi da je to digitalni blizanac stvarnog sistema, ako se usvoje relaksirane verzije definicije digitalnog blizanca o kojima je pisano u poglavlju 3.3.

### 4.3 Primeri primene izolovanih okruženja i/ili digitalnih blizanaca na testnoj lokaciji Srbija

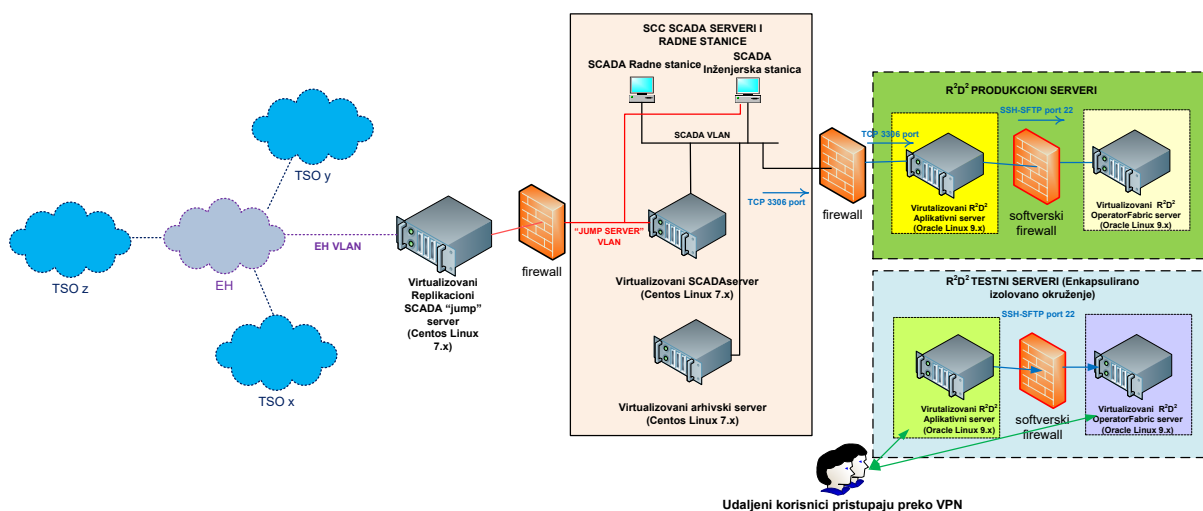
#### 4.3.1 Modul za obnovu sistema kod raspada sistema („system split“) [IMP, EMSS, SCC]

Glavna svrha ovog modula je otkrivanje podele elektroenergetskog sistema na više ostrva na osnovu merenja iz SCADA sistema, a zatim iniciranje vođene komunikacije na regionalnom nivou Jugoistočne Evrope. Ova komunikacija treba da sledi određeni unapred definisani scenario podele sistema i da vodi dispečere kroz sve korake predviđene definisanim pravilima i procedurama, kao i da im pomogne da donesu operativne odluke na osnovu karakteristika razdvajanja sistema. Početni modul, koji sadrži ovu proceduru, razvijen je kao deo projekta *Horizon 2020 TRINITY* [10].

Ovaj modul će biti instaliran u virtualizovanom okruženju u SCC. Prikaz mrežne arhitekture okruženja u SCC koje će biti korišćeno za rad ovog modula je prikazano na Slici 5.

Produkcioni sistem je podeljen u tri glavne bezbednosne zone:

- **„Electronic highway“ (EH)** koja obezbeđuje povezanost SCC SCADA sa SCADA sistemima operatora prenosnih sistema. Ova sigurna zona je izolovana od svih drugih SCC mreža, pri čemu samo SCADA „jump“ server obezbeđuje povezanost sa SCC „proizvodnim“ SCADA serverom/serverima.
- **SCADA zona** u kojoj se nalaze serveri i radne stanice virtualizovanog produkcionog SCADA sistema SCC. Dozvoljena je samo jednosmerna veza prema R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> serverima (SCADA → R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>).
- **R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> zona** u kojoj se nalaze virtualizovani R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> produkciono serveri.



Slika 5 Prikaz mrežne arhitekture okruženja u SCC

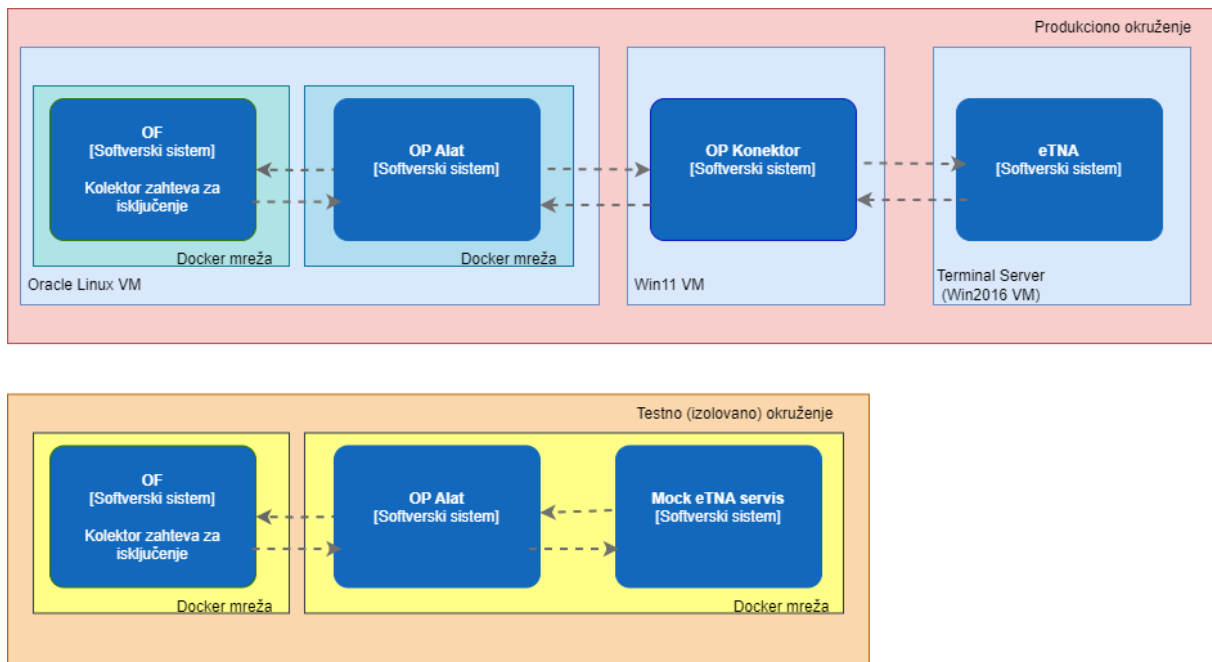
Testni R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> serveri se nalaze u potpuno izolovanom okruženju (**enkapsulirano izolovano okruženje**). Produkciono R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> serveri su izolovani od kritičnih sistema skupom pravila na zaštitnom zidu („firewall“), tako da, iako ih u sklopu projekta ne posmatramo kao izolovano okruženje („sandbox“), predstavljaju svojevrsno **izolovano okruženje bazirano na primeni sigurnosnih politika**.

#### 4.3.2 Modul za planiranje isključenja (Outage Planning) – OP alat [IMP, EMSS, SCC]

OP alat će biti implementiran u prostorijama SCC-a, na *Oracle Linux* virtualnoj mašini (VM), mrežno izolovanoj od drugih sistema, što pruža zadovoljavajuće nivoe izolacije i bezbednosti. S obzirom da data VM radi u izolovanom okruženju, rizik od međusobnog ometanja različitih aplikacija je potpuno uklonjen, čime se obezbeđuje bezbednost sistema, jer aplikacija radi bez uticaja na SCC-ov produkciono sistem ili druge VM-e. Kao dodatni nivo bezbednosti, servisi koji čine OP alat će raditi u *docker* (skup platformi kao uslužnih proizvoda koji koriste virtualizaciju na nivou operativnog sistema za isporuku softvera u paketima koji se nazivaju kontejneri) okruženju – stvarajući izolovanu virtualnu *docker* mrežu. Kako *docker* kontejneri obuhvataju sve zavisnosti i konfiguracije potrebne za pokretanje aplikacije, osiguravaju da se ona ponaša isto u različitim okruženjima (razvoj, testiranje, proizvodnja). U slučaju OP alata, za potrebe razvoja i testiranja, odvojene komponente OP alata će biti izolovane u *docker* kontejnerima, omogućavajući sigurno testiranje u lokalnom okruženju, pre implementacije aplikacije u prostorijama SCC-a. Slika 6 prikazuje arhitekturu OP alata.

Pored OP alata, dve dodatne aplikacije će biti integrisane u ceo sistem:

- **Operator Fabric (OF)** – koristi se za prikupljanje zahteva za planiranje prekida i distribuciju konačnih rezultata procesa koordinacije planiranja prekida. OF se sastoji od nekoliko servisa, od kojih svaki radi u zasebnim *docker* kontejnerima.
- **eTNA softver** – koristi se za izvođenje analiza sigurnosti na odabranom skupu ulaza. eTNA se koristi samo u produkcionom okruženju (implementiran u prostorijama SCC-a), a za testiranje (u izolovanom okruženju), biće kreiran poseban „mock servis“ – na određenoj kombinaciji ulaza, pružiće odgovarajuće izlaze i biće upakovan u *docker* kontejner.



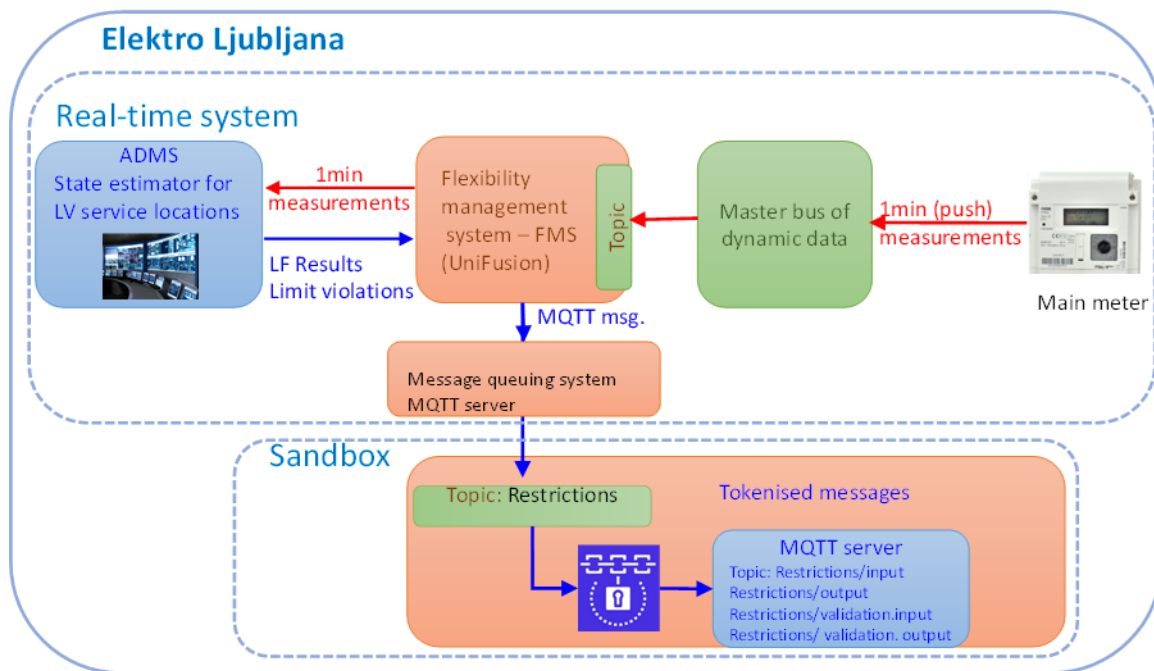
Slika 6 Arhitektura OP alata

#### 4.4 Primeri primene izolovanih okruženja i/ili digitalnih blizanaca na testnoj lokaciji Slovenija

##### 4.4.1 Alat za tokenizaciju [Elektro Ljubljana]

Elektro Ljubljana je obezbedio lokalnu virtuelnu mašinu (VM) sa *Ubuntu* operativnim sistemom, koja je mrežno izolovana od drugih sistema, za instalaciju i pokretanje alata za tokenizaciju, čime se nudi viši nivo bezbednosti i izolacije. Alat za tokenizaciju je pretplaćen na temu gde ELEK-ov sistem za upravljanje fleksibilnošću objavljuje poruke za tokenizaciju. ELEK je obezbedio akreditive kako bi alat za tokenizaciju primao MQTT („Message Queuing Telemetry Transport“) poruke. MQTT je jednostavni protokol za razmenu poruka, zasnovan na konceptu objavljivanja i pretplate („publish & subscribe“), dizajniran za efikasnu komunikaciju između uređaja, posebno u okruženjima sa ograničenim propusnim opsegom i visokom latencijom.

Sistem za upravljanje fleksibilnošću radi u realnom vremenu i objavljuje poruke u sistemu za redove poruka („Message queuing system“). Alat za tokenizaciju u izolovanom okruženju je pretplaćen na istu temu kao i sistem u realnom vremenu.. Zbog rada MQTT servera u realnom vremenu, izlaz alata za tokenizaciju će biti upisan na novi MQTT server na VM u izolovanom okruženju. Slika 7 prikazuje arhitekturu izolovanog okruženja alata za tokenizaciju.



Slika 7 Arhitektura izolovanog okruženja alata za tokenizaciju

## 5 ZAKLJUČAK

U ovom radu je dat prikaz primene konceptata izolovanih okruženja (sandbox) i digitalnih blizanaca (digital twin) u sklopu *Horizon Europe* projekta *Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid - R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>* [11]. Prvo je dat kratak pregled celine projekta. Zatim je dat pregled teorijskih osnova konceptata digitalnih blizanaca i izolovanih okruženja, sa referencama na relevantnu literaturu. Na kraju je dat prikaz nekoliko konkretnih rešenja prema opisima koje su dali partneri u projektu u sklopu preliminarnog izveštaja. U trenutku pisanja ovog rada projekat je u fazi implementacije i integracije softverskih rešenja. Kada bude završena prva faza implementacije i integracije pored testova i validacije funkcionalnosti softvera, biće vršeno i testiranje sajber bezbednosti implementiranih rešenja i izvršena analiza potencijalnih nedostataka u domenu bezbednosti. Takođe će biti validirano da li su i koliko rešenja (uključujući i ona koja nisu prezentovana u ovom radu) zaista saglasna sa konceptima izolovanih okruženja („sandbox“) i digitalnih blizanaca („digital twin“). U ovom trenutku utisak autora je da su rešenja koja su prezentovana saglasna sa standardnim definicijama izolovanih okruženja, ali da rešenja koja implementiraju digitalne blizance se mogu posmatrati kao digitalni blizanci samo ako se uobičajene definicije donekle relaksiraju.

## 6 LITERATURA

- [1] Karagiannis, S., Magkos, E., Ntantogian, C., Ribeiro, L.L. (2020). “*Sandboxing Cyberspace for Cybersecurity Education and Learning*”. In: Boureanu, I., et al. *Computer Security*, ESORICS 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12580. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66504-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66504-3_11)
- [2] Michael Maass, Adam Sales, Benjamin Chung, Joshua Sunshine, “*A systematic analysis of the science of sandboxing*”, PeerJ Computer Science 2:e43; <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.43>, 2016

- [3] Robert Wahbe, Steven Lucco, Thomas E. Anderson, and Susan L. Graham. 1993. “Efficient software-based fault isolation”. Proceedings of the fourteenth ACM symposium on Operating systems principles (SOSP '93). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 203–216. <https://doi.org/10.1145/168619.168635>
- [4] Z. Cliffe Schreuders, Tanya McGill, Christian Payne, “The state of the art of application restrictions and sandboxes: A survey of application-oriented access controls and their shortfalls”, Computers & Security, Volume 32, 2013, Pages 219-241, ISSN 0167-4048, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2012.09.007>.
- [5] <https://publicsafety.ieee.org/topics/cybersecurity-of-critical-infrastructure-with-ics-scada-systems>
- [6] Michael Grieves, John Vickers, “Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt)”, 2016, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
- [7] Timo Wagner, Chris Kittl, Joshua Jakob, Johannes Hiry, “Digital Twins in Power Systems: A Proposal for a Definition”, IEEE Power and Energy Magazine, Volume: 22, Issue: 1, Jan.-Feb. 2024
- [8] Erhard Aumann, Thomas Benz, i drugi, „The Digital Twin in the Network and Electricity Industry“, VDE-Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. Energietechnische Gesellschaft (ETG), 2023
- [9] Louise Wright and Stuart Davidson, “How to tell the difference between a model and a digital twin”, Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences, (2020) 7:13, <https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4>.
- [10] Igor Bundalo, Goran Jakupović, Marko Batić, Srđan Subotić, Dušan Prešić, “The system split and blackout detection application”, IV SEERC Conference, Istanbul, October 2023
- [11] <https://r2d2project.eu>

**APPLICATION OF SANDBOXING AND DIGITAL TWINS IN POWER SYSTEMS  
ON THE EXAMPLE OF TECHNICAL SOLUTIONS OF THE HORIZON EUROPE  
PROJECT R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>**

**GORAN JAKUPOVIĆ, MARIJA POPOVIĆ, IGOR BUNDALO, MILAN JOSIFOVIĆ  
MIHAJLO PUPIN INSTITUTE**

**DUŠAN PREŠIĆ  
SECURITY COORDINATION CENTRE - SCC**

**NEMANJA VUKOJIČIĆ  
ELEKTROMREŽA SRBIJE – JSC EMS  
BELGRADE**

**SERBIA**

*Abstract*— In this paper, the basic concepts of digital twins and isolated environments are first described, with a special focus on applications in power engineering and SCADA/EMS systems. An isolated environment is a set of cybersecurity measures that involve creating an environment, known as a „sandbox“, in which it is possible to run, test, and analyze code or an application without affecting the rest of the application, other applications, systems, or networks. A digital twin involves creating a virtual environment that reflects the behavior of a physical system, allowing testing and analysis without affecting the actual physical system. The concept and term digital twin have been used since the beginning of this century. The application of the term digital twin in power system technology has become very popular in recent years, however, this does not mean that digital twins are a completely new concept in power system technology, as power system models widely used in power system applications (EMS) often, but not always, represent digital twins of the physical power system. This paper provides an overview and description of the application of isolated environments and digital twins within the technical solutions and work packages of the Horizon EU project „*Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>*“ (Grant agreement ID: 101075714), as well as the method of their analysis and testing.

*Key words* — Spisak ključnih reči na engleskom jeziku.



**PRIMENA IZOLOVANIH OKRUŽENJA I DIGITALNIH BLIZANACA U  
ELEKTROENERGETICI NA PRIMERU TEHNIČKIH REŠENJA HORIZON  
EUROPE PROJEKTA R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>**

**APPLICATION OF SANDBOXING AND DIGITAL TWINS IN POWER SYSTEMS  
ON THE EXAMPLE OF TECHNICAL SOLUTIONS OF THE HORIZON EUROPE  
PROJECT R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>**

**GORAN JAKUPOVIĆ, MARIJA POPOVIĆ, IGOR BUNDALO, MILAN JOSIFOVIĆ  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN**

**DUŠAN PREŠIĆ  
CENTAR ZA KOORDINACIJU SIGURNOSTI -SCC**

**NEMANJA VUKOJIČIĆ  
ELEKTROMREŽA SRBIJE – EMS AD  
BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* - U ovom radu su prvo opisani osnovni koncepti digitalnih blizanaca („digital twin“) i izolovanih okruženja („sandboxing“), sa posebnim osvrtom na primene u elektroenergetici i SCADA/EMS sistemima. Izolovano okruženje je skup sajber bezbednosnih mera koja podrazumevaju kreiranje okruženja, poznatog kao „sandbox“, u kojem je moguće pokretati, testirati i analizirati kod ili aplikaciju bez uticaja na ostatak aplikacije, druge aplikacije, sisteme ili mreže. Digitalni blizanac podrazumeva stvaranje virtuelnog okruženja koje odražava ponašanje fizičkog sistema, omogućavajući testiranje i analizu bez uticaja na stvarni fizički sistem. Koncept i termin digitalni blizanac koristi se od početka ovog veka. Primena termina digitalni blizanac u tehnologiji elektroenergetskih sistema postala je vrlo popularna u poslednjih nekoliko godina, međutim to ne znači da su digitalni blizanci potpuno novi koncept u tehnologiji elektroenergetskih sistema, budući da modeli elektroenergetskih sistema koji se široko koriste u aplikacijama za elektroenergetske sisteme (EMS) često, ali ne uvek, predstavljaju “digitalne blizance” fizičkog elektroenergetskog sistema. U okviru ovog rada je dat presek i opis primene izolovanih okruženja i digitalnih blizanaca u okviru tehničkih rešenja i radnih paketa Horizon EU projekta „*Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R2D2*“ (Grant agreement ID: 101075714), kao i način njihove analize i testiranja.

*Ključne reči* – Digitalni blizanci. Izolovana okruženja.



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.154S](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.154S)

C2 10

## **ПРЕДЛОГ НАЧИНА РАСПОДЕЛЕ ТРОШКОВА КОРЕКТИВНИХ МЕРА СА ПРЕКОГРАНИЧНИМ УТИЦАЈЕМ**

**СРЂАН СУБОТИЋ, ЈУЛИЈАНА ВИЋОВАЦ, МИЛИЦА НЕКТАРИЈЕВИЋ,  
АЛЕКСАНДАР ВОЈИНОВИЋ\*  
АД ЕЛЕКТРОМРЕЖА СРБИЈЕ**

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

*Кратак садржај* — Расподела трошкова корективних мера (ремедијалних акција) са прекограничним утицајем је саставни део процеса обезбеђивања сигурности рада преносног система на регионалном нивоу.

Европска Уредба о успостављању смерница за рад система за пренос електричне енергије 1485/2017 [1] која је прилагођена за примену у уговорним странама Енергетске заједнице, у члану 75. предвиђа усвајање методологије за координацију анализа оперативне сигурности. Даље, члан 76. уређује начин доношења и садржај ове методологије и наводи да је њен саставни део и расподела трошкова корективних мера. Такође, ова регулатива наводи да у принципу, трошкове загушења са прекограничним утицајем сносе оператори преносних система сразмерно негативном утицају размене енергије између предметних контролних области на загушени елемент мреже. Приметимо да оваква формулација дозвољава и друге начине за расподелу трошкова корективних мера, што је искоришћено да се у оквиру европског пројекта Reliability, Resilience and Defence technology for the Grid (R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>) [2] разради расподела трошкова која је објашњена у овом раду.

У региону Западног Балкана, оператори преносног система су израдили методологију за координисане анализе оперативне сигурности, али без расподеле трошкова, и она се примењује код корисника услуга регионалног координационог центра СЦЦ, Београд. За разлику од других региона, загушења у мрежи нису толико честа појава, али је приметно да се њихов број повећава, те питање расподеле трошкова корективних мера постаје хитно за решавање.

---

\* Кнеза Милоша 11, 11 000 Београд, [srdjan.subotic@ems.rs](mailto:srdjan.subotic@ems.rs)

Постоји неколико приступа код расподеле трошкова. На пример, трошкове може да сноси оператор који активира корективну меру (што одговара тренутном стању у нашем региону без договора о подели трошкова). Други приступ је да трошкове сноси оператор који захтева покретање корективне мере. Трећи приступ одговара наведеном пасусу из уредбе 2017/1485 – овакав приступ неки називају и "загађивач плаћа".

Предлог расподеле трошкова који је представљен у овом раду полази од чињенице да корективне мере могу проузроковати високе трошкове, па би у нашем региону више одговарао принцип извесне социјализације трошкова, тј. равномернија расподела између укључених оператора. Такође, замишљено је да се расподела трошкова примењује на све корективне мере са прекограничним утицајем које су резултат оптимизације трошкова и договора оператора преносних система у региону.

*Кључне речи* — корективне мере, расподела трошкова, прекогранични утицај, загушење, регионална координација, оперативна сигурност

## 1. УВОД

Као што је већ напоменуто, методологија расподеле трошкова корективних мера са прекограничним утицајем чини један део шире методологије за координацију оперативне сигурности на регионалном нивоу, која се заснива на анализама сигурности. У анализама сигурности се испитује задовољеност критеријума сигурности (у принципу то је N-1 критеријум) на спојеним мрежним моделима. То значи да се у овим анализама испитује испад сваког елемента из скупа елемената (contingency list) и посматра се утицај на скуп елемената (monitoring list). Ови скупови елемената се одређују на основу њиховог прекограничног утицаја, тј. ако се на основу усвојених критеријума оцени да такав утицај постоји, овакав елемент се укључује у наведене листе. У процесу координације оперативне сигурности, анализе сигурности се израђују за наредни дан (day-ahead) и у текућем дану (intra-day), при чему сваком сату одговара један мрежни модел. Као резултат анализа сигурности добија се листа елемената чији испад узрокује преоптерећење на другим елементима, као и износ ових преоптерећења. Ове анализе сада израђују регионални координациони центри, а резултати се достављају операторима преносних система у одређеном региону.

Следећи корак у регионалној координацији оперативне сигурности је одређивање корективних мера које су сврстане у две групе:

- корективне мере без трошкова (ово се најчешће односи на измену уклопних стања у мрежи, промену позиција на трансформаторима са фазним померајем и слично)
- корективне мере са трошковима (ово подразумева редиспечинг)

Правило је да се прво покуша отклањање преоптерећења мерама без трошкова, када је ово могуће. Због тога се приступа примени редиспечинга. Редиспечинг подразумева да се у једној групи тачака мреже подиже производња (или смањује потрошња), док се у другој групи тачака ради супротно, а све у циљу елиминације уочених преоптерећења. Количина укупно активираних активних снага би требало да буде нула, како би систем остао избалансиран.

При избору редиспечинга оператори преносних система би требало да пронађу корективне мере са најмањим укупним трошковима да би решили преоптерећења. Ово је

могуће применом софтвера који ради оптимизацију корективних мера по наведеном критеријуму.

У нашем региону се још увек не користи овакав софтвер, већ се корективне мере бирају на основу искуства. Овде је важно напоменути, да је методологија која је предмет овог рада сачињена тако да се може применити и када се корективне мере буду аутоматски оптимизовале. Додатно, ова методологија полази од претпоставке да у резултату оптимизације неће бити познато колико која корективна мере утиче на отклањање одређених преоптерећења, па то сама методологија одређује при прорачуну расподеле трошкова.

## **2. ОПИС МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА РАСПОДЕЛУ ТРОШКОВА КОРЕКТИВНИХ МЕРА**

Ова методологија за расподелу трошкова корективних мера са прекограничним утицајем се заснива на следећим елементима:

- испадима (contingencies - CNTs) који захтевају примену корективних мера (у изузетним случајевима корективне мере се морају применити и да се отклоне преоптерећења у основном стању, тј. у стању N)
- елементима мреже који се проптерећују услед испада или у основном стању, а који су сврстани у скуп елеманата који су важни за прекограничну размену електричне енергије (cross-border relevant network element with contingency - XNEC)
- трошкови корективних мера (remedial action – RA)
- укључени оператори преносних система, а то су оператори у чијим контролним областима се налазе елементи мреже чији испади проузрокују оптерећења, односно елементи мреже који трпе преоптерећења, односно код којих се налазе средства чијом активацијом се остварују корективне мере

Као што се може приметити, основни елементи ове методологије одговарају садржају анализа сигурности.

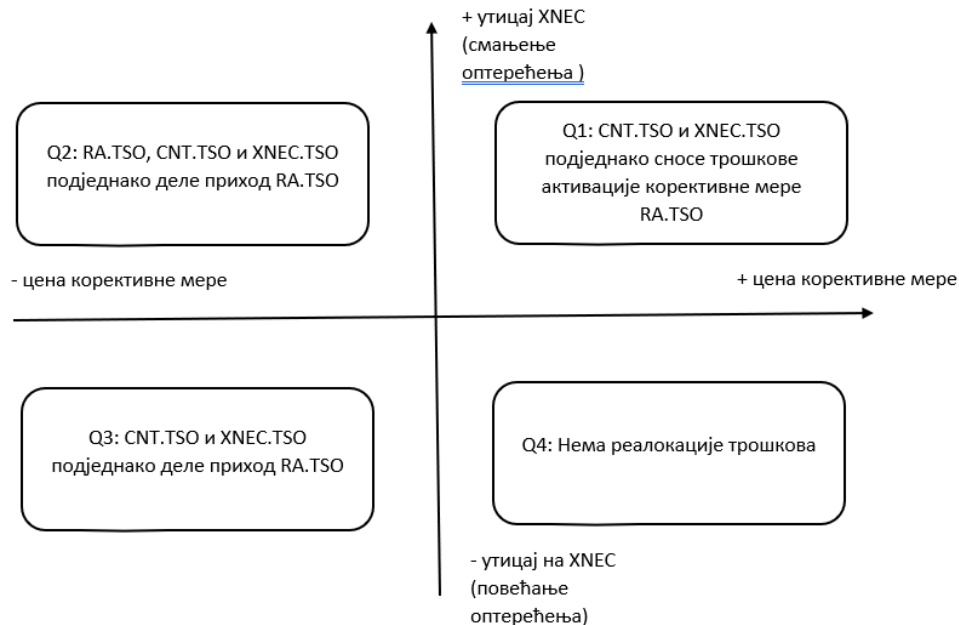
Ова методологија за расподелу трошкова са прекограничним утицајем има два дела:

- технички део који служи да се препозна колико свака корективна мера утиче на одређени пар испад – преоптерећени елемент
- други део који даје основне принципе социјализације расподеле трошкова који су претходно декомпоновани у техничком делу

Почнимо са описом другог дела који је једноставнији. Он се заснива на прописаној обавези оператора преносних система у Европској унији и Енергетској заједници да на координисани начин обављају све активности са прекограничним утицајем, што се односи и на развој система (ЕНТСО-Е израђује план развоја са којим се после усаглашавају планови развоја оператора преносних система). Приликом планирања развоја узимају се највероватнији сценарији који обухватају и прекограничну размену електричне енергије. Исто се односи и на процесе оперативног планирања, укључујући прорачун прекограничних капацитета, као и на управљање системом у реалном времену.

Због свега тога, у наведеној методологији полази се од претпоставке да су за поједино преоптерећење подједнако одговорни и оператор преносног система у чијој

контролној области је елемент чији се испад симулира, као и онај у чијој контролној области је елемент мреже који се преоптерећује, и они би требало да надоканде трошкове корективне мере оператору који их активира.



Слика 1 – правила социјализације трошкова корективних мера

Овај принцип је разрађен за различите случајеве на слици 1. На њој видимо координатни систем где је на  $x$  оси цена корективних мера која може бити позитивна и негативна. Код позитивне цене оператор преносног система плаћа пружаоцу услуге редиспечинг, а супротно је код негативне цене. На  $y$  оси је утицај корективне мере на преоптерећење одређеног елемента – код позитивног утицаја корективна мера смањује оптерећење на преоптерећеном елементу, а супротно је на негативном делу ове осе. На тај начин добили смо четири квадранта и четири основна правила за расподелу трошкова корективних мера:

- Први квадрант се односи на случај када постоји позитиван утицај корективне мере на преоптерећени елемент (смањење оптерећења) а цена корективне мере је позитивна. У овом квадранту оператор система чији елемент испада (CNT.TSO) и оператор чији елемент трпи преоптерећење (XNEC.TSO) подједнако сnose трошкове оператора који активира корективну меру у својој контролној области (RA.TSO) и који плаћа ове трошкове даваоцу услуге.
- У другом квадранту и даље постоји позитиван утицај корективне мере на преоптерећени елемент, али је цена негативна. У овом случају CNT.TSO, XNEC.TSO и RA.TSO подједнако деле приход од редиспечинга које RA.TSO наплати од пружалаца услуге.
- У трећем квадранту цена је негативна, а постоји и негативан утицај корективне мере на преоптерећени елемент. Ово се може јавити када је корективна мера одабрана да смањи преоптерећење на неком другом елементу, али се не може занемарити утицај на посматрани елемент. У том случају CNT.TSO и XNEC.TSO подједнако деле приход од редиспечинга које RA.TSO наплати од пружалаца услуге (овде се од RA.TSO узима сав приход јер се сматра да се овим финансирају друге корективне мере којима се смањује оптерећења на посматраном елементу).

- Четврти квадрант покрива трошкове када је цена редиспечинга позитивна, а он има негативан утицај на посматрани елемент. Овде нема реалокације трошкова јер се сматра да то може бити само изузетно и само у занемарљивој мери (алгоритам оптимизације трошкова корективних мера би требало да у принципу онемогући овакве случајеве).

Изузетно, преоптерећење се може јавити и у основном стању. Тада се примењује иста логика, али у овом случају не постоји CNT.TSO.

На основу ових принципа праве се могуће комбинације за одређени регион. Комбинације се одређују на основу: 1) оператора преносних система у региону, 2) који оператор активира корективну меру (RA.TSO), 3) који оператори су власници почетнег и крајњег чвора преоптерећеног елемента (CNT1.TSO, CNT2.TSO), 4) који оператори су власници почетнег и крајњег чвора испалог елемента (XNEC1.TSO, XNEC2.TSO), 5) квадранту (према слици 1). За те комбинације, у складу са објашњењима датим у вези слике 1, одређују се коефицијенти за расподелу трошкова (или прихода) корективних мера. На слици 2 се види део комбинација за замишљени регион коме припадају оператори преносног система у Србији, БиХ и Црној Гори.

RA.TSO	CNT1.TSO	CNT2.TSO	xNEC2.TSO	xNEC1.TSO	Q	RSBA	RSME	BAME
BA	ME	BA	ME	RS	3	-0.25	0.00	0.50
BA	ME	BA	ME	RS	2	-0.17	0.00	0.33
BA	ME	BA	ME	RS	1	0.25	0.00	-0.50

Слика 2 – комбинације расподеле трошкова

Сада можемо прећи на објашњавање техничког дела методологије.

У првом кораку формира се матрица MatrixXNECoverloadCNT која приказује колико се сваки преоптерећени елемент (XNEC) преоптерећује у процентима приликом одређеног испада (CNT) – пример матрице је дат на слици 3. У овој и свим осталим матрицама, прва колона и први ред су заглавља, и садрже идентификаторе XNEC, CNT и RA, а остало су поља матрице са параметрима.

CNT/XNEC	LN-JBISTR2-XPL_BI2-1	LN-XPL_BB2-JBBAST2-1
LN-XPL_BB2-JBBAST2-1	28.59	0
Z-XKO_LA1-OLASTV1-1	5.34	0
LN-WTUGL1-WTUZL41-1	2.39	0
LN-JBISTR2-XPL_BI2-1	0	7.18

Слика 3 – пример матрице MatrixXNECoverloadCNT

RA/XNEC	LN-JBISTR2-XPL_BI2-1	LN-XPL_BB2-JBBAST2-1
OHPIVA21	-0.1820	0.1348
JHBBAS21	0.1047	-0.1325
JTENTA11	0.0294	-0.0232
JTENTA12	0.0294	-0.0232

Слика 4 – пример матрице MatrixXNECRAptdf

Осим тога, потребно је направити и матрицу MatrixXNECRAptdf. У овој матрици се налази ptdf фактори који показују колико снаге одређене корективне мере се расподељује на преоптерећени елемент (извор транскације је ентитет који даје редиспечинг, а понор је балансни чвор мрежног модела). Ово је дато на слици 4. Вредности у пољима ове матрице треба помножити са -1 ако редиспечинг генератора из прве колоне подразумева смањење производње. Такође, уколико је вредност ptdf фактора мања од одабране вредности за осетљивост прорачуна, онда се у овакво поље матрице уписује вредност 0. На овај начин се поједностављује прорачун уз занемарљив утицај на резултат прорачуна.

RA/XNEC	LN-JBISTR2-XPL_BI2-1	LN-XPL_BB2-JBBAST2-1
OHPIVA21	2	2
JHBBAS21	1	1
JTENTA11	1	1
JTENTA12	1	1

Слика 5 – пример матрице MatrixXNECRAquadrant

Даље, прави се матрица MatrixXNECRAquadrant (слика 5) чији редови одговарају RA, а колоне XNEC, док се у поља уписује број квадранта према опису са слике 1.

RA/XNEC	LN-JBISTR2-XPL_BI2-1	LN-XPL_BB2-JBBAST2-1
OHPIVA21	-1,723.54	-1,276.46
JHBBAS21	4,415.50	5,584.50
JTENTA11	6,709.28	5,290.72
JTENTA12	6,709.28	5,290.72

Слика 6 – пример матрице MatrixAllCNT

Сада се може направити матрица MatrixAllCNT. И она има иста заглавља као и претходне три матрице, тј. у редовима су дате корективне мере, а у колонама преоптерећени елементи. Такође, и ова матрица се односи на све испаде који узрокују преоптерећења. Вредност поља ове матрице добија се тако што се цена RA у одређеном реду помножи са вредношћу из поља матрице MatrixXNECRAptdf са истим индексима, а подели са збиром свих ptdf вредности за тај ред MatrixXNECRAptdf матрице. На овај начин су трошкови корективне мере подељени на све преоптерећене елементе пропорционално утицају која та корективна мера има на преоптерећене елементе. Пример ове матрице је дат на слици 6.

У наредном кораку праве се матрице MatrixCNT и то за сваки од испада (слика 7). Оне имају исте редове и колоне као и матрица MatrixAllCNT. Вредности у пољима ове матрице добијају се тако што се вредност из поља са истим индексима матрице MatrixAllCNT множи са вредношћу из MatrixXNECoverloadCNT матрице са истим индексима, а дели са сумом вредности из те колоне MatrixXNECoverloadCNT матрице. На тај начин, вредност из матрице MatrixCNT се дели у матрицама за појединачни испад пропорционално преоптерећењу које узрокује испад на преоптерећени елемент.

RA/XNEC	LN-JBISTR2-XPL_BI2-1	LN-XPL_BB2-JBBAST2-1
OHPIVA21	-1,356.72	0.00
JHBBAS21	3,475.75	0.00
JTENTA11	5,281.34	0.00
JTENTA12	5,281.34	0.00

Слика 7 – пример матрице MatrixCNT

Када се за сваки испад (и евентуално за основно стање) направи ова матрица, може се приступити примени критеријума са слике 1, односно 2. За свако поље из матрица MatrixCNT једнозначно је одређено који оператор је RA.TSO, CNT1TSO, CNT2.TSO, XNEC1TSO и XNEC 2TSO. Вредност квадранта се одређује из матрице MatrixXNECRAquadrant, односно тражи се вредност у пољу које одговара RA и XNEC за поље MatrixCNT које се обрађује. Сада је потребно помножити вредност поља матрице MatrixCNT са коефицијентима који одговарају прерасподели трошкова између оператора преносних система. Добијене вредности за свако од поља за сваку од матрица MatrixCNT се сабирају и тако се добија коначни резултат, односно износи који се међусобно уплаћају између оператора у региону.

### 3. ПРИМЕР ПРИМЕНЕ МЕТОДОЛОГИЈЕ

У овом одељку илустроваћемо неке ефекте ове методологије на примеру тзв. контратрговине.

Нека између TCO-A и TCO-B постоје два вода, и нека се код испада једног вода проптеређује други. Примењени редиспечинг би био да нпр. TCO-A подигне производњу, а TCO-B смањи производњу за исти износ. Као резултат имамо трансакцију од TCO-A ка TCO-B која треба да отклони преоптерећење што представља контратрговину.

У својимо да је у првом случају TCO-A платио ремедијалну акцију 1000 н.ј. а TCO-B 500 н.ј. Када применимо предложену методологију, тада долазимо до једне крајње матрице MatrixCNT:

RA \ XNEC	Вод TCO-A – TCO-B
RA-1 (TCO-A)	1000
RA-2 (TCO-B)	500

Сада примењујемо кључ за расподелу трошкова. RA-1 се налази у првом квадранту, па власници вода надокнађују све трошкове оператору који активира корективну меру. Пошто су оба оператора власници, то TCO-B преузима 500 н.ј. трошкова. RA-2 се такође налази у првом квадранту, па из истог разлога сада TCO-A преузима трошак од 250 н.ј. То значи да на крају оба оператор сnose трошак од 750 н.ј.

Размотримо шта се дешава ако је TCO-A платио ремедијалну акцију 1000 н.ј. а TCO-B приходовао 300 н.ј. Када не постоји регионална методологија, тада је TCO-A у врло неповољном положају. Међутим, ако применимо предложену методологију, тада долазимо до следеће матрице MatrixCNT:

RA \ XNEC	Вод TCO-A – TCO-B
RA-1 (TCO-A)	1000
RA-2 (TCO-B)	-300

Сада примењујемо кључ за расподелу трошкова. RA-1 се налази у првом квадранту, па власници вода надокнађују све трошкове оператору који активира



корективну меру. Пошто су оба оператора власници, то ТСО-Б преузима 500 н.ј. трошкова. RA-2 се налази у другом квадранту, па оператор који активира дели приход са власницима далековода. То значи да ТСО-Б преноси ТСО-А још 75 н.ј. па на крају ТСО-А има трошак од 425 н.ј. а ТСО-Б 275 н.ј. Дакле, разлика је знатно мања, али оба ТСО-а нису у истом положају. Међутим, ако бисмо применили правило у квадранту 2 које важи за квадрант 3, тада би ТСО-Б дао све приходе власницима преоптерећеног вода, и тада би оба оператора имали подједнак трошак.

Али, погледајмо сада следећу ситуацију:

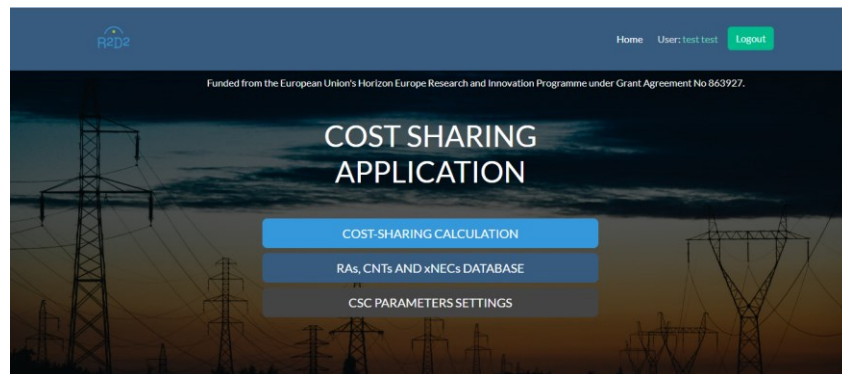
RA \ XNEC	Вод ТСО-А – ТСО-Б
RA-1 (ТСО-А)	1000
RA-2 (ТСО-Б)	500
RA-3 (ТСО-Ц)	-300

У овом случају, ТСО-А и ТСО-Б ће сносити трошак од по 650 н.ј. а ТСО-Ц ће задржати 100 н.ј. Основно питање је да ли ТСО-Ц треба да задржи део за себе?

Већ из ове кратке анализе види се да се о кључу за расподелу трошкова може дискутовати, и да он треба да буде резултат договора оператора преносних система у региону, а на основу анализе већег броја примера. Међутим, добро је да је софтвер који је описан у следећем одељку сачињен тако да се технички део методологије налази у коду, док је кључ са расподелу трошкова дат у придруженој бази података, те се лако може мењати.

#### 4. ОПИС СОФТВЕРА ЗА РАСПОДЕЛУ ТРОШКОВА КОРЕКТИВНИХ МЕРА

Поменути европски пројект Reliability, Resilience and Defence technology for the Grid (R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>) [2] није искоришћен само да се изради описана методологија, већ и да се креира одговарајући софтвер, који би се користио у регионалном координациом центру за наш регион (СЦЦ, Београд).



Слика 8 – главна маска апликације за прорачун расподеле трошкова корективних мера

Апликација је развијена с мерама за повећање безбедности, укључујући идентификацију и смањење потенцијалних претњи, коришћењем проверених алата и ручне провере кода. За инфраструктурни део апликације (backend) је коришћен PHP као примарни програмски језик, уз интеграцију са SQL скриптама и ORACLE базом података, што омогућава поузданост и скалабилност система.

Са друге стране, за део апликације који служи за интеракцију са корисником (frontend), коришћен је HTML5 за структурирање садржаја, JavaScript за динамичне функционалности и интерактивност, док је Bootstrap CSS 3 омогућио модеран дизајн.

Посебна пажња посвећена је управљању спољним кодом из екстерних библиотека, уз осигурање да су коришћене само темељно проверене, безбедне и поуздане библиотеке. Овај приступ смањује ризик од увођења рањивости у апликацију и осигурава стабилност и компатибилност са системом. Како би се код лакше одржавао и смањиле грешке, постављени су јасни стандарди за одржавање кода и уведени алати за проверу његовог квалитета. Апликација користи релациони модел базе података како би осигурала тачност и доследност података, укључујући правила за јединственост и повезаност података.

Поред тога, аутентификација и ауторизација су примењене на нивоу базе података и апликације, омогућавајући сигурно управљање корисничким правима и приступом.

Ова апликација има три основна дела, што се може видети и на главној маски апликације (слика 8):

- део који служи за прорачун расподеле трошкова;
- базе података;
- подешавање параметара прорачуна.

Део који служи за прорачун расподеле трошкова садржи маске које служе за унос:

- датума и времена на који се односи прорачун;
- трошкова активираних корективних мера (ознака ентитета, смер активне снаге, трошак или приход оператора) које достављају оператори преносних система;
- испада који проузрокују преоптерећења, преоптерећених елемената мреже и процената преоптерећења (уноси се на основу анализа сигурности);
- датотека са токовима у основном стању (како би се одредили квадранти) за посматрани дан и сат (креира их софтвер за прорачун токова снага);
- датотеке са RTDF факторима за посматрани дан и сат (такође их креира софтвер за прорачун токова снага).

Када се заврши са уносом података покреће се прорачун и добија се излазни извештај са резултатима прорачуна расподеле трошкова корективних мера са прекограничним утицајем.

Базе података обухватају неопходне податка о мрежним елементима и ентитетима који обезбеђују корективне мере, као и о томе у којим контролним областима се они налазе.

Подешавање параметара за прорачун расподеле трошкове обухвата факторе са слике 2, као и границу испод које се занемарује утицај корективне мере на одређени мрежни елемент.

## 5. ЗАКЉУЧАК

Методологија која је укратко описана у овом раду представља покушај аутора да се оснажи регионална сарадња у домену оперативне сигурности, али и регионални координациони центар са седиштем у Београду.

Са једне стране, намера је била да се спроведу обавезе из регулативе ЕУ 2017/1485 [1], а са друге да се направи методологија која би одговарала потребама оператора преносних система у региону. Осим тога, методологија је направљена тако да је могућа њена реализација у краћем времену и кроз софтвер са нижом ценом. При томе се имало у виду и отклањање дерогација које је ЕНТСО-Е одобрио операторима преносних система у региону са оквирним роком до 2025. године.

Срећна околност је била та што су ове активности укључене у европски пројект Reliability, Resilience and Defence technology for the Grid (R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>) [2], па су активности на развоју методологије и пратећег софтвера већим делом финансиране из фондова ЕУ. У тренутку писања овог рада управо се завршава радни пакет који се односи на развој производа, док преостају демонстрационе активности.

Методологија је незванично представљена појединим операторима преносних система у региону, али још увек нису добијени конкретни коментари. Са друге стране, званичан пут подразумева формалну регионалну сарадњу, тј. израду заједничког предлога свих оператора преносних система и одобравање методологија од свих регулаторних тела у региону. Међутим, због политичких околности ово тренутно није могуће, али је можда могуће да се заинтересовани оператори преносних система уговорно обавезу на привремену примену ове методологије док се не промене политичке околности.

Дакле, време тек треба да покаже како ће предлог ове методологије бити прихваћен. За очекивати је да у том процесу дође до извесних промена у методологији. И у току саме израде методологије било је извесних недоумица. Ово се пре односи на принципе расподеле трошкова, а мање на технички део методологије. Осим недоумице представљене у примеру у одељку 3., могуће побољшање ове методологије је да се примени посебан кључ, ако заиста дође до испада елемента мреже и последичног преоптерећења. Такође, методологија би се вероватно морала проширити за случај већих каскадних поремећаја. Међутим, и оваква каква је сада, она вероватно може да реши велику већину случајева активације корективних мера са прекограничним утицајем.

Други правац унапређења би се односио на сам софтвер. Уколико се методологија званично прихвати могуће је унапредити софтвер кроз повезивање са апликацијом за прорачун токова снага што омогућава аутоматизацију читавања токова у основном стању, односно прорачун PTDF матрице. Осим тога, могуће је искористити рад на овој методологији да се аутоматизује оптимизација трошкова корективних мера. Иницијално је био план да се и то покуша направити током пројекта R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> [2] али се касније одустало јер се показало да недостају ресурси.

Колико је важно да се унапреди регионална координација сигурности видело се посебно током поремећаја од 21.6.2024. када је дошло до распада система у Ц. Гори, Албанији, БиХ и Хрватској.

## **ЗАХВАЛНИЦА**

Овај документ је израђен на основу резултата пројекта који се финансира уз помоћ Европске уније. Садржај овог документа је искључива одговорност аутора и ни под којим околностима се не може сматрати да одражава став Европске уније.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Уредба о успостављању смерница за рад система за пренос електричне енергије – Commission Regulation (EU) 2017/1485 of 2 August 2017 establishing a guideline on electricity transmission system operation
- [2] Reliability, Resilience and Defence technology for the Grid (R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>) <https://r2d2project.eu>

# PROPOSAL FOR THE DISTRIBUTION OF THE COSTS OF REMEDIAL ACTIONS WITH A CROSS-BORDER IMPACT

SRĐAN SUBOTIĆ, JULIJANA VIČOVAC, MILICA NEKTARIJEVIĆ,  
ALEKSANDAR VOJINOVIĆ\*  
ELEKTROMREŽA SRBIJE JSC

BELGRADE

SERBIA

*Abstract — The distribution of the costs of remedial actions with cross-border impact is an integral part of the process of ensuring the security of the transmission system at the regional level.*

*Commission Regulation (EU) 2017/1485 establishing a guideline on electricity transmission system operation [1] that is adapted for application in the Energy Community, in Article 75 provides for the adoption of a methodology for the coordination of operational security analyses. Furthermore, Article 76 regulates the way of adoption and the content of this methodology and states that its integral part is also the distribution of the costs of remedial actions. Also, this regulation states that, in principle, congestion costs with cross-border impact are borne by transmission system operators in proportion to the negative impact of energy exchange between the relevant control areas on the congested network element. Let's note that this formulation also allows for other ways of distributing the costs of remedial actions, which was used to elaborate the distribution of costs explained in this paper within the framework of the European project Reliability, Resilience and Defense technology for the Grid (R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>).*

*In the Western Balkans region, the transmission system operators have developed a methodology for the coordination of operational security analysis, but without cost distribution, and it is applied to users of the services of the regional coordination center SCC, Belgrade. Unlike other regions, congestions in the network are not so common, but it is noticeable that their number is increasing, so the issue of distributing the costs of remedial actions becomes urgent to solve.*

*There are several approaches to cost allocation. For example, the costs may be borne by the operator who activates the remedial action (which corresponds to the current situation in our region without an agreement on cost sharing). Another approach is that the costs are borne by the operator who requests the initiation of remedial action. The third approach corresponds to the mentioned paragraph from Regulation 2017/1485 – this approach is also called "polluter pays" by some.*

*The cost distribution proposal presented in this paper is based on the fact that remedial actions can cause high costs, so the principle of certain socialization of costs would be more appropriate in our region, i.e. more even distribution between the involved operators. Also, it is assumed that the distribution of costs is applied to all remedial actions with cross-border impact, which are the result of cost optimization and agreement of transmission system operators in the region.*

**Key words** — remedial actions, cost allocation, cross-border impact, congestion, regional coordination, operational security

---

\* Кнеза Милоша 11, 11 000 Београд, srdjan.subotic@ems.rs



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.165V](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.165V)

C2 11

## АПЛИКАЦИЈА ЗА АУТОМАТСКУ ИЗРАДУ ТОПОЛОШКОГ ФАЈЛА ПОТРЕБНОГ ЗА КРЕИРАЊЕ МРЕЖНИХ МОДЕЛА

ЈУЛИЈАНА ВИЋОВАЦ, МАРИЈА МИЉУШ, НЕНАД ЈАНКОВИЋ, СРЂАН  
СУБОТИЋ, ЈАСМИНА ЂОРЂЕВИЋ, ЈЕЛЕНА ЂУРЂЕВИЋ, МИЛОШ МИЋИЋ,  
АЛЕКСАНДРА МИКОВИЋ\*  
АД ЕЛЕКТРОМРЕЖА СРБИЈЕ

БЕОГРАД

СРБИЈА

*Кратак садржај* — Оператор преносног система ЕМС АД свакодневно израђује мрежне моделе за дан унапред (D1CF), два дана унапред (D2CF) и унутар дана (IDCF) према захтевима ENTSO-E. Са циљем даљег унапређења, у ENTSO-E се све више инсистира како на повећању тачности мрежних модела, тако и на изради додатних модела. Тренутни циљ је да се у блиској будућности мрежни модели, поред досадашњих, свакодневно израђују и за 24 сата за седам дана унапред, као и сваког сата унутар дана за све преостале сате текућег дана (уместо на сваких 8 сати како је тренутно).

Како се за креирање мрежних модела користе четири улазна фајла (подаци о потрошњи, производњи, размени и топологији) јавља се потреба за аутоматизацијом њиховог креирања у циљу испуњења свих захтева које намеће ЕНТСО-Е, што подразумева смањење утицаја људских грешака и повећање ефикасности процеса израде ових модела.

Најкомплекснији фајл који се користи за израду мрежних модела представља планирана топологија система и он садржи тополошки статус (укључен/искључен) елеманата мреже, односно високонапонских водова, трансформатора и спојних поља. У нашем систему, највећи број промена топологије система узрокован је планираним радовима у преносном систему, те је ове податке неопходно укључити у тополошки фајл на одговарајући начин.

У овом раду дат је преглед свих активности које су спроведене како би се успоставило аутоматско креирање тополошког фајла. Описане активности су

---

\* Војводе Степе 412, 11 000 Београд, [julijana.vicovac@ems.rs](mailto:julijana.vicovac@ems.rs)

спроведене кроз европски Horizon 2020 пројекат Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid - R2D2 [2]. Поред израде саме апликације за аутоматско креирање тополошког фајла, дат је и осврт и на проширење модела у бази техничког информационог система, за све категорисане елементе (високонпонске водове, трансформаторе, далеководна поља, трансформаторска поља, кабловска поља, сабирнице, сабирничке растављаче) и мапирање са јединственим *simID*, као и проширење већ постојеће апликације за одабравање искључења у преносном систему, што је све било неопходно како би се аутоматизовала израда тополошких фајлова.

*Кључне речи* — ТТА (Topology Transfer Application), захтев за искључење, тополошки фајл, *simID*

## 1. УВОД

ЕМС, као оператор преносног система, свакодневно израђује индивидуалне мрежне моделе за процесе дан унапред (DACF), два дана унапред (D2CF) и унутар дана (IDCF). Са новим захтевима ЕНТСО-Е [1] који се односе на повећање тачности, као и броја мрежних модела које је потребно израдити сваког дана, јавила се потреба за аутоматизацијом израде улазног тополошког фајла, који се користе за израду индивидуалних мрежних модела.

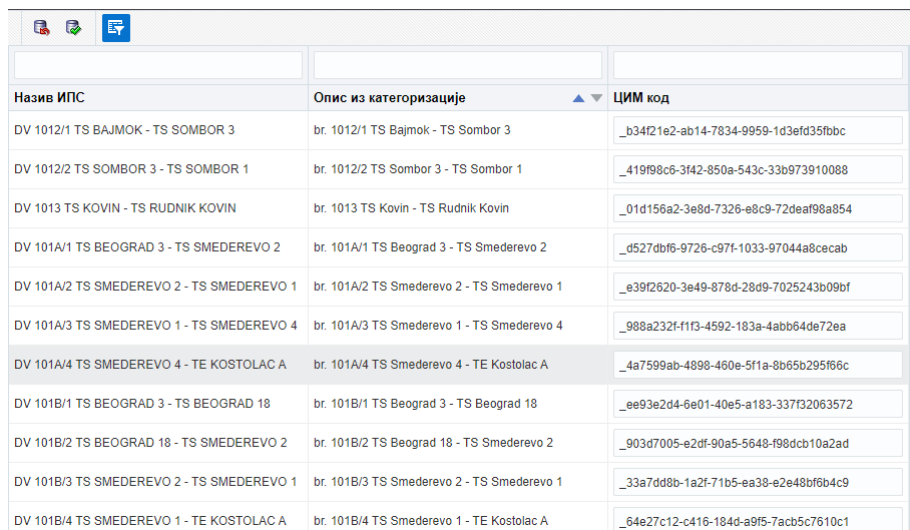
Тополошки фајлови садрже информације о предвиђеној топологији (укључен/искључен) сваког елемента мреже у сваком сату одређеног дана. Највећи утицај на промене стандардног уклопног стања које је моделовано у основном тополошком фајлу имају планирана искључења у мрежи. Подаци о овим искључењима преузимају се из процеса обраде захтева за искључење кроз апликацију „Радови“, а затим се ручно обрађују како би се направио одређени тополошки фајл. Због великог броја модификација које је потребно урадити, постоји велика вероватноћа да ће се јавити грешке у топологији, што представља значајан ризик за обезбеђење сигурности рада система. Наиме, ове грешке могу довести до грешака у анализама сигурности и одређивању корективних мера за уочена преоптерећења при симулираним испадима, а последично до грешака у управљању системом у реалном времену.

Како је циљ је да се у блиској будућности мрежни модели, поред досадашњих, свакодневно израђују још и за 24 сата за седам дана унапред, као и сваког сата за све преостале сате текућег дана, направљена је апликација ТТА. Помоћу ове апликације омогућено је аутоматско креирање тополошког фајла који је један од четири улазна фајла за креирање индивидуалних мрежних модела, и то на основу базног тополошког фајла и података о изменама у топологији који се аутоматски преузимају из апликације „Радови“.

Међутим, у раној фази израде ТТА апликације закључено је да је паралелно са њеним развојем неопходно увести одређена прилагођавања и у апликацији „Радови“, као и обезбедити проширење базе техничког информационог система, како би се на адекватан начин могле пренети информације из одобрених захтева до тополошког фајла.

## 2. ПРИПРЕМНЕ АКТИВНОСТИ ЗА АУТОМАТСКО КРЕИРАЊЕ ТОПОЛОШКОГ ФАЈЛА

Сваки елемент у мрежном моделу преносног система одређен је својим јединственим ИД (simID). Како би се повезали подаци из апликације „Радови“ и подаци из индивидуалног мрежног модела, први корак је био да се сваки категорисани елемент повеже са одговарајућим simID. Да би се то урадило, извршено је проширење модела у бази техничког информационог система за све категорисане елементе (високонапонске водове, трансформаторе, далеководна поља, кабловска поља, трансформаторска поља, сабирнице, сабирничке растављаче). Даље, мапирани су елементи придруживањем simID путем апликације IPS Energy, која представља централни регистар електроенергетске опреме ЕМС АД. Ово мапирање је приказано на слици 1. Потребно је напоменути да је правилно мапирање кључно, јер је то једина веза између података у захтевима за искључење и тополошких фајлова.



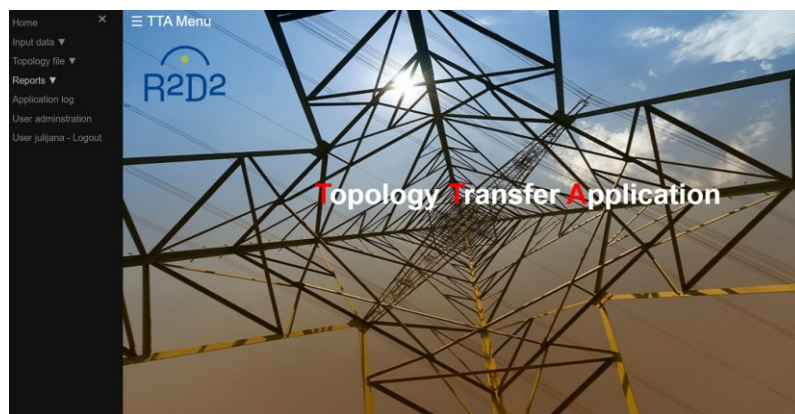
Назив ИПС	Опис из категоризације	ЦИМ код
DV 1012/1 TS БАЈМОК - TS SOMBOR 3	br. 1012/1 TS Bajmok - TS Sombor 3	_b34f21e2-ab14-7834-9959-1d3efd35fbbc
DV 1012/2 TS SOMBOR 3 - TS SOMBOR 1	br. 1012/2 TS Sombor 3 - TS Sombor 1	_419f98c6-3f42-850a-543c-33b973910088
DV 1013 TS KOVIN - TS RUDNIK KOVIN	br. 1013 TS Kovin - TS Rudnik Kovin	_01d156a2-3e8d-7326-e8c9-72deaf98a854
DV 101A/1 TS BEOGRAD 3 - TS SMEDEREVO 2	br. 101A/1 TS Beograd 3 - TS Smederevo 2	_d527dbf6-9726-c97f-1033-97044a8cecab
DV 101A/2 TS SMEDEREVO 2 - TS SMEDEREVO 1	br. 101A/2 TS Smederevo 2 - TS Smederevo 1	_e39f2620-3e49-878d-28d9-7025243b09bf
DV 101A/3 TS SMEDEREVO 1 - TS SMEDEREVO 4	br. 101A/3 TS Smederevo 1 - TS Smederevo 4	_988a232f-f1f3-4592-183a-4abb64de72ea
DV 101A/4 TS SMEDEREVO 4 - TE KOSTOLAC A	br. 101A/4 TS Smederevo 4 - TE Kostolac A	_4a7599ab-4898-460e-5f1a-8b65b295f6c
DV 101B/1 TS BEOGRAD 3 - TS BEOGRAD 18	br. 101B/1 TS Beograd 3 - TS Beograd 18	_ee93e2d4-6e01-40e5-a183-337f32063572
DV 101B/2 TS BEOGRAD 18 - TS SMEDEREVO 2	br. 101B/2 TS Beograd 18 - TS Smederevo 2	_903d7005-e2df-90a5-5648-f98dcb10a2ad
DV 101B/3 TS SMEDEREVO 2 - TS SMEDEREVO 1	br. 101B/3 TS Smederevo 2 - TS Smederevo 1	_33a7dd8b-1a2f-71b5-ea38-e2e48bf6b4c9
DV 101B/4 TS SMEDEREVO 1 - TE KOSTOLAC A	br. 101B/4 TS Smederevo 1 - TE Kostolac A	_64e27c12-c416-184d-a9f5-7acb5c7610c1

Слика 1. Изглед ИПС базе након проширења са simID

Поред мапирања категорисаних елемената било је потребно урадити одређене модификације у самој апликацији „Радови“. При одобравању захтева за искључење кроз апликацију „Радови“ ручно су се уносили додатни услови за искључења (ови услови се односе на додатне измене у топологији мреже због искључења неког елемента), што је било неадекватно за било какву аутоматизацију. Из тог разлога, уведена је маска кроз коју се уносе додатни услови за искључење, али је унос елемената омогућен само за категорисане елементе. На овај начин, омогућено је да се сви расположиви подаци аутоматски пренесу из захтева за искључење у тополошки фајл.

## 3. КРЕИРАЊЕ ТОПОЛОШКОГ ФАЈЛА ПОМОЋУ АПЛИКАЦИЈЕ ТТА

Апликација ТТА (Topology Transfer Application) је конципирана тако да повлачи све податке из захтева за искључење и на основу једноставне логике уноси измене у основни тополошки фајл. Конкретно, из захтева за искључење се узимају информације које односе на статус, време и тип искључења, а потом се преносе на основни тополошки фајл, који представља модел са нормалним уклопним стањем. На овај начин се тренутно аутоматски креира тополошки фајл сваког сата за текући и наредни дан.



Слика 2. Главна маска ТТА апликација

Поред аутоматског креирања тополошког фајла за текући и наредни дан, кроз ТТА апликацију омогућено је креирање тополошког фајла за одређени датум у будућности. Међутим, пошто се одобравање захтева врши за недељу дана унапред, креирање валидног тополошког фајла је могуће урадити за овај временски хоризонт.

#### 4. ГЕНЕРИСАЊЕ ИЗВЕШТАЈА ПРЕКО АПЛИКАЦИЈЕ ТТА

Како се подаци за креирање тополошког фајла односе на планирана искључења у мрежи, препозната је потреба приказа тренутно актуелних планираних искључења у мрежи. Ови подаци су битни како за службу која се бави искључењима, тако и за оперативно планирање рада преносног система. У ту сврху, у самој апликацији ТТА, креирају се следећи извештаји:

- Извештај о искључењима за одређени датум (слика 3)  
Из одобрених захтева за искључење проналазе се сви релевантни подаци за датум, који корисник дефинише, и на основу њих се формира извештај. Извештај садржи списак свих елемената са одговарајућим `simID`, као и статус елемента у сваком сату изабраног дана.

Name	CIM ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
142_3 Zrenjanin 2 - Novi Becej	_018896d1-49df-f1c8-45bc-2a75c42497a2									off	off	off	off	off	off	off									
136B_1 Beograd 3 - Beograd 13	_1b2dc62f-e308-e738-7a11-bbb63aa9a362									off	off	off	off	off	off	off									
1176 Krupanj - Ljubovija	_28b08c17-2503-81c3-ddf8-b89ad16527f5									off	off	off	off	off	off	off	off								
129B_1 Beograd 20 - Beograd 19	_3745bd28-959c-a4e4-e309-261b64719469									off	off	off	off	off	off	off									
1216 Beograd 14 - Beograd 15	_4330dd7d-3c05-8784-2669-a6670ecc25a4									on	on	on	on	on	on	on									
463A Pancevo 2 - Cvor straza	_43d3d4b3-1f1b-d85a-bb4b-752a1c84bf9e								off	off	off	off													
214_5 Visegrad - Pozega	_4507df62-8546-9ff1-5c75-b806406bc16d									off	off	off	off	off	off	off	off	off							
401_2 Djerdap 1 - Dimno	_76d3ef67-6b3a-6a7d-c29b-21589b94caf5									off	off	off	off	off	off	off									
1151 Beograd 17 - Beograd 15	_7a922dde-e995-bbd5-d968-4de72eb5fff									off	off	off	off	off	off	off									

Слика 3. Приказ извештај о искључењима за одређени датум

- Извештај о искључењима за одређени период (слика 4)

Из одобрених захтева за искључење проналазе се сви релевантни подаци за изабрани период, који корисник дефинише и на основу њих се формира извештај.



Извештај садржи списак свих елемената са одговарајућим CIMID, као и период у току дана када се елемент искључује, односно укључује.

Name	CIM ID	2024-05-10	2024-05-11	2024-05-12
142_3 Zrenjanin 2 - Novi Becej	_0f8896d1-49df-f1c8-45bc-2a75c42497a2	8 - 15		
136B_1 Beograd 3 - Beograd 13	_1b2dc62f-e308-e738-7a11-bbb63aa9a362	8 - 15		
1176 Krupanj - Ljubovija	_28b08c17-2503-81c3-ddf8-b89ad16527f5	8 - 16		
129B_1 Beograd 20 - Beograd 19	_3745bd28-959c-a4e4-e309-261b64719469	8 - 15		
1216 Beograd 14 - Beograd 15	_4330dd7d-3c05-8784-2669-a6670ecd25a4	8 - 15		
463A Pancevo 2 - Cvor straza	_43d3d4b3-1f1b-d85a-bb4b-752a1c84bf9e	7 - 11		
214_5 Visegrad - Pozega	_4507df62-8546-9ff1-5c75-b806406bc16d	9 - 17		
401_2 Djerdap 1 - Drmno	_76d3ef67-6b3a-6a7d-c29b-21589b94caf5	8 - 15	8 - 15	8 - 15
1151 Beograd 17 - Beograd 15	_7a922dde-e995-bbd5-d968-4de72eb5ffff	8 - 15		

Слика 4. Приказ извештаја о искључењима за дефинисани период

- Извештај о елементима који су трајно ван погона (слика 5)

Из одобрених захтева за искључење проналазе се сви елементи који су трајно искључени, односно захтев који се односи на искључење елемента дефинише да елемент остаје искључен и након окончања радова у току тог дана, а извештај садржи све релевантне податке – датум и време почетка трајног искључења, као и датум и време враћања у нормално уклопно стање. Подаци везани за завршетак радова су видљиви тек након одобравања захтева за искључење кроз апликацију „Радови“.

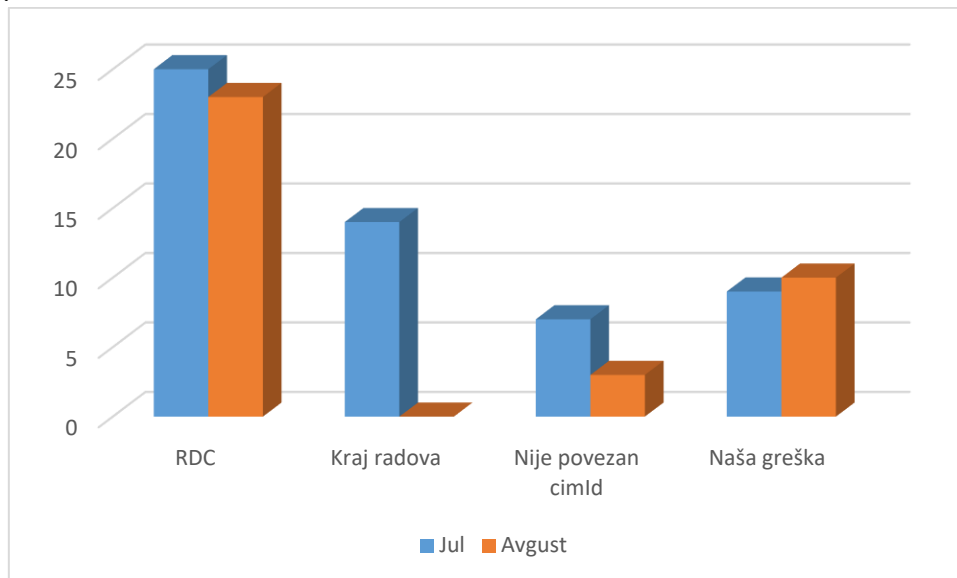
CIM ID	Substation/Line	Type	Name	Date from	Time from	Status	Request number	End date	End time
_891a188a-29e9-54ab-030f-298c7c490843	TS Bor 1	SP	glavno	2024-05-08	08:00:00	on	30-103		
_e0ab0741-9d4a-4a4d-383e-51c6508900d2	150	DV	br. 150 TS Bor 1 - TS Majdanpek 1	2024-05-08	08:00:00	off	30-103		
_e3387de0-4eaf-ad4d-1363-945ff013e909	TS Smederevska Palanka	DVP	br. 158/2	2024-04-29	09:00:00	off	11-284		
_e3387de0-4eaf-ad4d-1363-945ff013e909	TS Velika Plana	DVP	br. 158/2	2024-04-22	09:00:00	off	11-269	2024-04-24	14:00:00
_304d070d-8609-5554-e7b3-4b6253b5fff9	176/2	DV	br. 176/2 TS Novi Sad 9 - TE-TO Novi Sad	2024-04-22	08:00:00	off	21-146	2024-04-29	18:00:00
_bde5baa6-dd5b-7829-b4d9-9b981fd818bd	TS Bujanovac	DVP	br. 1224	2024-04-21	08:00:00	off	37-106		
_a7d6370f-6ea0-ae5b-0598-c42114efa82e	TS Beograd 32	DVP	br. 104/2	2024-04-19	08:30:00	off	11-272		

Слика 5. Приказ извештаја о трајним искључењима

Сваки од ових извештаја даје јасну слику шта је одобрено од захтева за искључење и истовремено шта ће се појавити у тополошком фајлу.

## 5. ТРЕНУТНИ РАД АПЛИКАЦИЈЕ ТТА И ИДЕЈЕ ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ ПРОЦЕСА

У оквиру провере рада апликације успостављена је аутоматска израда тополошког фајла на сат времена за текући дан и за дан унапред. Свакодневно се контролише тополошки фајл који се израђује за дан унапред у тренутку креирања DACF модела. Овај фајл се пореди са тополошким фајлом који се израђује ручно. Успешност рада апликације ТТА се посматра кроз одговарајући КПИ који одсликава узрок грешке (слика 6).



Слика 6: Узроци грешке у тополошком фајлу

Одступања која се најчешће јављају произилазе из пропуста при уносу додатних услова или ранијег завршетка планираних радова. Што се тиче уноса додатних услова, ово је новина која је уведена кроз апликацију „Радови“ и тренутно се налази у фази тестирања. Приметно је смањен број оваквих пропуста од почетка тест фазе.

Завршетак планираних радова пре рока, у почетку није препознат као велики проблем. Међутим, у току тестирања примећено је да се овај случај често појављује. Проширењем ТТА апликације повлаче се одговарајући подаци из апликације „Радови“ а који се односе на крај радова који се уносе у дозволи за искључење. Тестирање ове функције апликације ТТА је у току, али је већ након првог периода приметно смањење, односно нестајање, оваквих грешака.

Током ремонтне сезоне, када је број захтева за рад поприличан, апликација се показала као боље решење од ручне израде тополошког фајла. У овом периоду је људска грешка чешћа јер је тешко сагледати све захтеве са свим додатним условима за искључење.

Због специфичности процеса подношења и одобравања захтева за искључење, унос нестандартних захтева у планирану топологију мораће да остане у надлежности запослених у Служби за планирање рада. У ту сврху, успостављено је слање информација за све специфичне захтеве како би се на што једноставнији начин додатно ажурирао тополошки фајл. Специфични захтеви се односе на: рад у дане викенда, као и ситуације које није могуће дефинисати кроз додатне услове. Уколико се пронађе решење за овакве случајеве, на одговарајући начин ће се унапредити апликација ТТА.

Након завршетка фазе тестирања планирано је успостављање креирања тополошког фајла за два дана унапред. Овим би се започела израда редовних D2CF модела помоћу тополошког фајла креираног преко ТТА апликације. Што се тиче успостављања креирања тополошког фајла за седам дана унапред, апликација је у потпуности спремна за рад, али примена ће бити омогућена тек након увођења процеса израде модела за седам дана унапред.

Осим тога, вреди напоменути да се и при изради анализа сигурности, користи Извештај о искључењима за одређени датум, који се приказује у апликацији ТТА, како би се олакшало тумачење резултата саме анализе.

Успостављањем аутоматске израде топологије на сатном нивоу ЕМС АД је унапредио процес израде индивидуалних мрежних модела, односно процес је убрзан и повећана је тачност модела. Пламорано је да ефекти аутоматизације буду прво видљиви за моделе у СИМ формату чија валидација је обавезна коришћењем европских платформи.

За успостављање потпуне аутоматске израде индивидуалних мрежних модела потребно је аутоматизовати креирање и осталих улазних фајлова на сатном нивоу и прилагодити софтвер помоћу којег се креирају модели.

## **6. ЗАКЉУЧАК**

Апликација ТТА је осмишљена тако да се на сваких сат времена аутоматски креира тополошки фајл са свим подацима који су унети кроз апликацију „Радови“. На тај начин сви одобрени радови у систему су одмах видљиви у тополошком фајлу. Поред планираних искључења, креиран тополошки фајл преко апликације ТТА узима у обзир и радове који су раније завршени, а статус им је измењен кроз саму апликацију „Радови“. Ово је, при ручном уносу, немогуће обрадити јер се промене могу десити унутар сваког сата, што би захтевало константне измене топологије за креирање модела.

Креирање тополошког фајла преко апликације ТТА омогућава да се успостави израда модела на сваких сат времена, као и спремност ЕМС АД да у тренутку покретања израде модела за седам дана унапред буде у могућности да у најкраћем року испуни захтеве које прописује ENTSO-E.

Извештај о искључењима за одређени датум, који се приказује у апликацији ТТА, показао се као јако користан при изради анализе сигурности, јер се прегледом планираних искључења за одређени дан олакшава тумачење резултата саме анализе.

Аутоматизација израде тополошког фајла који би покрио све случајеве који се могу јавити у систему је немогућа због одређених стања у мрежи која се ни на један начин не могу у потпуности предвидети. Мрежа је „жива ствар“ - њеним развојем се мењају природни токови снага и самим тим начин на који ће се извршити одређени радови, радови на којим елементима се смеју преклапати, итд. Изузетака ће вероватно увек бити, али ће се настојати да се за сваки изузетак апликација ТТА прилагоди, како би било што мање ситуација које захтевају ручну модификацију приликом израде тополошког фајла.

## **ЗАХВАЛНИЦА**

Овај документ је израђен на основу резултата пројекта који се финансира уз помоћ Европске уније. Садржај овог документа је искључива одговорност аутора и ни под којим околностима се не може сматрати да одражава став Европске уније.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Уредба о успостављању смерница за рад система за пренос електричне енергије – Commission Regulation (EU) 2017/1485 of 2 August 2017 establishing a guideline on electricity transmission system operation System Operation Guidelines (SO GL)
- [2] European merging function requirements specification
- [3] Common Grid model methodology (CGMM)
- [4] <https://r2d2project.eu>

## APPLICATION FOR AUTOMATIC CREATION OF TOPOLOGY FILE NEEDED FOR CREATION OF NETWORK MODELS

JULIJANA VIČOVAC, MARIJA MILJUŠ, NENAD JANKOVIC, SRĐAN SUBOTIĆ,  
JASMINA DJORDJEVIC, JELENA ĐURĐEVIĆ, MILOŠ MIČIĆ,  
ALEKSANDRA MIKOVIĆ \*  
ELEKTROMREŽA SRBIJE JSC

BELGRADE, SERBIA

*Abstract*— The transmission system operator EMS JSC prepares day-ahead (DA CF), two-day-ahead (D2CF) and intraday (IDCF) network models according to ENTSO-E requirements. With the aim of further improvement, ENTSO-E is increasingly insisting both on increasing the accuracy of network models and on the creation of additional models. The current goal is that in the near future, network models, in addition to the current ones, will be created daily for 24 hours for seven days in advance, as well as every hour within the day for all the remaining hours of the current day (instead of every 8 hours as is currently the case).

As four input files are used to create network models (data on consumption, production, exchange and topology), there is a need to automate their creation in order to fulfill all the requirements imposed by ENTSO-E, which means reducing the impact of human errors and increasing the efficiency of the creation process of these models.

The most complex file used for creating network models represents the planned topology of the system and it contains the topological status (on/off) of the network elements, that is, transmission lines, transformers and busbar couplers. In our system, the largest number of system topology changes are caused by planned works in the transmission system, so it is necessary to include this data in the topology file in an appropriate way.

This paper provides an overview of all the activities that were carried out in order to establish the automatic creation of the topology file. The described activities were implemented through the European Horizon 2020 project Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid - R2D2 [2]. In addition to the making of the application itself for the automatic creation of a topological file, there is also a review of the extension of the model in the base of the technical information system, for all categorized elements (transmission lines, transformers, transmission fields, transformer fields, busbars, busbar disconnectors) and mapping with a unique cimID, as well as the extension of the already existing application for approving disconnections in the transmission system, which was all necessary in order to automate the creation of topological files.

*Key words* — TTA (Topology Transfer Application), request for disconnection, topology file, cimID

---

\* Војводе Степе 412, 11 000 Београд, julijana.vicovac@ems.rs

**АПЛИКАЦИЈА ЗА АУТОМАТСКУ ИЗРАДУ ТОПОЛОШКОГ ФАЈЛА  
ПОТРЕБНОГ ЗА КРЕИРАЊЕ МРЕЖНИХ МОДЕЛА**

**APPLICATION FOR AUTOMATIC CREATION OF TOPOLOGY FILE NEEDED  
FOR CREATION OF NETWORK MODELS**

**ЈУЛИЈАНА ВИЋОВАЦ, МАРИЈА МИЉУШ, НЕНАД ЈАНКОВИЋ, СРЂАН  
СУБОТИЋ, ЈАСМИНА ЂОРЂЕВИЋ, ЈЕЛЕНА ЂУРЂЕВИЋ, МИЛОШ МИЋИЋ,  
АЛЕКСАНДРА МИКОВИЋ\*  
АД ЕЛЕКТРОМРЕЖА СРБИЈЕ**

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

*Кратак садржај - Оператор преносног система ЕМС АД свакодневно израђује мрежне моделе за дан унапред (DACF), два дана унапред (D2CF) и унутар дана (IDCF) према захтевима ENTSO-E. Са циљем даљег унапређења, у ENTSO-E се све више инсистира како на повећању тачности мрежних модела, тако и на изради додатних модела. Тренутни циљ је да се у блиској будућности мрежни модели, поред досадашњих, свакодневно израђују и за 24 сата за седам дана унапред, као и сваког сата унутар дана за све преостале сате текућег дана (уместо на сваких 8 сати како је тренутно).*

*Како се за креирање мрежних модела користе четири улазна фајла (подаци о потрошњи, производњи, размени и топологији) јавља се потреба за аутоматизацијом њиховог креирања у циљу испуњења свих захтева које намеће ENTSO-E, што подразумева смањење утицаја људских грешака и повећање ефикасности процеса израде ових модела.*

*Најкомплекснији фајл који се користи за израду мрежних модела представља планирана топологија система и он садржи тополошки статус (укључен/искључен) елеманата мреже, односно високонапонских водова, трансформатора и спојних поља. У нашем систему, највећи број промена топологије система узрокован је планираним радовима у преносном систему, те је ове податке неопходно укључити у тополошки фајл на одговарајући начин.*

*У овом раду дат је преглед свих активности које су спроведене како би се успоставило аутоматско креирање тополошког фајла. Описане активности су спроведене кроз европски Horizon 2020 пројекат Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid - R2D2 [2]. Поред израде саме апликације за аутоматско креирање тополошког фајла, дат је и осврт и на проширење модела у бази техничког информационог система, за све категорисане елементе (високонапонске водове, трансформаторе, далеководна поља, трансформаторска поља, кабловска поља,*

---

\* Војводе Степе 412, 11 000 Београд, julijana.vicovac@ems.rs

*сабирнице, сабирничке растављаче) и мапирање са јединственим simID, као и проширење већ постојеће апликације за одобравање искључења у преносном систему, што је све било неопходно како би се аутоматизовала израда тополошких фајлова.*

*Апликација ТТА је осмишљена тако да се на сваких сат времена аутоматски креира тополошки фајл са свим подацима који су унети кроз апликацију „Радови“. На тај начин сви одобрени радови у систему су одмах видљиви у тополошком фајлу.*

*Креирање тополошког фајла преко апликације ТТА омогућава да се успостави израда модела на сваких сат времена, као и спремност ЕМС АД да у тренутку покретања израде модела за седам дана унапред буде у могућности да у најкраћем року испуни захтеве које прописује ENTSO-E.*

**Кључне речи — ТТА (Topology Transfer Application), захтев за искључење, тополошки фајл, simID**



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.176B](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.176B)

C2 12

## ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ENTSO-Е ПРАВИЛА ЗА ПОРЕМЕЋЕНИ ПОГОН И ПОНОВНО УСПОСТАВЉАЊЕ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА ЗА СЛУЧАЈ ПОДЕЛЕ СИСТЕМА

ИГОР БУНДАЛО <sup>\*1</sup>, ГОРАН ЈАКУПОВИЋ<sup>1</sup>, МАРИЈА ПОПОВИЋ<sup>1</sup>, СРЋАН  
СУБОТИЋ<sup>2</sup>, КРИСТИНА ЈАНОШЕВИЋ<sup>3</sup>, ПРЕДРАГ СИМИЋ<sup>3</sup>,  
ДУШАН ПРЕШИЋ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИНСТИТУТ МИХАЈЛО ПУПИН

<sup>2</sup>ЕЛЕКТРОМРЕЖА СРБИЈЕ АД

<sup>3</sup>ЦЕНТАР ЗА КООРДИНАЦИЈУ СИГУРНОСТИ ССС Д. О. О. БЕОГРАД

БЕОГРАД

СРБИЈА

*Кратак садржај* — Један од стратешких циљева Европске уније у домену енергетике је унапређење отпорности и поузданости електроенергетског система (ЕЕС) узимајући у обзир све већи број претњи које могу утицати на тако критичну инфраструктуру. Horizon Europe пројекат “Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>” (Grant agreement ID: 101075714), између осталог, бави се овим изазовом кроз развој специјализованих производа намењених превенцији, заштити и обнови ЕЕС-а у различитим сценаријима поремећаја. Један од таквих производа је Resilience Suite for TSO & DSO у оквиру којег је развијен Emergency & Restoration – System Split модул. Он обухвата апликацију за детекцију поделе електроенергетског система која праћењем промене топологије мреже у реалном времену и прецизних мерења фреквенције добијених од Phasor Measurement Unit (PMU) уређаја, детектује поделу система и линију поделе. Други део модула је компонента за координацију која усмерава комуникацију на регионалном нивоу у југоисточној Европи, пратећи унапред дефинисане сценарије, и олакшава доношење оперативних одлука на основу утврђених правила и процедура. Кроз овај модул је тако операционализована обавеза регионалног координационог центра и оператора преносних система из истог региона у вези са регионалном координацијом током великих поремећаја, као и



**примена сложених правила која важе за интерконекију Континенталне Европе у случају њеног распада на подсистеме. У овом раду је описана архитектура *Emergency & Restoration – System Split* модула и поједине компоненте, а акценат је стављен на опис компоненте за координацију.**

*Кључне речи* —топологија, координација, подела система

## 1 УВОД

Унапређење отпорности електроенергетских система постаје све значајније у контексту растуће зависности друштва од стабилног снабдевања електричном енергијом. Отпорност електроенергетских система односи се на њихову способност да издрже и брзо се опораве од разних поремећаја, као што су природне катастрофе, технички кварови или *cyber* напади. Увођење напредних технологија и иновативних решења може значајно допринети јачању отпорности електроенергетских система, чинећи их способнијим да се носе са будућим изазовима. У том смислу, у оквиру *Horizon Europe* пројекта *R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>* развијају се 4 нова производа која покривају широк спектар *Use Case*-ова дефинисаних у циљу унапређења отпорности електроенергетског система, од регионалне координације оператора преносних система до заштите приватности корисника на нисконапонском нивоу. Пројекат се надовезује на активности координације оператора преносних система у југоисточној Европи пратећи законодавство ЕУ и у складу са недавним активностима које промовише ENTSO-E у домену сајбер безбедности у преносним системима. [1]

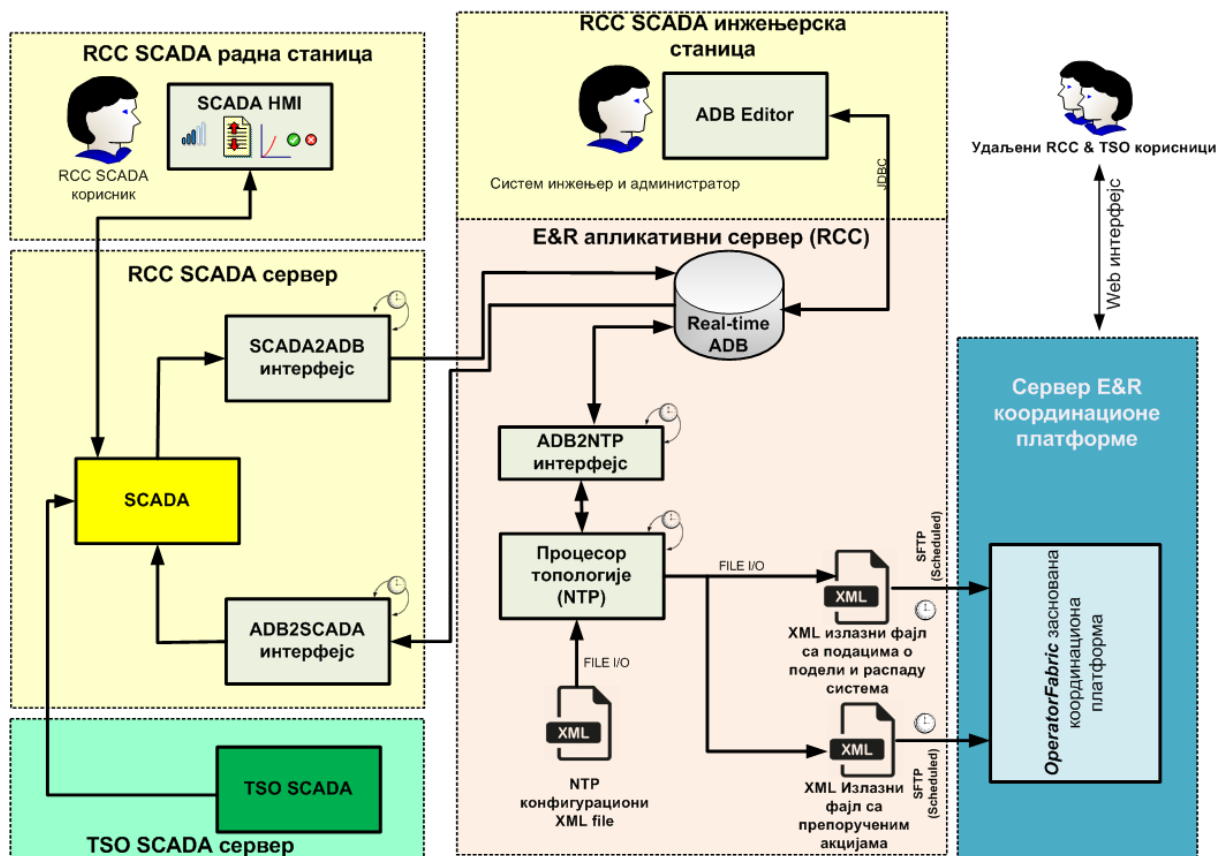
Један од развијених алата, *IRIS (Resilience suite for TSO & DSO)*, намењен је оператерима преносних и дистрибутивних система и регионалним центрима за координацију сигурности. Овај рад описује један од *IRIS* алата који се зове *Emergency & Restoration - System Split* модул.

Главна сврха овог модула је откривање поделе електроенергетског система на више острва на основу мерења из *SCADA* система, а затим иницирање вођене комуникације на регионалном нивоу Југоисточне Европе. Ова комуникација треба да следи одређени унапред дефинисани сценарио поделе система и да води диспечере кроз све кораке предвиђене дефинисаним правилима и процедурама, као и да им помогне да донесу оперативне одлуке на основу карактеристика раздвајања система. Почетни модул, који садржи ову процедуру, развијен је као део пројекта *Horizon 2020 Trinity*. Иницијално је систем имплементиран у студијском окружењу и тестиран на моделу мреже који симулира понашање модела електроенергетског система Србије и зоне опсервабилности суседних оператора преносних система (ОПС). [2] У оквиру пројекта *R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>*, планирана су унапређења овог система. Док се у почетној верзији система идентификација поделе система ослањала искључиво на тополошку анализу, у овој итерацији алгоритам ће бити проширен додатном верификацијом заснованом на прецизним мерењима фреквенције добијеним кроз *PMU* уређаје. Кораки координације ће такође бити проширени како би били у складу са најновијим правилима *ENTSO-E* која се односе на обнову система у случају ванредних ситуација.

## 2 АРХИТЕКТУРА СИСТЕМА

На слици 1. је приказана архитектура *Emergency & Restoration - System Split* модула. Процесор мрежне топологије (*NTP*) одређује топологију мреже и идентификује електричне острва на основу статичке повезаности елемената електроенергетског система и статуса расклопне опреме. *NTP* генерише модел мреже типа чворови-гране са параметрима грана који се одређују из стварних параметара елемената ЕЕС-а. Мерења из *SCADA* система даље се асоцирају са овим моделом. [3]

Апликативна база података (*ADB*) је реализована као релациона база података и служи као централно складиште података о елементима ЕЕС-а (генератори, преносне линије, трансформатори, оптерећења), као и за чување свих неопходних података за одређивање статичке топологије мреже (повезаност елемената, структура трафостанице, описе поља трафостанице, описе прекидача...). Статичку повезаност елемената електричне мреже описују везе њихових терминала са тополошким чворовима. Поред статичних, релативно непроменљивих података, база података апликације садржи динамичке податке о аналогним мерењима и статусима расклопних апарата добијеним из *SCADA* система. *ADB* такође садржи системске параметре потребне за рад мрежних апликација, као и одговарајуће податке неопходне за повезивање са *SCADA* системом.



Слика 1. Архитектура *Emergency & Restoration - System Split* модула

*ADB* едитор је алат за преглед и модификацију *ADB* садржаја. Мрежни модел је визуелно представљен као хијерархијско стабло. Хијерархијски нивои су: компанија, област, трафостаница и напонски ниво. Садржај *ADB*-а може бити сачуван као студијски случај над којим се могу извршити различите анализе, као што је

укључивање/искључивање прекидача, што може резултирати тиме да мрежа буде подељена на више острва.

*SCADA HMI*, основни кориснички интерфејс *SCADA* система, омогућава презентацију података у реалном времену користећи динамичке слике са векторском графиком, графике дефинисане од стране корисника или листе аларма. Извршавање сложених управљачких функција се једноставно и интуитивно обавља коришћењем специјализованих дијалога директно са динамичких слика.

Координациона платформа служи као централизована компонента за комуникацију између ОПС-ова и *RCC*-а (регионалног координационог центра) у процесу обнове система и за координисање активности ОПС-ова. Заснована је на платформи *OperatorFabric* која је модуларна и проширива платформа а која се користи у електричним, водопривредним и другим комуналним предузећима [4]. Ова платформа је развијена од стране *Linux* фондације и садржи код који је јавно доступан. Комуникација преко платформе за координацију заснована је на систему обавештења у облику картица које се приказују корисницима. Картице могу бити у једноставном текстуалном облику или обогачене различитим формама, сликама, графиконима, мапама итд. Постоје четири типа картица, свака од њих има различите намене у зависности од врсте и значаја процеса:

1. Информативне картице обавештавају оператора о догађају или преносу поруку од других учесника у систему, без потребе за одговором од стране оператора.
2. Акционе картице захтевају неку акцију од оператора, као што је потврђивање или одбацивање предложене номинације за лидера фреквенције, захтев за акције управљања фреквенцијом и слично. Акционе картице се такође користе када је потребно координисати више корисника (овде ОПС-ова) како би усагласили план акције, као што је у случају поделе система, где више учесника у електричном систему треба да координише своје акције да би безбедно обновили систем до стабилног стања.
3. Алармне картице су сличне активним картицама, али додатно указују да је потребан хитни одговор од оператора.
4. Картице за усаглашавање указују да је нека координација завршена и шаљу резултате те координације.

Коришћењем поменутих картица размењују се све потребне информације између учесника, омогућавајући слање и примање ажурних информација у реалном времену, што је од изузетног значаја у процесима који захтевају брзу синхронизацију између учесника и праћење њихових акција, као што је случај у процесу обнове поделе система. Поред тога, све информације везане за извршене акције се чувају на платформи и могу се проверити од стране корисника, чиме се омогућава транспарентност извршених процеса на платформи за координацију.

Поред основних апликационих модула, постоје и додатни модули дизајнирани за олакшавање примарне функције конверзије података: *SCADA2ADB* интерфејс, *ADB2SCADA* интерфејс и *ADB2NTP* интерфејс. Комуникација између оператора преносних система и *RCC SCADA* сервера одвија се преко IEC 60870-6 TASE.2 протокола. *MySQL C API* се користи за комуникацију са базом података.

### 3 АЛГОРИТАМ ЗА ДЕТЕКЦИЈУ ПОДЕЛЕ СИСТЕМА

На основу статичке повезаности елемената ЕЕС-а и статуса расклопне опреме, *NTP* одређује топологију мреже и идентификује електрична острва. *NTP* генерише еквивалентни модел мреже типа чворови-гране са придруженим енергетским параметрима грана. Мерења из *SCADA* система су даље повезана са овим моделом. Модел мреже добијен од *NTP-a* је у потпуности оријентисан на чворове и гране, па сва опрема мора бити представљена са не више од два терминала. У случајевима када опрема има више од два терминала, као што су трансформатори са три намотаја неопходно је тронамотајни трансформатор разложити на три двонамотајна трансформатора.

Топологија се процесира у две фазе: идентификација чворова и идентификација острва. Прва фаза идентификује електричне чворове кроз обраду статуса расклопне опреме. Одређивање електричних острва која су под напоном врши се након расподеле мерења. Електрично острво је под напоном ако постоји најмање једно мерење напона изнад дефинисаног прага.

У сваком циклусу извршавања, процесор топологије генерише *XML* датотеку са привременим списком острва. Сваком острву се додељује привремени *ID* који одговара само том циклусу процесора топологије. Свако острво има статус енергизованости који указује да ли је острво енергизовано и листу чворова. У било ком тренутку, у мрежи могу постојати острва која су се поделила или су постала неенергизована. Све промене везане за статус енергизованости острва се идентификују, и нека од њих могу бити проглашена као подељена или у безнапонском стању. Алгоритам подразумевано узима у обзир само 220 *kV* и 400 *kV* чворове за улазне податке. Корисници имају могућност да дефинишу нивое напона који су од интереса за анализу. У сваком циклусу обраде, користе се подаци процесора топологије из текућег и претходног циклуса. Теоретски постоје три ситуације:

1. Чиста подела система – енергизовано острво је подељено на два или више мањих острва која су и даље енергизована;
2. Подела система са острвима у безнапонском стању – енергизовано острво је подељено на два или више мањих острва, од којих су нека мања острва неенергизована;
3. Распад система - претходно енергизовано острво постаје потпуно неенергизовано.

Мерења фреквенције се користе за додатну верификацију тополошке анализе на следећи начин:

1. Ако су мерења фреквенције блиска у два новоформирана острва, потребно је приказати поруку која указује да можда није дошло до цепања мреже, већ да је тополошка анализа неадекватна због непотпуности модела на страни 110 *kV*.
2. Ако тополошка анализа показује постојање само једног острва, али се фреквенције унутар њега разликују, потребно је приказати поруку која указује на неопходност проналажења грешке у *SCADA* телеметрији.

## 4 ПРОЦЕДУРА КООРДИНАЦИЈЕ У СЛУЧАЈУ ПОДЕЛЕ СИСТЕМА

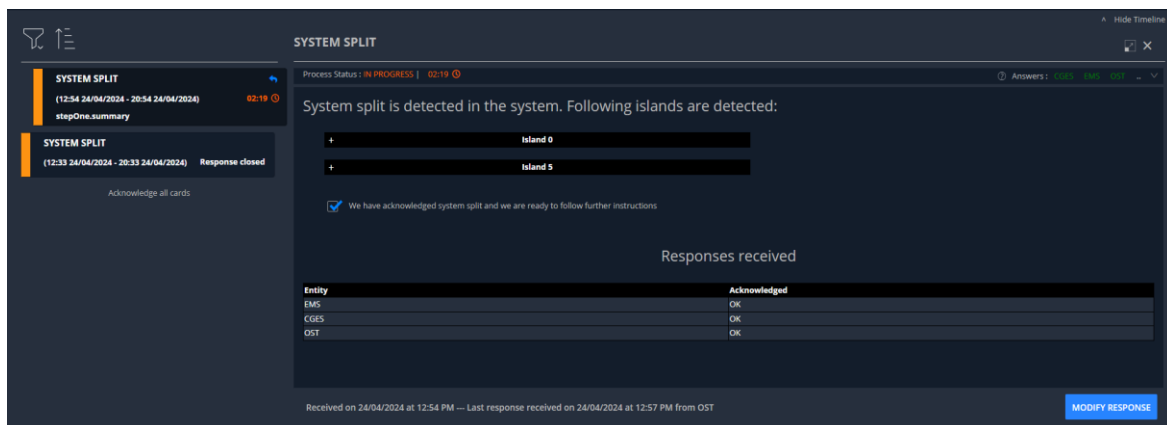
Кораци координације започињу након што се фајл *report.xml*, генерисан од стране *NTP*-а, појави на одређеној локацији на серверу на ком се налази координациона платформа. Први корак у координацији почиње аутоматски.



Слика 2. Кораци координације у сценарију поделе система

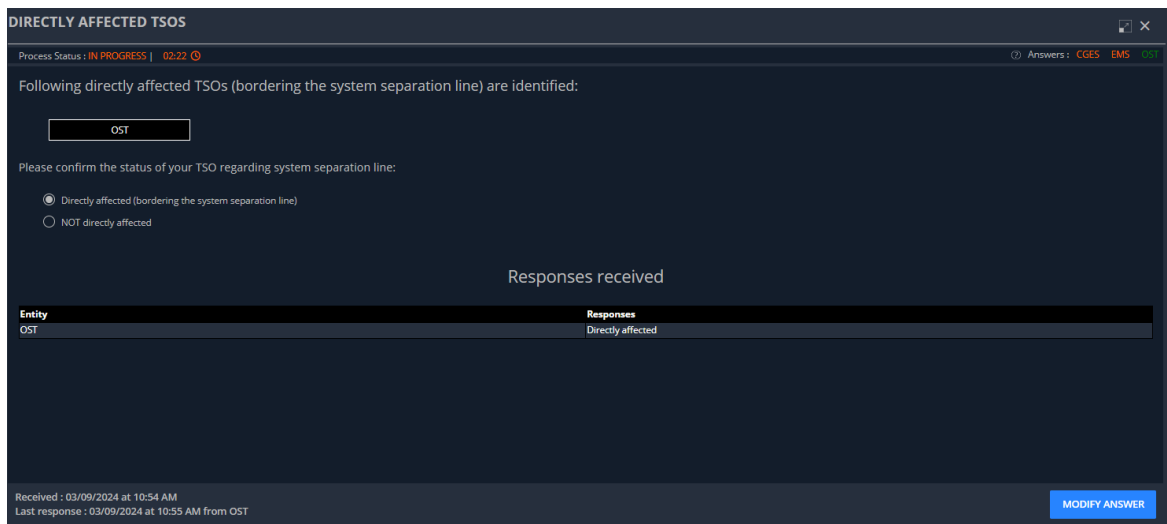
Кораци координације су засновани на правилима регионалне групе ENTSO-E континенталне Европе за ванредне ситуације и обнову система. Међутим, ова правила су веома сложена и веома је тешко да их оператери у потпуности прате. Због тога су кораци координације, претходно дефинисани на основу највероватнијег сценарија у случају поделе система за регион Југоисточне Европе (који су се десили у прошлости) (Слика 2).

Сви укључени ОПС-ови и *RCC*-ови примају обавештење о подели система и настанку нових острва (Слика 3).



Слика 3. Детекција поделе система на координационој платформи

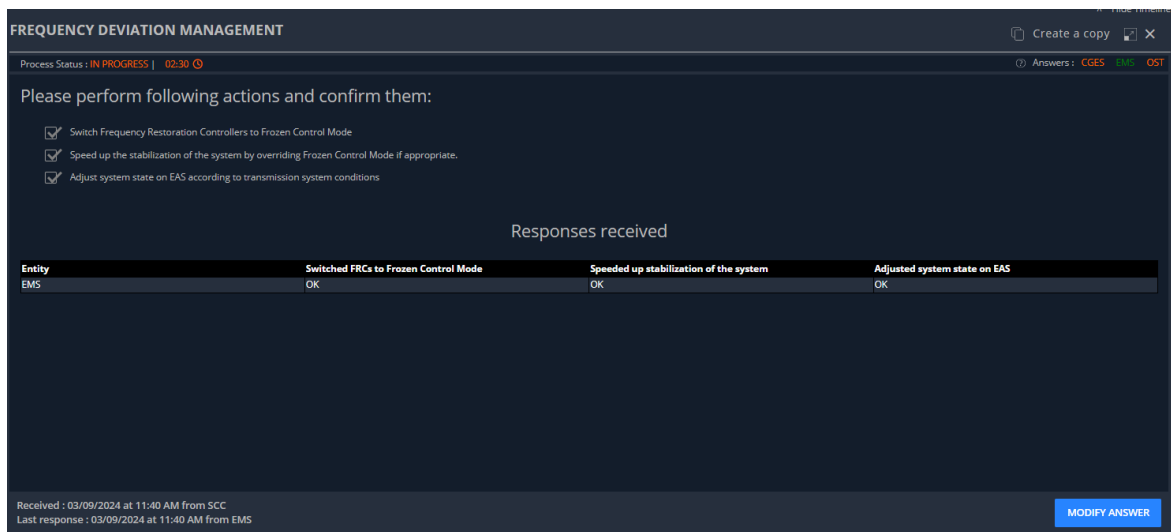
Након тога, сви ОПС-ови у региону потврђују детекцију поделе система. Затим, апликација приказује све директно погођене ОПС-ове у региону (оне који су налазе на линији поделе система), а ОПС-ови потврђују да су директно погођени (Слика 4).



Слика 4. Директно погођени ОПС-ови

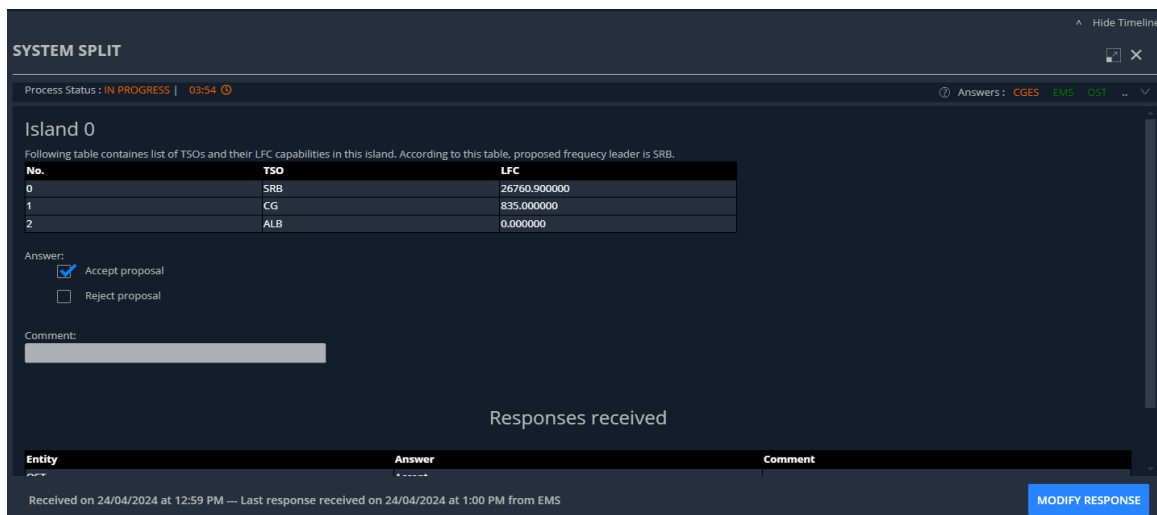
После тога, *RCC* шаље упозорење свим ОПС-овима у региону да:

1. Пребаце *AGC (Automatic Generation Control)* на *Frozen Control mod*
2. Ручно или аутоматски убрзају стабилизацију система тако што ће *override*-овати *Frozen Control mod* ако је прикладно.
3. Подесе статус на *EAS (ENTSO-E Awareness System)* у складу са условима у преносном систему. (Слика 5)



Слика 5. Иницијалне акције приликом обнове фреквенције

Када сви ТСО-ви у региону потврде наведене акције, *RCC* им шаље предлог за именовање лидера фреквенције за сваки подсистем на основу доступних *FRR (Frequency Restoration Reserves)* (Слика 6).



Слика 6. Одређивање лидера фреквенција

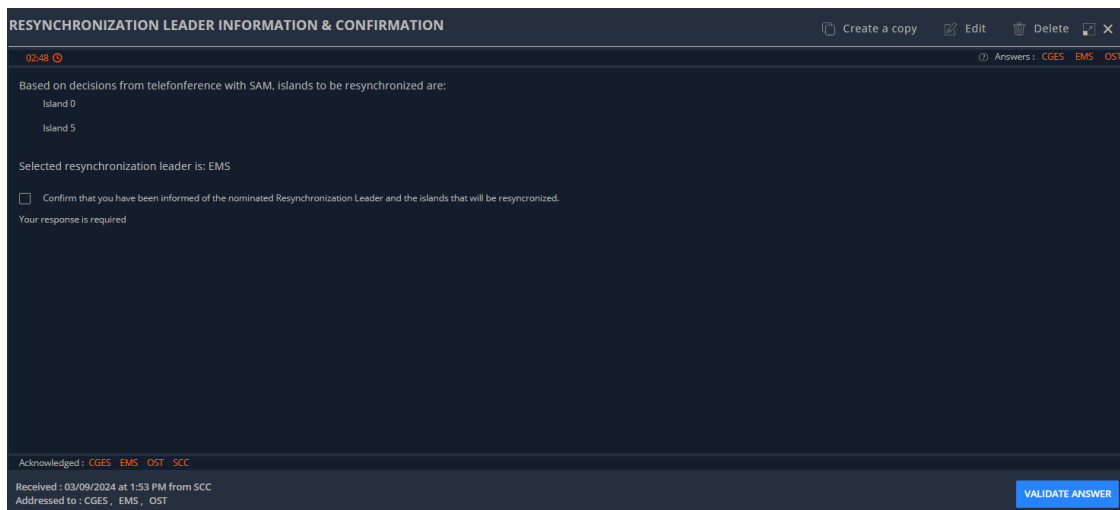
Када се лидер фреквенције потврди, започиње се са регулацијом фреквенције за сваки подсистем (Слика 7). *RCC* шаље упозорење свим ОПС-овима у региону да:

1. Пребаце/одрже *AGC* у *Frozen Control mode* ако ОПС није лидер фреквенције.
2. Пребаце *AGC* у режим *Frequency Control Mode* ако је ОПС лидер фреквенције.
3. Додатно, најаве свој статус као лидера фреквенције на *EAS*.



Слика 7. Управљање фреквенцијом након именованја лидера фреквенције

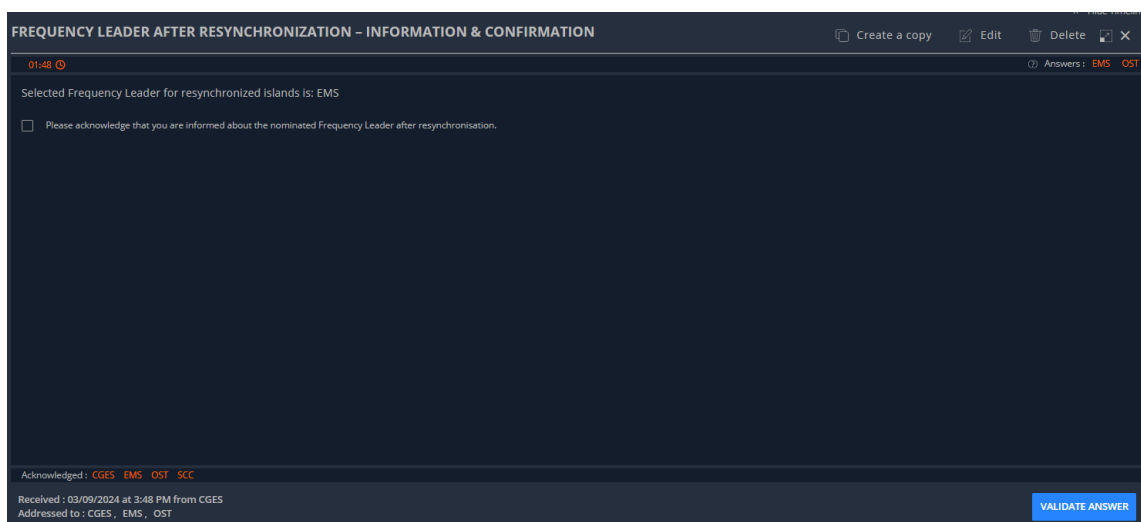
Затим, *RCC* шаље упозорење свим ОПС-овима у региону, изузев лидеру фреквенције, да обуставе мануелни процес обнове фреквенције – *mFRR*. Након успешних мера обнове фреквенције, *Synchronous Area Monitor (SAM)* започиње телефонску конференцију са директно погођеним ОПС-овима, *RCC*-ом и номинованим лидерима фреквенције како би се одредио лидер ресинхронизације. Сви ОПС-ови су обавештени о изабраном лидеру ресинхронизације (Слика 8). Такође, *RCC* упозорава лидера ресинхронизације да објави свој статус на *EAS*-у.



Слика 8. Одређивање лидера ресинхронизације

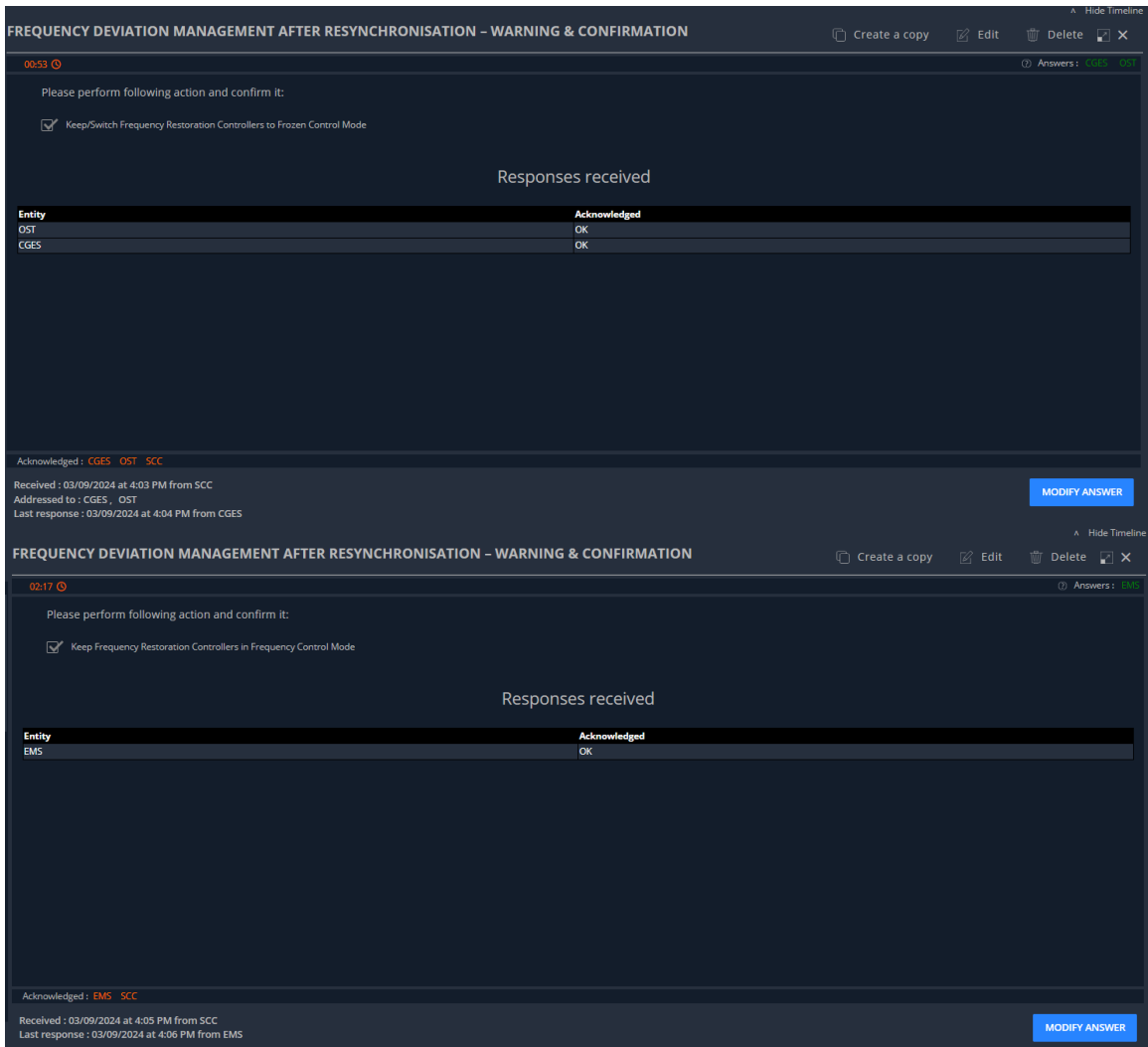
Пре ресинхронизације, лидер фреквенције региона упозорава *RCC* и све ОПС-ове у региону на предстојећу ресинхронизацију. Након ресинхронизације, лидер фреквенције региона обавештава *RCC* и све ОПС-ове у региону о извршеној ресинхронизацији. Поред тога, *RCC* упозорава лидера ресинхронизације да деактивира свој статус лидера ресинхронизације на *EAS*. Затим, лидери фреквенције поново повезаних области одлучују ко ће бити лидер фреквенције након ресинхронизације. Након потврде лидера фреквенције након ресинхронизације (Слика 9), *RCC* упозорава лидера фреквенције да потврди или деактивира свој статус лидера фреквенције на *EAS*. У наредном кораку, *RCC* шаље упозорење свим ОПС-овима у региону да пребаце *AGC* у (Слика. 10):

1. *Frozen Control Mode* (за оне ОПС-ове који нису лидер фреквенције)
2. *Frequency Control Mode* (ако је ОПС лидер фреквенције након ресинхронизације)



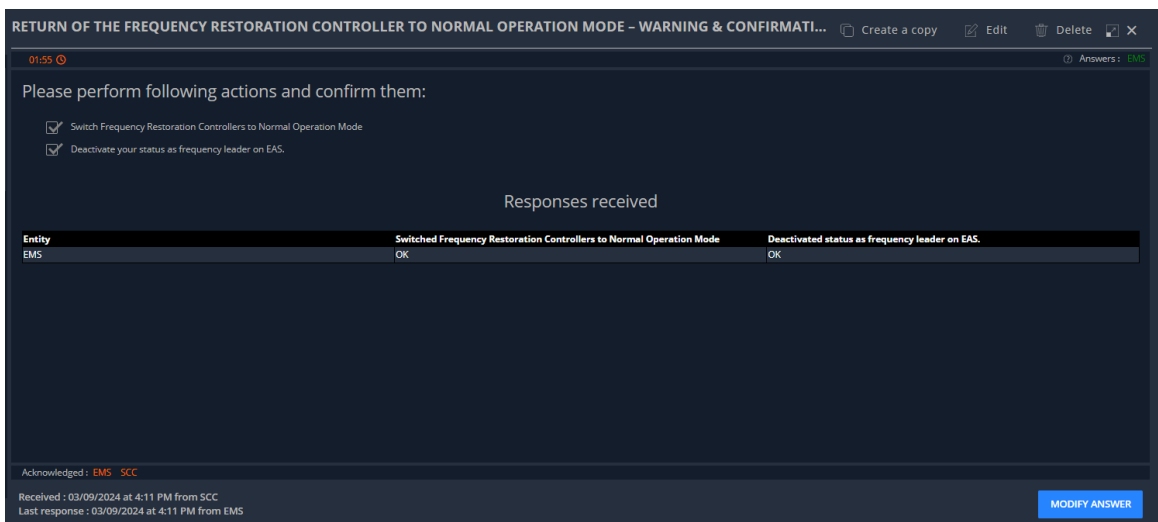
Слика 9. Лидер фреквенције након ресинхронизације





Слика 10. Управљање фреквенцијом након ресинхронизације

Након стабилизације фреквенције, лидер фреквенције обавештава остале ОПС-ове да пребаце *AGC* у режим нормалног рада. На крају, лидер фреквенције након ресинхронизације пребацује *AGC* у режим нормалног рада и деактивира статус лидера фреквенције на *EAS* (Слика 11).



Слика 11. Крај управљања фреквенцијом

Наведени кораци представљају само највероватнији сценарио за поделу система. У случају да се стварно стање система разликује од овог редоследа корака, *RCC* оператор, након консултација са ОПС-овима, може ручно прећи на корак сценарија који одговара стварном стању у систему (*RCC* има координирајућу улогу у процесу обнове система и стога контролише платформу за координацију). Такође је важно напоменути да *Emergency & Restoration system split* апликација има способност да покрене регионалну телеконференцију између свих ОПС-ова и *RCC*-а у случају конфузије током имплементације корака, или ако се било који ОПС противи предложеним координационим акцијама.

## 5 ЗАКЉУЧАК

Овај рад пружа увид у практичну имплементацију *Emergency and Restoration* правила *ENTSO-E* регионалне групе Континенталне Европе у случају поделе система. Предложено решење је у складу са европским трендом проширивања мандата *RCC*-а, који укључује активности координације у реалном времену, како је дефинисано у ЕУ пакету о чистој енергији. Описана апликација дизајнирана је да ради у стварном окружењу и планирана је за инсталацију у *RCC*-у који је одговоран за ОПС-ове изван ЕУ у Југоисточној Европи (*SCC*, Београд). Ова интеграција обећава значајно побољшање координације активности ОПС-ова, посебно у сценаријима који укључују поделе система. Таква побољшања су кључна за осигурање отпорности и поузданости европске електроенергетске мреже, чиме се штити од потенцијалних поремећаја и јача безбедност енергетске мреже континента. Стога, планирана инсталација овог система представља значајан корак напред у јачању енергетске инфраструктуре и ублажавању ризика повезаних са нестабилношћу система. Даља истраживања и практичне примене у овој области су неопходни да би се у потпуности оствариле потенцијалне предности побољшане координације која се може остварити коришћењем описане апликације.

## ЛИТЕРАТУРА:

- [1] <https://r2d2project.eu>.
- [2] Igor Bundalo, Goran Jakupović, Marko Batić, Srđan Subotić, Dušan Prešić, “The system split and blackout detection application” IV SEERC Conference, Istanbul, October 2023
- [3] Горан Стефановић, Милош Стојић, Ивана Кршенковић, Горан Јакуповић, Нинел Чукалевски, Игор Бундало, “Одређивање стања електроенергетских мрежа у реалном времену базирано на тополошкој анализи”, V конференција ЦГ КО CIGRE, Будва, мај 2017
- [4] <https://opfab.github.io>

# IMPLEMENTATION OF ENTSO-E EMERGENCY AND RESTORATION RULES IN THE CASE OF A SYSTEM SPLIT

IGOR BUNDALO \*<sup>1</sup>, GORAN JAKUPOVIĆ<sup>1</sup>, MARIJA POPOVIĆ<sup>1</sup>, SRĐAN SUBOTIĆ<sup>2</sup>, KRISTINA JANOŠEVIĆ<sup>3</sup>, PREDRAG SIMIĆ<sup>3</sup>, DUŠAN PREŠIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MIHAJLO PUPIN INSTITUTE

<sup>2</sup>ELEKTROMREŽA SRBIJE JSC

<sup>3</sup>SECURITY COORDINATION CENTRE SCC LTD. BELGRADE

BELGRADE

SERBIA

*Abstract*— The strategic goal of the European Union is to improve the resilience and reliability of the current Electric Power System (EPS) against a growing number of threats and vulnerabilities that may affect such a critical infrastructure, exposing weaknesses with potentially damaging effects on different stakeholders and final customers. The Horizon Europe project R2D2 addresses this challenge through a range of dedicated products aimed at prevention, protection, and restoration of EPS across diverse disturbance scenarios. One such product is the Resilience Suite for Transmission System Operators & Distribution System Operators (IRIS), which encompasses the System Split Application. This paper presents an in-depth analysis of this application within the IRIS suite. Through the utilization of real-time network topology changes and precise Phasor Measurement Units (PMUs) frequency measurements, the application effectively identifies system splits as they occur and new islands boundary. Subsequently, the coordination component of the application guides communication at the regional level in Southeastern Europe (SEE), following predefined scenarios, and facilitates operational decision-making based on established rules and procedures. This paper describes the architecture of the Emergency & Restoration – System Split module and its individual components, with an emphasis on the description of the coordination component.

**ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА ENTSO-Е ПРАВИЛА ЗА ПОРЕМЕЋЕНИ ПОГОН И  
ПОНОВНО УСПОСТАВЉАЊЕ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ СИСТЕМА ЗА  
СЛУЧАЈ ПОДЕЛЕ СИСТЕМА**

**IMPLEMENTATION OF ENTSO-E EMERGENCY AND RESTORATION RULES  
IN THE CASE OF A SYSTEM SPLIT**

**ИГОР БУНДАЛО <sup>\*1</sup>, ГОРАН ЈАКУПОВИЋ<sup>1</sup>, МАРИЈА ПОПОВИЋ<sup>1</sup>, СРЋАН  
СУБОТИЋ<sup>2</sup>, КРИСТИНА ЈАНОШЕВИЋ<sup>3</sup>, ПРЕДРАГ СИМИЋ<sup>3</sup>, ДУШАН  
ПРЕШИЋ<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>ИНСТИТУТ МИХАЈЛО ПУПИН**

**<sup>2</sup>ЕЛЕКТРОМРЕЖА СРБИЈЕ АД**

**<sup>3</sup>ЦЕНТАР ЗА КООРДИНАЦИЈУ СИГУРНОСТИ SCC Д. О. О. БЕОГРАД**

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

*Кратак садржај* — Један од стратешких циљева Европске уније у домену енергетике је унапређење отпорности и поузданости електроенергетског система (ЕЕС) узимајући у обзир све већи број претњи које могу утицати на тако критичну инфраструктуру. Horizon Europe пројекат “Reliability, Resilience and Defense Technology for the Grid-R2D2” (Grant agreement ID: 101075714), између осталог, бави се овим изазовом кроз развој специјализованих производа намењених превенцији, заштити и обнови ЕЕС-а у различитим сценаријима поремећаја. Један од таквих производа је Resilience Suite for TSO & DSO у оквиру којег је развијен Emergency & Restoration – System Split модул. Он обухвата апликацију за детекцију поделе електроенергетског система која праћењем промене топологије мреже у реалном времену и прецизних мерења фреквенције добијених од Phasor Measurement Unit (PMU) уређаја, детектује поделу система и линију поделе. Други део модула је компонента за координацију која усмерава комуникацију на регионалном нивоу у југоисточној Европи, пратећи унапред дефинисане сценарије, и олакшава доношење оперативних одлука на основу утврђених правила и процедура. Кроз овај модул је тако операционализована обавеза регионалног координационог центра и оператора преносних система из истог региона у вези са регионалном координацијом током великих поремећаја, као и примена сложених правила која важе за интерконекцију Континенталне Европе у

случају њеног распада на подсистеме. У овом раду је описана архитектура Emergency & Restoration – System Split модула и поједине компоненте, а акценат је стављен на опис компоненте за координацију. Најзначајније компоненте у оквиру архитектуре система су: SCADA систем, апликативни сервер на ком се налази апликација за детекцију поделе система и координациона платформа. Интеграција је извршена за VIEW4 SCADA системом али могућа је интеграција са било којим стандардним SCADA системом коришћењем адекватног апликативног програмског интерфејса. Апликација за детекцију поделе система је развијена на Linux платформи, коришћењем програмског језика C++. Као платформа за чување модела система и других података користи се релациона MySQL база података. Координациона платформа се заснива на платформи OperatorFabric која је развијена од стране Linux фондације и садржи код који је јавно доступан.

*Кључне речи* —топологија, координација, подела система



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.190S](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.190S)

C2 13

## **МЕТОДА ЗА МОДЕЛОВАЊЕ ИЗВОРА БУКЕ, ПРОРАЧУН И ОЦЕНУ НИВОА БУКЕ УСЛЕД КОРОНЕ У ОКОЛИНИ НАДЗЕМНОГ ВОДА**

**ИВА САЛОМ\***  
**ИНСТИТУТ МИХАЈЛО ПУПИН**  
**ДЕЈАН ТОДОРОВИЋ**  
**DIRIGENT ACOUSTICS**  
**МИЛЕНКО КАБОВИЋ, ВЛАДИМИР ЧЕЛЕБИЋ, МАРКО РАЛИЋ**  
**ИНСТИТУТ МИХАЈЛО ПУПИН**  
**НЕБОЈША ПЕТРОВИЋ, НАДА ЦУРОВИЋ**  
**ЕЛЕКТРОМРЕЖА СРБИЈЕ АД**

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

*Кратак садржај*— Са развојем преносне мреже на високим напонским нивоима бука која потиче од надземних водова постаје све већи проблем са којим се суочавају оператери преносне мреже широм света. Решавање проблема захтева велика улагања на постојећим водовима и привремена искључења током радова, стога је неопходно већ у процесу пројектовања надземних водова спровести методологију провере нивоа буке у околини пројектованог вода, односно проверу утицаја предложених решења на постојећим водовима.

Рапидни развој рачунара омогућио је увођење математичког моделовања и примену нумеричких метода у свакодневну инжењерску праксу, а различити софтверски пакети користе се за детаљну анализу и израчунавање одговарајућих физичких величина. За потребе процене нивоа буке у околини надземног вода развијена је методологија коришћењем једног од софтверских алата који се стандардно користи за прорачуне буке у животној средини. Ова метода, описана у раду, може да буде коришћена приликом пројектовања надземних водова.

*Кључне речи*— надземни вод, корона, бука, мапирање буке

---

\* Волгина 15, Београд, [iva.salom@pupin.rs](mailto:iva.salom@pupin.rs)

## 1 УВОД

Са индустријским и технолошким развојем расте потреба за електричном енергијом, као и за што ефикаснијим преносом, што је условило развој мреже преноса на вишим напонским нивоима, али и донело нове проблеме, који се, између осталог, односе се и на утицај електроенергетског система и његових појединих делова на животну средину. Овакви проблеми су постали посебно значајни са повећањем глобалне еколошке свести. У том смислу, надземни водови данас могу да представљају угрожавајуће структуре. Стога, приликом пројектовања нових мрежа потребно је водити рачуна о утицају на животну средину. Надземни водови дефинишу се у просторним и урбанистичким плановима, пројектују се и граде тако да се што више избегну урбане зоне, што није увек могуће извести. Питања о томе како се усмеравају нови високонапонски надземни водови и колико су близу већ изграђених објеката, или како утичу на драгоцене пејзаже и природна подручја (као што су национални паркови), често нису проблеми само за заједнице и грађане већ и за саме електропривредне компаније. Уско повезано са тим је питање како се нове куће или други изграђени објекти планирају или постављају у близини постојећих надземних водова [1].

Корона је једна од доминантних појава на високонапонским надземним водовима. Корона представља ефекат проузрокован парцијалним пражњењима на изолаторима надземних водова и у ваздуху који окружује проводник. Високе вредности електричног поља око проводника доводе до јонизације околне средине и при довољно високом напону долази до локалних пробоја и електричног пражњења у виду импулсних струја. Као последица ове појаве јављају се различити ефекти: светлосни ефекат, електромагнетне сметње (нејонизујуће зрачење), бука, губици активне снаге, ослобађање озона [1]–[15]. Највећи број ових ефеката има негативан утицај како на рад електроенергетског система, тако и на животну средину. Поред нејонизујућег зрачења, бука од ефекта короне је основни параметар утицаја високонапонских водова на животну средину. Утврђено је да је код надземних водова нижих напонских нивоа, генерално испод 400 kV, бука довољно ниског нивоа да нема утицаја на становништво и животну средину [7]. Услед све већег приближавања насеља надземним водовима на вишим напонским нивоима поставило се и питање буке која се ствара у њиховој непосредној околини, као и коришћења мера за смањење буке.

Свеобухватни опис перформанси буке услед короне на надземном воду веома је комплексан проблем, и теоријска анализа би морала да укључи различите информације, које се односе на временски променљиву природу буке, компоненте и фреквенцијски спектар буке, као и просторну расподелу звучног поља у околини надземног вода. Међутим, опште аналитичке методе за прорачун нивоа буке не могу дати тако детаљне информације због великог броја променљивих параметара који утичу на прорачун. С обзиром да је бука надземних водова (пре свега у наизменичним системима) у општем случају најинтензивнија при неповољним временским условима, углавном по киши, на основу великог броја експерименталних испитивања како на тестним, тако и на реалним надземним водовима, развијене су емпиријске методе за израчунавање А-пондерисаних вредности нивоа буке у кишним условима [7]. Две прве развијене и данас најчешће коришћене методе су EPRI (*Electric Power Research Institute*) и BPA (*Bonneville Power Administration*) метода.

Да би се сагледао проблем и анализирали негативни ефекти буке на становништво потребно је извршити мапирање буке у подручју које се посматра. Мапирање буке представља процес прорачуна генерисања и простирања буке, уз графичку презентацију

результата прорачуна у облику мапа буке (*noise map*). Развој рачунарских техника моделовања омогућава довољно брзо генерисање стратешких карата буке са задовољавајућом прецизношћу. Ове карте буке могу дати увид у тренутно стање на посматраном подручју, приказ и поређење укупне и амбијенталне буке, смернице за спровођење мера заштите од буке, као и израду детаљних акционих планова за контролу буке, утицај и поређење различитих пројектованих мера заштите. Имајући у виду надземни вод као специфичан извор звука са својим карактеристикама, технике рачунарског моделовања могу дати добре процене нивоа у буке у околини надземног вода у подручју од интереса [16]–[22].

У складу са глобалним повећањем еколошке свести, као и актуелношћу проблема буке и заштите од буке, у оквиру Електромреже Србије спроведена је студија утицаја буке коју стварају високонапонски надземни водови на животну средину [24]. У оквиру рада на студији спроведена су опсежна истраживања, која су укључила и велики број мерења нивоа буке, са циљем да се, полазећи од самог ефекта са теоријске и практичне стране, испитају и сумирају утицаји различитих параметара надземног вода на ниво буке. Битан резултат студије је развијена методологија прорачуна и оцене нивоа буке, која се може користити приликом пројектовања високонапонских надземних водова у оквиру посебног елабората заштите од буке коришћењем технике рачунарског моделовања. Развијена методологија верификована је кроз мерења на стандардним реалним конфигурацијама надземних водова система преноса Републике Србије, где је компаративном анализом мерења и прорачуна доказана исправност изабраног приступа. Додатно, приказаном методологијом могуће је извршити анализу и сагледавања метода умањења нивоа буке на постојећим надземним водовима, како би се у свим будућим ситуацијама захтева за умањење буке, систематски могло поступати и бирати оптимална решења.

У овом раду је приказана развијена методологија предикције звучног поља у околини надземног вода и процене нивоа буке која потиче од ефекта короне. Методологија је заснована на мапирању буке коришћењем једног од софтверских алата који испуњавају услове за прорачуне буке у животној средини – *SoundPlan* [24]. Методологија обухвата: моделовање извора буке, дефинисање параметара и примену алгоритама за прорачун простирања буке, оцену и приказ резултата прорачуна нивоа буке.

## **2 КАРАКТЕРИСТИКЕ БУКЕ УСЛЕД КОРОНЕ НА ВИСОКОНАПОНСКИМ НАДЗЕМНИМ ВОДОВИМА**

Бука настала услед појаве короне састоји се од широкопојасне и тоналне компоненте [7], [12]. Пражњења услед короне на проводницима надземног вода одвијају се на бројним тачкама дуж проводника, генеришући случајну поворку звучних импулса, трајања неколико десетина микросекунди, која чини широкопојасну компоненту. Тонална компонента потиче од осцилаторног кретања облака јона током различитих полупериода напона. Ово кретање ствара наизменичне промене густине ваздуха два пута током једне периоде наизменичног напона. На тај начин настаје основни дубоки тон (*hum*) на двострукој вредности мрежне фреквенције (50 Hz у Републици Србији). Промене притиска јесу периодичне, али се током позитивне и негативне полупериоде могу разликовати. Стога може доћи до појаве и виших хармоника, али најчешће значајно мањег интензитета.



### 3 МЕТОДЕ ПРОРАЧУНА НИОВА БУКЕ УСЛЕД КОРОНЕ

#### 3.1 Емпиријске формуле за процену нивоа буке од ефекта короне надземног вода у кишним условима

На основу резултата великог броја мерења спровођених у институцијама широм света развијене су емпиријске и полу-емпиријске формуле за процену нивоа буке надземних водова у кишним условима. С обзиром да у кишним условима доминира широкопојасна компонента формуле су углавном развијане за овај случај [7], [15]. Две најчешће коришћене формуле за процену нивоа широкопојасне компоненте у кишним условима су:

- EPRI метода, и
- ВРА метода.

а постоји и читав низ других метода (*Ente Nazionale per L'Energia Elettrica* (ENEL) – Италија, *Institut de Recherche d'Hydro-Québec* (IREQ) – Канада, *Electricité de France* (EdF) – Француска, *Central Research Institute of Electric Power Industry* (CRIEPI) – Јапан, FGH – Немачка итд.). При томе се као резултат стандардно добијају следећи параметри [15]:

- статистички дескриптор  $L_{50}$ , који се односи на случај када је проводник мокар (*wet conductor*); може се очекивати да током кише ниво буке услед короне прекорачи вредност параметра  $L_{50}$  у 50% времена, узимајући у обзир кишу током одређеног времена, обично једне године;
- статистички дескриптор  $L_5$ , који се односи на случај када вод ради у условима обилне (јаке) кише (*heavy rain*); може се очекивати да током кише ниво буке услед короне прекорачи вредност параметра  $L_5$  у 5% времена;
- статистички дескриптор  $L_{50}$ , који се односи на случај повољних метеоролошких услова;
- просечан ниво очекиване буке током кише (током дужег временског периода), који је генерално близу нивоа  $L_{50}$ .

Све поменуте методе заснивају се на експериментално одређеним једначинама, које предвиђање величине буке услед короне одређују на основу величине максималне вредности напонског градијента на површини појединих проводника, конфигурације и димензија снопа проводника, као и броја проводника по фази у снопу. У општем случају формула за израчунавање нивоа буке услед короне на надземном воду је следећег облика:

$$P = P_0 + k_1 \cdot f_1(E_{\max}) + k_2 \cdot f_2(n) + k_3 \cdot f_3(d) + k_4 \cdot f_4(D) \quad (1)$$

где су:

- $P$  – процењени А-пондерисани ниво буке короне од једне фазе (проводника у снопу) у посматраној тачки,
- $P_0$  – константа – референтни ниво буке,
- $E_{\max}$  – максимална вредност напонског градијента на површину проводника,
- $n$  – број проводника у снопу по фази,
- $d$  – пречник проводника,
- $D$  – растојање од проводника до тачке у којој се одређује ниво буке,
- $k_1 - k_4$  – константе.

Формула (1) даје процену нивоа буке од једне фазе. Укупан ниво од свих фаза, или вишесистемског надземног вода, добија се применом формуле за израчунавање нивоа звука више некорелисаних извора:

$$P_{\text{tot}} = 10 \log \sum_{i=1}^{N_p} 10^{P_i/10} \quad (2)$$

где је  $N_p$  укупан број фаза надземног вода.

Резултати које дају различите експерименталне формуле за процену нивоа буке надземног вода могу да се разликују и за неколико децибела. Генерално, у последње време се све више усваја и користи ВРА метода, која даје процену дескриптора  $L_{50}$  за мокар проводник при киши интензитета око 1 mm/h. Ниво подужне звучне снаге проводника једне фазе, у dBA у односу на референтну вредност  $P'_{a0} = 10^{-12}$  W/m рачуна се по формули:

$$A = 55 \log d + 120 \log E_{\max} + \frac{H}{300} - 109,6, n < 3 \quad (3)$$

$$A = 26,4 \log n + 55 \log d + 120 \log E_{\max} + \frac{H}{300} - 122,6, n \geq 3 \quad (4)$$

Процењени А-пондерисани ниво буке, дескриптор  $L_{50}$ , короне од проводника једне фазе (проводника у снопу) надземног вода у посматраној тачки, у dBA у односу на референтну вредност  $P'_{a0} = 10^{-12}$  W/m рачуна се по формули:

$$P = 55 \log d + 120 \log E_{\max} + \frac{H}{300} - 115,4 - 11,4 \log D, n < 3 \quad (5)$$

$$P = 26,4 \log n + 55 \log d + 120 \log E_{\max} + \frac{H}{300} - 128,4 - 11,4 \log D, n \geq 3 \quad (6)$$

где је  $H$  надморска висина у метрима.

За случај обилне кише дескриптор  $L_5$  се добија тако што се на вредности добијене у формулама (5) и (6) дода 3,5 dB, док се за случај повољних метеоролошких услова дескриптор  $L_{50}$  добија тако што се од вредности добијених у формулама (5) и (6) одузме 25 dB.

### 3.2 Процена нивоа тоналне компоненте

На основу резултата малог броја спроведених истраживања нивоа тоналне компоненте изведена је експериментална формула за процену нивоа ове компоненте у условима обилне кише [7]:

$$A_T = 58,1 - 41/d - 505,5/E_{\max} + k_1 - k_2/(n + k_3), \quad (7)$$

где су:

$A_T$  – ниво подужне звучне снаге проводника једне фазе, у dBA у односу на референтну вредност  $\mu W/m$ ,

$n$  – број проводника у снопу по фази,

$d$  – пречник проводника, у cm,

$E_{\max}$  – максимална вредност површинског градијента напона у kV/cm,

$k_1, k_2, k_3$  – константе које зависе од пречника проводника.

### 3.3 Процена вредности максималног напонског градијента на површини проводника

Електрично поље на површини проводника надземног вода је важан параметар у пројектовању надземног вода јер директно утиче на појаву короне па се његова вредност узима као параметар приликом прорачуна за одређивање величине утицаја поменутих ефеката, а између осталог, и на ниво звука насталог услед короне, а при томе је увден појам напонског градијента на површини проводника  $E$ . Може се показати да се вредност ове величине у присуству других проводника мења по приближно синусоидалном закону у простору у непосредној близини око проводника, а да њена средња и максимална вредност на површини проводника, као и тачка на којој она достиже максималну вредност, у потпуности описују електрично поље како на самој површини проводника

тако и у његовој непосредној близини. Максимална вредност напонског градијента на површини проводника изабрана је као величина која карактерише појаву короне на проводницима у снопу, заједно са пречником сваког од проводника, пречником снопа и броја проводника у снопу. У пракси је усвојено да се за величину максималног напонског градијента на површини проводника узима средња вредност максималних напонских градијената на површини сваког од проводника у снопу  $E_{\max}$  [7]. Вредност  $E_{\max}$  проводника на сложен начин зависи од напона на проводнику, броја проводника по фази у снопу, пречника проводника, размака између фаза и, у мањој мери, од конфигурације вода, распореда фаза, висине вода и удаљености вода од других вода. Стога се за одређивање максималне вредности напонског градијента на површини проводника користи више метода, које се могу поделити на [25]:

- аналитичке методе (метод *Maxwell*-ових коефицијената потенцијала, *Markt-Mengele* метод, *Mazen Abdel-Salem* метод),
- нумеричке методе (метод коначних разлика (*Finite Difference Method* – FDM), метод симулације наелектрисања (*Charge Simulation Method* – CSM), метод граничних елемената (*Boundary Element Method* – BEM), метод коначних елемената (*Finite Element Method* – FEM)).

#### 4 МЕТОДА МАПИРАЊА БУКЕ У ОКОЛИНИ НАДЗЕМНОГ ВОДА ПРИМЕНОМ СОФТВЕРСКИХ СИМУЛАЦИЈА

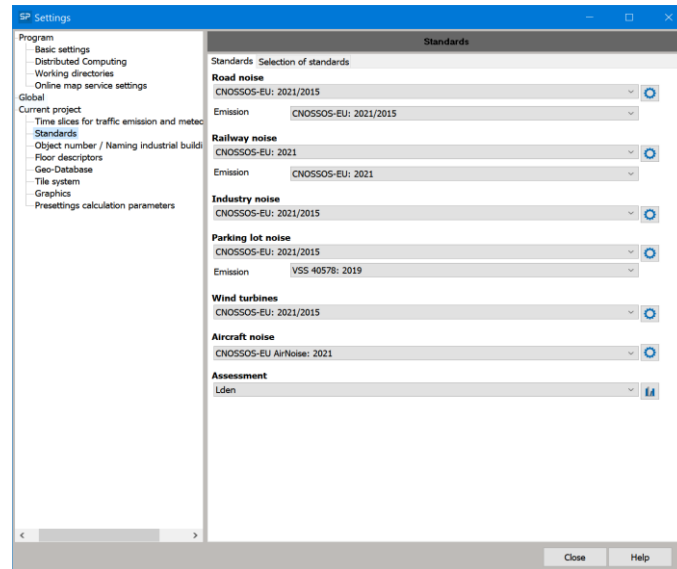
Данас постоји неколико софтверских алата који се професионално најчешће користе за моделовање и мапирање буке: *CadnaA*, *IMMI*, *SoundPlan*, *Lima/Predictor*, *NoiseMap*. Анализе спроведене у овом истраживању имплементирани су у софтверском пакету *SoundPlan* [24]. *SoundPlan* је један од водећих софтверских пакета у овој области већ више од 20 година, који је званично верификован и имплементира одговарајућу методологију и алгоритме за прорачун простирања буке. *SoundPlan* се показао као добар избор за анализу нивоа у буке у околини надземног вода [16]–[22]. Да би могли да се спрведу сви релевантни прорачуни, неопходни су следећи модули и имплементације стандардизације [23]:

- модул за унос података у тродимензионални модел који садржи:
  - компатибилан унос следећих формата: DXF, ESRI *Shape*, DBF, *Google Maps*, OSM и ASCII,
  - унос објеката (стамбених, индустријских, школа, болница) са становништвом (у сваком објекту), различитих типова терена (према акустичким својствима), линијских извора буке и растиња;
- библиотека (са могућношћу измене и уноса нових података) која садржи релевантне податке о емисији буке (ниво, терци спектар, усмереност) и метео податке у виду учесталости и правца ветра;
- модул за прорачун буке линијских извора у складу са хармонизованом CNOSSOS-EU методологијом [26];
- прорачун и графички приказ карата буке (*Grid Map*), прорачун, нумерички и графички приказ нивоа буке на фасадама објеката (*Façade Noise Map*);
- примена важећих стандарда, укључујући прорачун и оцену индикатора буке у складу са релевантном регулативом [27], [28].

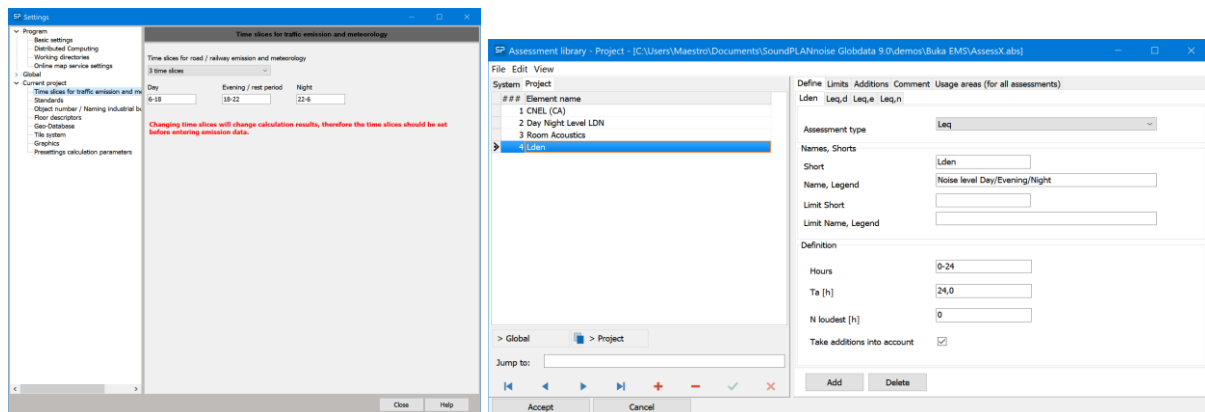
Моделовање у софтверском пакету *SoundPlan* обухвата: основна подешавања у софтверском пакету везана за регулативу и стандарде који ће се применити, моделовање извора буке, учитавање геореференцираних података о анализираном подручју са котама терена, израчунавање дигиталног модела тла, дефинисање параметара окружења

(карактеристике тла, вегетација, објекти итд.), дефинисање подручја за прорачун и одговарајуће представљање резултата прорачуна.

На сликама 1 и 2 приказана су нека од основних подешавања.



Слика 1 Подешавање стандарда који ће се користити за прорачуне



Слика 2 Подешавање временских интервала за прорачун, дан, вече и ноћ, као и интервала за индикатор буке  $L_{den}$ ,  $L_d$ ,  $L_e$  и  $L_n$

**Извор.** У спроведеним симулацијама сваки проводник надземног вода представљен је као широкопојасни линијски извор, равномерног зрачења током целог периода дана од 24 h, чија је непондерисана подужна снага зрачења константна, а укупна А-пондерисана снага зрачења добијена према ВРА методи, израз (3), суперпониран тоналном компонентом на 100 Hz, чија је А-пондерисана звучна снага одређена изразом (7). Карактеристике извора могуће је процениити и на основу резултата мерења под познатим условима.

У софтверском пакету MATLAB написана је скрипта која за задату А-пондерисану снагу зрачења звучног извора одређује вредност непондерисане подужне снага зрачења по октавним опсезима. На слици 3 приказани су параметри симулираног извора за који је ВРА методом одређена А-пондерисана подужна звучна снага извора од 63 dB. Увођење тоналне компоненте у симулацији неће дати најпрецизнији резултат јер за прорачуне у

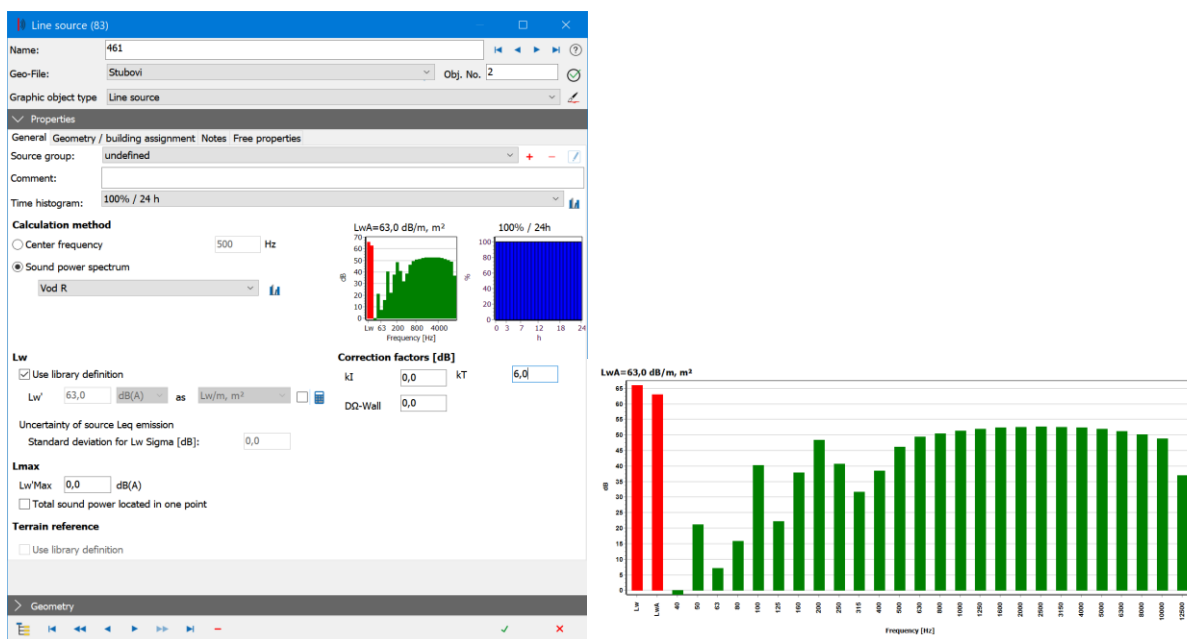
отвореном простору софтверски пакет *SoundPlan* доприноси различитих извора сабира енергетски, док се тоналне компоненте сабирају по тренутним вредностима притиска.

Узнемиравање човека буком зависи од карактеристика буке, што показују резултати различитих научних истраживања утицаја буке на човека [29]. Због тога је уведен појам меродавног нивоа буке са корекцијама еквивалентног нивоа буке у зависности од карактеристика буке. У случају јасно изражене тоналне компоненте врши се корекција нивоа за +6 dB.

Приликом израчунавања дуговременог индикатора буке  $L_{den}$  (1 година) врши се усредњавање према просечним метеоролошким условима у току године (број дана са падавинама,  $N$ , и без падавина,  $365 - N$ ):

$$L_{den} = 10 \log \left[ \frac{1}{365} (N \cdot 10^{0,1L_{50}} + (365 - N) \cdot 10^{0,1(L_{50}-25)}) \right] \text{ [dB]} \quad (8)$$

Са довољном тачношћу за анализу једног распона висина сваког проводника поставља се на средње вредности реалне висине проводника (висина тачке вешања проводника умањена за 2/3 угиба). Уколико постоје геореференцирани подаци са всинама појединих тачака ланчанице могуће их је учитати у оквиру дефинисања трасе проводника ради добијања прецизнијих резултата.

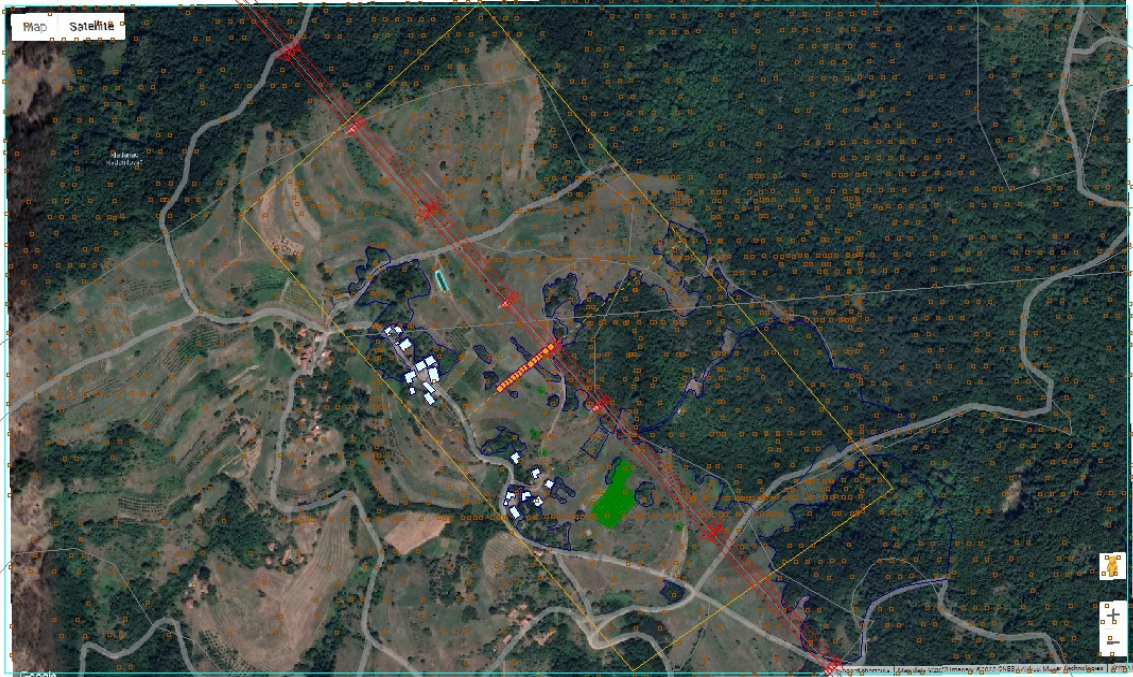


Слика 3 Дефинисање звучног извора у софтверском пакету *SoundPlan*

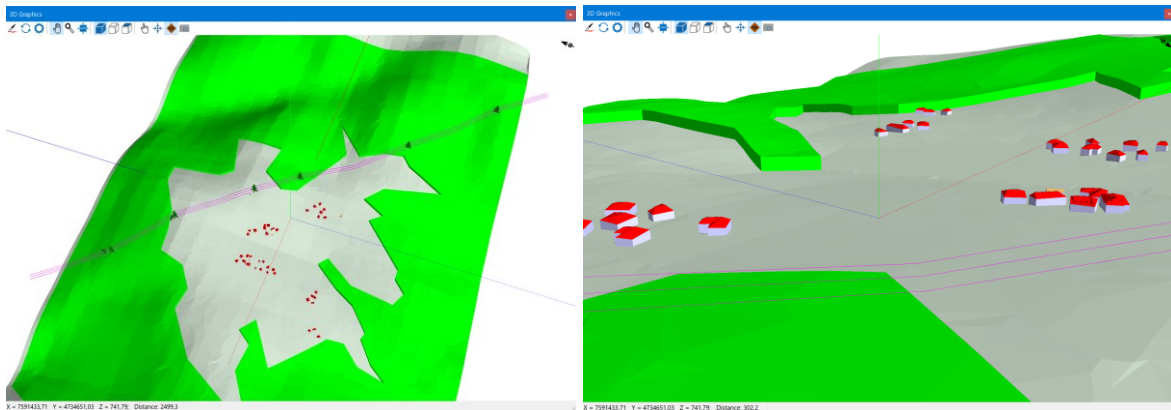
**Геореференциране топографске подлоге** (пре свега, коте терена, као и ортофото) учитавају се повезивањем са платформама *Google Maps* и *OpenStreetMap*, или из неког другог извора. Коте терена (или изохипсе) морају да буду у растеру од најмање 10 m x 10 m по  $x$  и  $y$  оси, са вертикалном резолуцијом бољом од 20 cm. На примеру на слици 4 приказан је ортофото подручја за анализу, преузет из платформе *Google Maps*, где се могу уочити стубови једносистемског надземног вода. Проводници надземног вода су унети као линијски извори и приказани црвеним линијама.

**Дигитални модел тла** (*Digital Ground Model*) израчунава се на основу учитаних кота терена.

**Параметри окружења.** У оквиру анализираниог подручја за порпрачун потребно је унети податке о вегетацији и објектима, на основу којих се одређује рефлектована енергија од тла, као и слабљење приликом пропагације звука кроз вегетацију у складу са одабраним моделом. На слици 5 дат је тродимензионални приказ модела са унетом вегетацијом и објектима. Такође је потребно унети карактеристике тла (*Ground absorption area*), на пример, ако је подручје за анализу травнато, растресито земљиште, може се апроксимирати површином са коефицијентом апсорпције од 0,8.

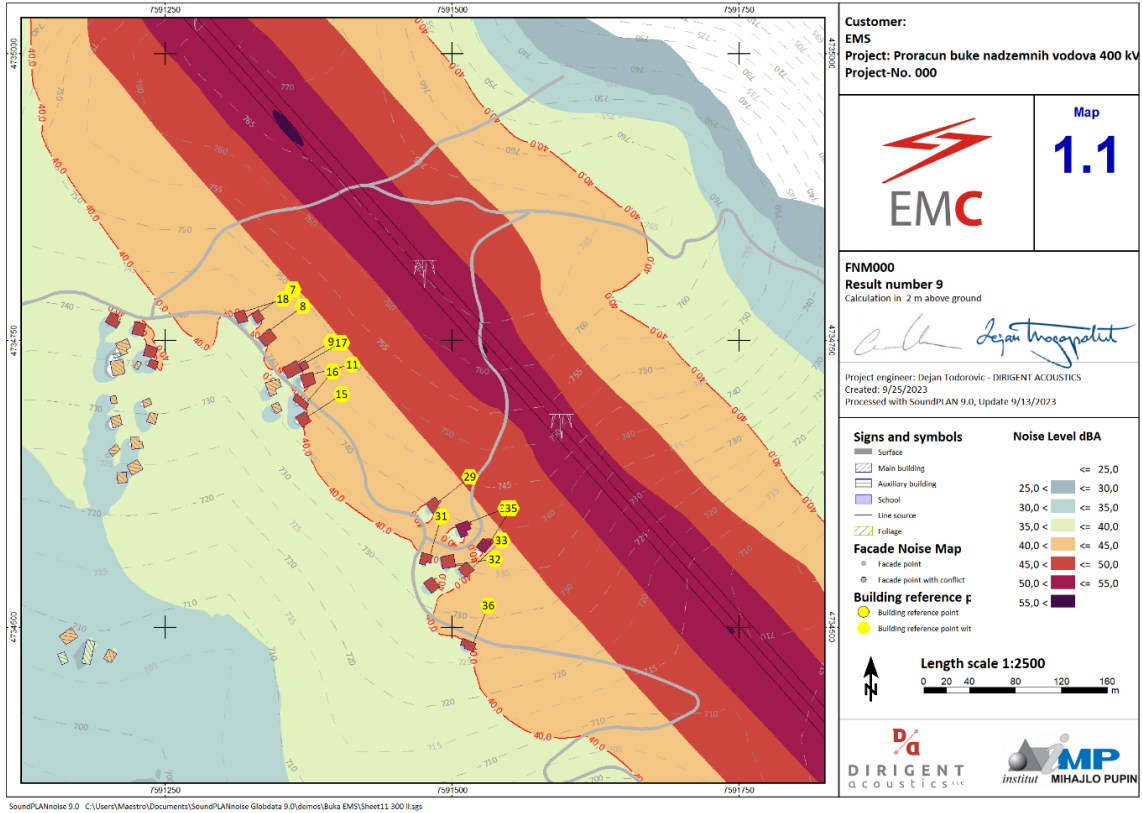


Слика 4 Ортофото подручја за анализу звучног поља у околини једносистемског надземног вода

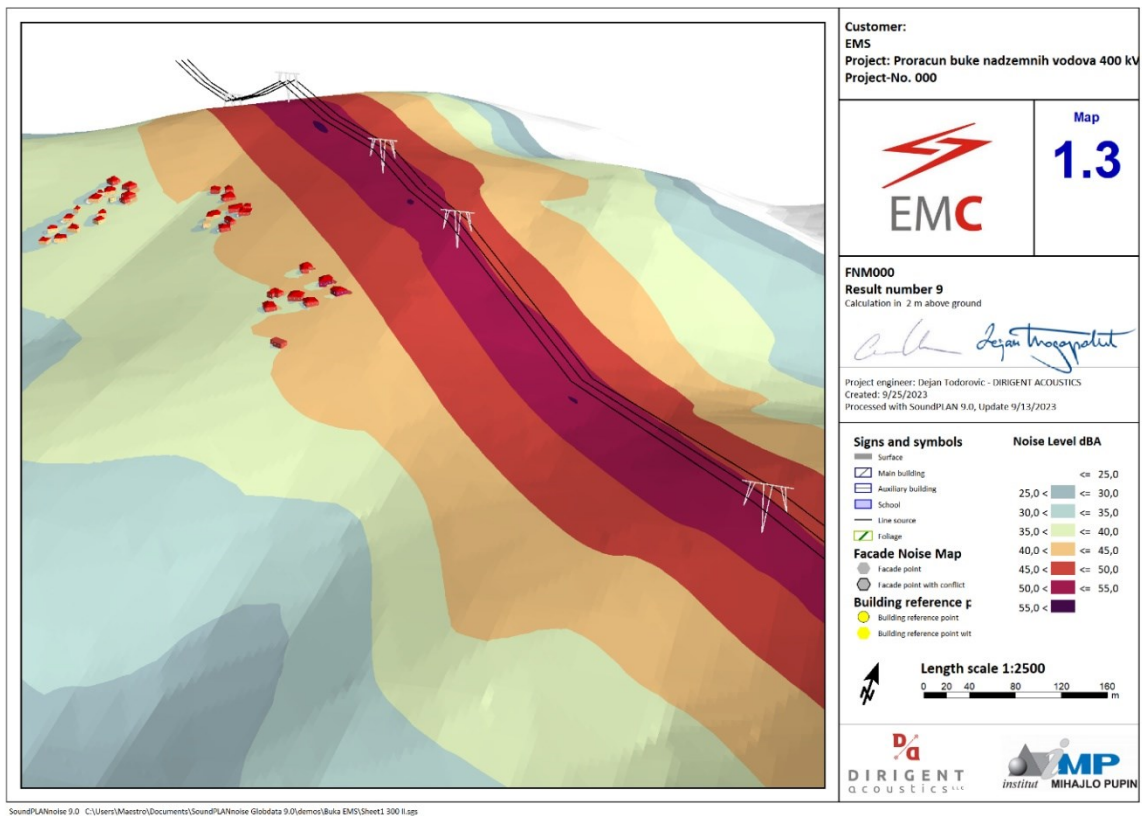


Слика 5 Тродимензиони прикази модела ради сагледавања комплетне ситуације или појединачних детаља и провере





Слика 6 Графички приказ карте буке са означеним објектима на којима је дошло до прекорачења граничних вредности индикатора буке за ноћ



Слика 7 Графички приказ 3D карте буке

**Подручје за прорачун** у хоризонталној равни обухвата зону утицаја надземног вода. На примеру на слици 4 подручје за прорачун је правоугаоник приказан жутом бојом, димензија 940 m x 420 m, постављен симетрично око секције надземног вода. Прорачун се врши на стандардној висини од 1,5 m изнад земље. Црвена испрекидана линија представља позицију вертикалног пресека у коме се рачуна расподела звучног поља у вертикалној равни.

**Метеоролошки услови** одређени су у складу са неповољним условима са кишом, како би се могли поредити са резултатима прорачуна и мерења.

**Резултат** симулације је карта буке, приказана у одговарајућој размери, са одговарајућом резолуцијом (ради боље анализе резултата препоручује се 5 dB) и кодом боја, као што је приказано на сликама 6 и 7.

## **ЗАКЉУЧАК**

У овом раду приказана је развијена методологија предикције звучног поља у околини надземног вода и процене нивоа буке која потиче од ефекта короне. Развијена методологија се добро показала у поређењу предикционих резултата са измереним резултатима на терену и може се користити приликом израде пројекта за одређени надземни вод кроз израду посебног пројекта оптерећења животне средине, који као обавезан део мора да садржи акстичку студију процене нивоа буке.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] CIGRÉ Technical Brochure 748 “Environmental issues of high voltage transmission lines in urban and rural areas,” CIGRE Working Group C3, B1, B2, December 2018
- [2] EPRI Transmission Lines Reference Book – 345 kV and Above, 2<sup>nd</sup> ed., EPRI, Palo Alto California, USA, 1982
- [3] P.S. Maruvada, “Corona Performance of High Voltage Transmission Lines,” Taylor & Francis Group, London, UK, 2000
- [4] M. Abdel-Salam, “High voltage engineering-theory and practice, Marcel Dekker,” New York, 2000
- [5] F. Kiessling, P. Nefzger, J.F. Nolasco, U. Kaintzyk, “Overhead Power Lines – Planning, Design, Construction,” Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003
- [6] ESKOM Holdings Ltd, T. Pillay, S. Bisnath “The Planning, Design and Construction of Overhead Power Lines, 132 kV & above,” Crown Publications cc, Johannesburg, February 2005
- [7] EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, EPRI, Paolo Alto California, 3rd ed., Final report, December 2005
- [8] CIGRÉ Technical Brochure 278 „, The Influence of Line Configuration on Environment Impacts of Electrical Origin - Principles of Overhead Line Design,” CIGRE Working Group B2.06, 2005
- [9] CIGRÉ Technical Brochure 838 „, Coatings for protecting overhead power networks against icing, corona noise, corrosion and reducing their visual impact,” CIGRE Working Group B2.69, 2021
- [10] L.L. Grigsby ed., “Electric Power Engineering Handbook – Electric Power Generation, Transmission, and Distribution,” CRC Press Taylor & Francis Group, 2nd ed., 2006
- [11] R.D. Begamudre, “Extra High Voltage AC Transmission Engineering,” New Age International (P) Ltd., Publishers, 2006



- [12] F.A.M. Rizk, G.N. Trinh, "High Voltage Engineering," Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, 2014
- [13] T. Gönen, "Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design," 3rd ed., CRC Press, 2014.
- [14] CIGRÉ Green Book, CIGRÉ, International Council on Large Electric Systems (CIGRE), Paris, France, SC B2 Overhead lines, Konstantin O. Papailiyo Editor, Springer International Publishing Switzerland 2017
- [15] IEEE Power Engineering Society "IEEE Standard Definitions of Terms Relating to Corona and Field Effects of Overhead Power Lines", IEE Std 539-2005
- [16] A. Donini, R. Spezie, R. Cortina, E.A. Piana, R. Turri, "Accurate prediction of the corona noise produced by overhead transmission lines. In Proceedings of the AEIT International Annual Conference: Sustainable Development in the Mediterranean Area, Energy and ICT Networks of the Future, Capri, Italy, 5–7 October 2016; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: Piscataway, NJ, USA, 2017
- [17] E.A. Piana, A. Donini, R. Spezie, R. Turri, R. Cortina, "Prediction of the audible noise generated by corona discharge on a power transmission line: A model validation. In Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration (ICSV), London, UK, 23–27 July 2017; International Institute of Acoustics and Vibrations: Auburn, AL, USA, 2017
- [18] E.A. Piana, F. Bignucolo, A. Donini, R. Spezie, "Maintenance of a High-Voltage Overhead Transmission Line: Sustainability and Noise Impact Assessment," Sustainability 2018 Vol. 10, No. 491, pp. 1-22, February 2018
- [19] E. Stracqualursi, R. Araneo, S. Celozzi, "The Corona Phenomenon in Overhead Lines: Critical Overview of Most Common and Reliable Available Models," Energies 2021, Vol. 14, No. 6612, 2021
- [20] K. Scheibner, A. Siegemund, A. Frenzel, "Schalltechnisches Gutachten auf Basis der TA Lärm," für 50Hertz Transmission GmbH, 2017
- [21] A. Siegemund, "Schalltechnisches Gutachten auf Basis der TA Lärm sowie DIN 18005," Vorhabenträger Stadt Unterschleißheim, Bau-Anlagen-Umwelttechnik SHN GmbH, 2019
- [22] A. Siegemund, "Schalltechnisches Gutachten auf Basis der TA Lärm", Errichtung einer 380-kV-Freileitung Weida - Remptendorf, 2021
- [23] „Студија процене утицаја и мониторинга буке услед корона ефекта на надземним високонапонским водовима EMC АД“, Институт Михајло Пупин (руководилац Ива Салом), Dirigent acoustics, рађено за EMC АД, Београд 2024
- [24] SoundPLAN 9.1, SoundPLAN LLC, Braunstein + Berndt GmbH
- [25] A. Čaršimamović, „Modeliranje napona početka stacionarne korone zasnovano na mjerenjima električnog polja“, doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Sarajevu, 2018
- [26] S. Kephelopoulos, M. Paviotti, F. Anfosso-Lédée, Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU); Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2012
- [27] Закон о заштити од буке у животној средини, Службени гласник РС, бр. 96/2021
- [28] Уредба о индикаторима буке, граничним вредностима, методама за оцењивање индикатора буке, узнемиравања и штетних ефеката буке у животној средини, Службени гласник РС, бр. 75 од 20. октобра 2010.
- [29] SRPS ISO 1996-1 Акустика – Описивање, мерење и оцењивање буке у животној средини – Део 1: Основне величине и процедуре, новембар 2019. (идентичан са EN ISO 1996-1:2016)

**METHOD FOR NOISE SOURCE MODELLING, CALCULATING, AND  
ASSESSMENT OF CORONA AUDIBLE NOISE FROM OVERHEAD  
TRANSMISSION LINE**

**IVA SALOM  
INSTITUTE MIHAJLO PUPIN  
DEJAN TODOROVIĆ  
DIRIGENT ACOUSTICS  
MILENKO KABOVIĆ, VLADIMIR ČELEBIĆ, MARKO RALIĆ  
INSTITUTE MIHAJLO PUPIN  
NEBOJŠA PETROVIĆ, NADA CUROVIĆ  
JSC EMS**

**BELGRADE**

**SERBIA**

*Abstract*— With the development of transmission networks at high voltage levels, audible noise from high-voltage overhead lines is becoming an increasing issue faced by transmission system operators worldwide. Addressing this problem requires significant investments in existing lines and temporary outages during work. Therefore, it is essential to implement a methodology for assessing noise levels in the vicinity of the designed line during the design process or to assess the impact of proposed solutions for audible noise mitigation on existing lines.

The rapid advancement of computers has enabled the introduction of mathematical modeling and the use of numerical methods in everyday engineering practice, with various software packages used for detailed analysis and calculation of relevant physical quantities. For the purpose of assessing audible noise levels around overhead lines, i.e. noise mapping, a methodology has been developed using one of the industry-standard noise prediction softwares. This method, described in the paper, can be used during the design of overhead lines.

*Key words* — overhead line, corona effect, audible noise, noise mapping

**МЕТОДА ЗА МОДЕЛОВАЊЕ ИЗВОРА БУКЕ, ПРОРАЧУН И  
ОЦЕНУ НИВОА БУКЕ УСЛЕД КОРОНЕ У ОКОЛИНИ НАДЗЕМНОГ ВОДА**

**METHOD FOR NOISE SOURCE MODELLING, CALCULATING, AND  
ASSESSMENT OF CORONA AUDIBLE NOISE FROM OVERHEAD  
TRANSMISSION LINE**

**ИВА САЛОМ\***  
**ИНСТИТУТ МИХАЈЛО ПУПИН**  
**ДЕЈАН ТОДОРОВИЋ**  
**DIRIGENT ACOUSTICS**  
**МИЛЕНКО КАБОВИЋ, ВЛАДИМИР ЧЕЛЕБИЋ, МАРКО РАЛИЋ**  
**ИНСТИТУТ МИХАЈЛО ПУПИН**  
**НЕБОЈША ПЕТРОВИЋ, НАДА ЦУРОВИЋ**  
**ЕЛЕКТРОМРЕЖА СРБИЈЕ АД**

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

*Кратак садржај - Са индустријским и технолошким развојем расте потреба за електричном енергијом, као и за што ефикаснијим преносом, што је условило развој мреже преноса на вишим напонским нивоима, али и донело нове проблеме, који се, између осталог, односе се и на утицај електроенергетског система и његових појединих делова на животну средину. Овакви проблеми су постали посебно значајни са повећањем глобалне еколошке свести. У том смислу, надземни водови данас могу да представљају угрожавајуће структуре. Стога је приликом пројектовања нових водова потребно водити рачуна о утицају на животну средину.*

*Једна од појава, која је најдоминантија на надземним водовима је корона. Највећи број ефеката, који су последица короне, има негативан утицај како на рад електроенергетског система, тако и на животну средину. Поред нејонизујућег зрачења, бука од ефекта короне је основни параметар утицаја високонапонских водова на животну средину, који постаје значајан за водове напонских нивоа од 400 kV навише. Услед све већег приближавања насеља надземним водовима на вишим*

---

\* Волгина 15, Београд, iva.salom@pupin.rs

*напонским нивоима, проблем буке и мере умањења буке постали су актуелна тема на глобалном нивоу.*

*У складу са тим, у оквиру Електромреже Србије спроведена је студија утицаја буке коју стварају високонапонски надземни водови на животну средину, у оквиру које су спроведена опсежна истраживања, укључујући и велики број мерења нивоа буке, са циљем да се, полазећи од самог ефекта са теоријске и практичне стране, испитају и сумирају утицаји различитих параметара надземног вода на ниво буке. Битан резултат студије је развијена методологија прорачуна и оцене нивоа буке, која ће се користити приликом пројектовања високонапонских надземних водова у оквиру посебног елабората заштите од буке, а верификована је кроз мерења на стандардним реалним конфигурацијама надземних водова система преноса Републике Србије. Додатно, приказаном методологијом могуће је извршити анализу и сагледавања метода умањења нивоа буке на постојећим надземним водовима, како би се у свим будућим ситуацијама захтева за умањење буке, систематски могло поступати и бирати оптимална решења.*

*У овом раду биће приказана развијена методологија предикције звучног поља у околини надземног вода и процене нивоа буке која потиче од ефекта короне. Методологија је заснована на мапирању буке (ен. noise map) коришћењем једног од софтверских алата који испуњавају услове за прорачуне буке у животној средини – SoundPlan.*

**Кључне речи** — надземни вод, корона, бука, мапирање буке



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.205C](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.205C)

C2 14

## MODELI PRIMENE EKO-DIZAJN PRISTUPA U UPRAVLJANJU EFEKTOM KORONE NA VISOKONAPONSKIM NADZEMNIM VODOVIMA

NADA CUROVIĆ\*<sup>1</sup>, IVA SALOM<sup>2</sup>, NEBOJŠA PETROVIĆ<sup>1</sup>, MILENKO KABOVIĆ<sup>2</sup>,  
VLADIMIR ČELEBIĆ<sup>2</sup>, DEJAN TODOROVIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ELEKTROMREŽA SRBIJE

<sup>2</sup>INSTITUT MIHAJLO PUPIN

<sup>3</sup>DIRIGENT ACOUSTICS

BEOGRAD

SRBIJA

*Kratak sadržaj* — Energetski sistemi danas osim osnovnih baznih principa pouzdanosti i bezbednosti, kao jedan od primarnih kriterijuma moraju da uključe harmonizaciju infrastrukture sa ekološkim aspektima okruženja. Pri koncipiranju i dizajnu novih objekata izuzetno važan uslov su parametri i performanse sistema koje definišu mere uticaja na životnu sredinu. U tom smislu savremene tehnologije eko-dizajn pristupa uključuju se u najranijoj fazi razvoja projekta i moraju ispratiti kako implementaciju, tako i monitoring tokom eksploatacije i održavanja objekata.

Efekat korone na visokonaponskim nadzemnim vodovima je značajan uticaj koji vodovi mogu imati na okruženje, posebno kada trase prolaze kroz urbana ili delom naseljena područja. Primene eko-dizajn (*eco-design*) pristupa na ovim vodovima izuzetno su korisni i važni kako za nove vodove, tako i za postojeće. Posebno treba imati na umu vodove koji su nekada građeni na potpuno praznim prostorima, a sa razvojem naselja se sada nalaze u sasvim drugačijem okruženju nego kada su projektovani. Dodatni efekat je i činjenica da se o efektu korone, u trenutku kada su ti vodovi građeni u prošlom veku, nije vodilo računa.

Razvijanje modela eko-dizajn pristupa nije identičan za nove i postojeće objekte, i sasvim je drugačiji pristup, kao i tehnologija postupanja.

---

\* Kneza Miloša 11, nada.curovic@ems.rs

**Kada se opredelimo za primenu modela eko-dizajn u upravljanju efektom korone, biramo jedan od dva ponuđena modela u zavisnosti da li se radi o novim objektima ili o aktivnostima na postojećim objektima. U ovom radu biće prikazani predlozi ova dva modela. Pri tome, niz eko-dizajn mera unutar modela se mora sprovesti za svaki pojedinačni projekat. Tačnije, u zavisnosti od svih tehničkih, ekoloških, socijalnih i ekonomskih karakteristika projekta sagledaće se i sve mere i praviti niz mera koje se kroz model eko-dizajn pristupa primenjuju.**

***Ključne reči* —visokonaponski nadzemni vod, efekat korone, životna sredina, eko dizajn**

## **1 UVOD**

Ekodizajn je sistematski pristup koji uzima u obzir uticaje na životnu sredinu u kompletnom životnom ciklusu objekta, a sa ciljem smanjenja štetnih uticaja. Visokonaponski dalekovodi, kao energetska primarna infrastruktura prostorno se disperzivno nalaze na teritoriji čitave zemlje, a izvesnom tendencijom razvoja u nastupajućim godinama. U tom kontekstu i odgovornosti, ali i obaveze uspostavljanja sistematskog pristupa, za upravljače sistema su značajnije. Uspostavljanje modela ekodizajn pristupa predstavlja najpre sagledavanje i odabir najboljih raspoloživih tehnoloških unapređenja, a zatim i projekciju implementacije u sistemima kroz proces razvoja i izgradnje, a potom eksploatacije i održavnja, ali i na kraju dekompozicije sistema. Sve vreme se mora imati u vidu da je ekodizajn alat održivog razvoja, i da sve predložene modifikacije moraju biti u skladu sa tri osnova postulata održivosti - ekološka, ekonomska i socijalna održivost.

U ovom radu je dat predlog modela eko-dizajn pristupa u upravljanju efektom korone na vodovima, sa posebnim akcentom na proces i sistematičnost aktivnosti.

Efekat korone na visokonaponskim nadzemnim vodovima je značajan uticaj koji vodovi mogu imati na okruženje, posebno kada trase prolaze kroz urbana ili delom naseljena područja. Buka je prepoznat i dokazan štetni uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi. Iako vodovi nisu izvor buke visokog stepena, mora se voditi računa i o blagim odstupanjima i prekoračenjima do kojih može doći. Ovde posebno govorimo i o psihološkom uticaju i efektu, koji se ne može kvantifikovati decibelima, ali koji je i dodatno opterećenje kada govorimo o VN vodovima. Upravo zato je važno primeniti eko-dizajn pristup na vodima, implementirati kroz razvoj novih projekata mere, ali razviti i mehanizme za tretiranje postojećih vodova. I što je jednako bitno, sve vreme upoznavati javnost na koju se utiče sa svim preduzetim koracima. Posebno treba imati na umu vodove koji su nekada građeni na potpuno praznim prostorima, a sa razvojem naselja se sada nalaze u sasvim drugačijem okruženju nego kada su projektovani. Dodatni efekat je i činjenica da se o efektu korone, u trenutku kada su ti vodovi građeni u prošlom veku, nije vodilo računa. Današnji trenutak je važan za ove procese i zbog izgradnje vodova 2 x 400 kV koji svakako sa zadržanim karakteristikama mreže 400 kV u Srbiji donose i povećani nivo buke od efekta korone za okruženje.

Kada se opredelimo za primenu modela eko-dizajn u upravljanju efektom korone, biramo jedan od dva ponudjena modela u zavisnosti da li se radi o novim objektima ili o aktivnostima na postojećim objektima. U nastavku su dati predlozi ova dva modela. A niz eko-dizajn mera unutar modela se mora raditi za svaki pojedinačni projekat. Tačnije, u zavisnosti od svih tehničkih, ekoloških, socijalnih, ekonomskih karakteristika projekta sagledaće se i sve mere i praviti niz mera koje se kroz model eko-dizajn pristupa primenjuju.

Model eko-dizajn pristupa se realizuje primenom dva osnovna seta mera:

1. tehnološko – ekološke mere umanjena efekta korone i smanjenja buke na visokonaponskim vodovima,
2. kontinualan rad sa zainteresovanim stranama na projektu (*stakeholders*); izrada plana uz angažovanje zainteresovanih strana (*stakeholder engagement plan*) kroz izradu tehničke dokumentacije i zatim njegova implementacija na projektu; svaka primena mera ili neprimenjane mere eko-dizajn pristupa iz grupe 1 mora biti ispraćena i upoznavanjem zainteresovanih strana sa merama i odlukama.

## 2 MODEL PRIMENE EKO-DESIGN PRISTUPA U UPRAVLJANJU EFEKTOM KORONE NA IZGRADNJI NOVIH VISOKONAPONSKIH DALEKOVODA 400 kV

Izgradnja primarne elektroenergetske infrastrukture su objekti od strateškog značaja za energetske sistem jedne zemlje. Ovi projekti se ocenjuju i preispituju kroz strategije razvoja i strateške energetske dokumente, usaglašavaju sa korisnicima sistema i susednim energetskim sistemima, tako da se i odluke o njihovoj realizaciji donose godinama pre nego što objekti uđu u fazu realizacije i izgradnje. U tom kontekstu blagovremno sagledavanje i potrebe za stepenom primene eko-dizajn modela mora biti u tim najranijim fazama. Kako bi se napravio model primene eko-dizajn modela na ovim objektima neophodno je sagledati regulatorni vremenski okvir realizacije projekta, a potom u skladu sa kategorizacijom objekta (po definisanim parametrima), opredeliti trenutak agažovanja i mere primene.

### 2.1 Regulatorni vremenski okvir realizacije

Na slici 1 dat je regulatorni okvir kroz koji projekti elektroenergetske primarne infrastrukture prolaze u procesu odobravanja realizacije i same realizacije projekta u Srbiji. Takođe je na slici prikazan i nivo odgovornosti za implementaciju.



Slika 1: Regulatorni okvir za realizaciju elektroenergetske infrastrukture u Srbiji

Nivo odgovornosti za Strategiju energetskeog razvoja je na Vladi Republike Srbije (Ministarstvo rudarstva i energetike). Ovaj strateški dokument prolazi niz javnih rasprava i javnih prezentacija, i usvaja se na najvišem nivou u državi. Objekti primarne infrastrukture se kao potreba prepoznaju u ovom dokumentu, kao jednom od strateških dokumenata razvoja države. Zatim se u skladu sa strateškim dokumentima usaglašava i razrađuje plan razvoja prenosnog sistema iz koga proističe i investicioni plan. Ovi planovi su odgovornost operatora prenosnog sistema. Usaglašavaju se sa korisnicima prenosnog sistema i regulativom, a odobravaju i usvajaju od strane državnih organa. Ovako stvoren strateški i planski okvir je osnov za spuštanje na nivo projekta. Na ovom nivou se radi sama realizacija projekta kroz pripremnu fazu izrade planske i tehnicke dokumentacije i pribavljanje svih neophodnih dozvola. Sve to je uslov za izgradnju objekta i puštanje u pogon.

## 2.2 Kategorizacija objekata

Ovaj model predlaže kategorizaciju projekata za potrebe izbora eko-dizajn mera za umanjenje buke, u skladu sa važnošću projekta za sistem, veličinom objekta, investicionim vrednostima, i kao primarno nivoa uticaja i izloženosti stanovništvu. Na slici 2 je dat slikovit prikaz kategorizacije za potrebe izbora eko-dizajn mera.



Slika 2 : Kategorizacija objekata za potrebe eko-dizajn mera

Posmatrajući karakteristike projekata sa stanovišta definisanih kriterijuma, diferenciraju se 4 grupe objekata, koje se mogu prepoznati po sledećim karakteristikama:

*Kategorija 1* – Objekti od visokog značaja za sistem ili objekti velikih investicionih vrednosti, za koje se prepoznaje visok stepen izloženosti stanovništvu i uticaja objekta na okruženje. U ovu grupu bi po stepenu uticaja spadali i objekti za koje trenutno prostor nije okupiran, ali su jasne tendencije širenja urbanih struktura i realno očekivanje u bliskoj budućnosti da će objekti biti u prostoru izloženom ljudima. Za ovu kategoriju su karakteristični vodovi koji napajaju energetska čvorišta velikih gradova, velike transformatorske stanice 400/x u blizini velikih gradova.

*Kategorija 2* – Objekti koji nisu visokog značaja, ili velikih investicionih vrednosti, ali koji imaju visok stepen izloženosti i uticaja. Ovu kategoriju karakteristično prepoznajemo kod priključaka pojedinačnih korisnika na sistem (kratki vodovi, bez visokog značaja za sistem, ali uvek u, ili blizu urbanih ili industrijskih zona)

*Kategorija 3* – Objekti visokog značaja za sistem ili velikih investicionih vrednosti, ali bez značajnog uticaja na okruženje i bez izloženosti. Ova kategorija je zaista najpovoljniji tip objekata za operatora. Kada se radi o važnim i skupim objektima, a uslovi prostora omogućavaju kvalitetan izbor trase dalekovoda koja je potpuno van zone uticaja na ljude, stvoreni su izvesniji uslovi za realizaciju projekta. Ovu kategoriju prepoznajemo često na interkonektivnim dalekovodima. U zonama graničnih prostora između država retko ima

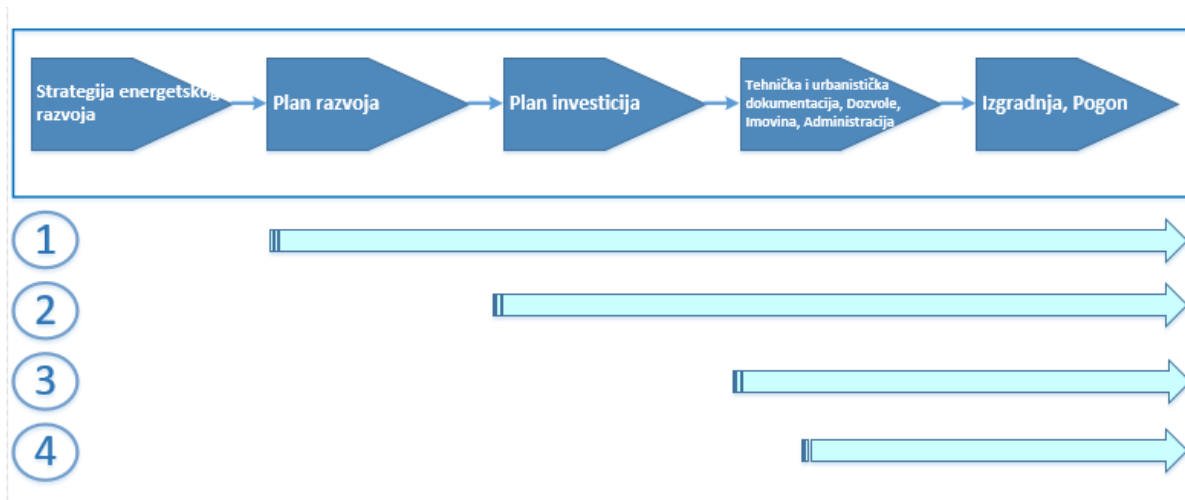


velikih stambenih naselja, i moguće je jednostavnije pronaći čiste prostore, a uvek se kada govorimo o interkonekcijama radi o izuzetno važnim objektima.

*Kategorija 4* – Objektni niskog značaja i cene, bez značajnijeg uticaja na okruženje. Ovo je tip objekata koji će se najređe sresti u investicionoj gradnji. Najčešće se radi o individualnim priključcima korisnika prenosnog sistema koji prolaze kroz neokupirani predeo.

Za svaki nivo kategorizacije od 1 do 4 definiše se drugačiji trenutak aktivacije mera, ali i nešto drugačiji set mera koje će se primeniti. Objekti kategorije 1 i 2 podrazumevaju obaveznu primenu ova seta mera datih na početku ovog poglavlja. Tačnije, predviđaju se tehnološke mere umanjnja efekta korone primenom određenih modifikovanih tehničkih rešenja, zato što je prepoznat uticaj dalekovoda kao i njegova izloženost ljudima. A sve to je ispraćeno setom mera rada sa *stakeholder*-ima kontinualno kroz ceo projekat. Dok u slučaju objekata iz kategorije 3 i 4 ne prepoznaje se potreba za primenom tehnoloških mera, obzirom da ne postoji uticaj na ljude niti izloženost projekta, niti se prepoznaje potencijal prostora da se to promeni u budućnosti. Ali bez obzira na to, neopravdani zahtevi javnosti su nešto sa čime se operatori prenosnih sistema kontinualno na projektima sreću. Iz tih razloga za ove grupe objekata aktivira se set mera 2 – kontinualni rad sa *stakeholder*-ima.

Trenutak aktivacije eko-dizajn mera je naravno proporcionalan poziciji u kategorizaciji. Na slici 3 je prikazan trenutak aktivacije u skladu sa kategorizacijom projekta. Projekti višeg nivoa se aktiviraju značajno ranije, kako bi se mogli obezbediti blagovremeno uslovi za realizaciju i kako bi se na njh od rane faze mere eko-dizajn primenile.



Slika 3: Dinamika aktivacije eko-dizajn mera na projektu u zavisnosti od kategorizacije

*Objekti kategorije 1* aktiviraju eko-dizajn mere u fazi Plana razvoja prenosnog sistema. U tom smislu, u ovoj fazi se kroz mere prepoznaju potrebe i odluke o primeni mera za umanjnje efekta korone na objektu. Na nivou Plana razvoja se mogu za ove objekte prepoznati rizici, ali i dati ispravnije procene pre ulaska u investicionu fazu o poskupljenjima i većim budžetima projekta, koje neminovno primena tehnološko-ekoloških mera podrazumeava. Ono što je ovde važno je i da se od prvih kontakata sa javnošću (prezentovanje plana razvoja, javni uvidi i javne debate), mogu i predstavljati pored značaja objekata i benefita, i mere koje će se primeniti i realni uticaji koji ne mogu nestati, ali za koje je operator prenosnog sistema

primenio tehnologije eko-dizajn mera i *state-of-the-art* tehnika kako bi maksimalno umanjio efekat korone na vodovima.

*Objekti kategorije 2* aktiviraju eko-dizajn mere u fazi ulaska u Plan investicija, kada se donose odluke o dinamici realizacije, ali i tehničkim rešenjima koja će se primeniti u ostvarenju projekta. U Srbiji je uslov za ulazak u Plan investicija urađen i odobren projektni zadatak za objekat, te je ovo trenutak u kome za ovu kategoriju projekata mora da se opredeli i mera koje se primenjuju, ali i uradi plan saradnje sa stakeholderima.

*Objekti kategorije 3* aktiviraju eko-dizajn mere u prvoj pripremnoj fazi, tj. u toku izrade urbanističko planske dokumentacije i precizno definisanje trase dalekovoda. Ova kategorija objekata će u delu rada sa *stakeholder*-ima prvo prezentovanje imati kroz javne prezentacije planske i urbanističke dokumentacije objekta, kroz koje će se *stakeholder*-i upoznati i sa merama i primenom na objektu.

*Objekti kategorije 4*, aktiviraju eko-dizajn mere tek kroz zakonski obavezan deo, tj. kroz izradu Studije o procni uticaja na životnu sredinu, kada je i zakonima u Srbiji neophodno sagledati efekte buke, mere umanjnje i plan implementacije, kao i mere monitoringa po izgradnji objekta.

Na ovaj način za najnižu kategoriju objekata ispunjene su zakonske obaveze, dok je za sve više kategorije predviđeno da operator pokaže viši stepen društvene odgovornosti i uradi znatno više nego što je zakonom predviđeno. Predloženi pristup u primeni ekodesign modela na ovaj način znatno podiže ekološku odgovornost i svest operatora prenosnog sistema, i tera ga da upravlja efektom korone daleko ispred normativa i regulative, pa samim tim i da obezbedi pri izgradnji objekat usklađen sa okruženjem i daleko u budućnosti.

### **3 MODEL PRIMENE EKO-DIZAJN PRISTUPA U UPRAVLJANJU EFEKTOM KORONE NA POSTOJEĆIM VISOKONAPONSKIM DALEKOVODIMA 400 kV**

Mnogo izazovnije i inženjerski složenije je upravljati tehničkim parametrima na postojećim vodovima. Obaveza i primarna svrha dalekovoda je bezbedan i pouzdan prenos električne energije. Kada govorimo o naponskom nivou 400 kV, onda su u pitanju i značajni kapaciteti i uvek važna čvorišta koja vodovi napajaju. Mreža 400 kV u Srbiji nije potpuno razvijena, i dodatno svaka izmena ili isključenje voda zarad modifikacija na njemu, predstavlja izazov za sistem i to sigurno nisu poželjne situacije u sistemu. Dodatno predviđanje i finansijskih troškova na vodovima koji su u dobrom stanju i u skladu sa svim zakonskim i tehničkim normativima, takođe nije omiljena aktivnost upravljača sistemom. Praktično, mreža 400 kV se uglavnom razvila u prošlom veku, kada segment uticaja na životnu sredinu jeste bio jedan od kriterijuma, ali ne primaran, kao danas. Elektrifikacija zemlje, razvoj sistema u ekonomski što prihvatljivijim okvirima, ipak jesu bili primarni parametri. Dodatno urbani razvoj poslednjih pedeset godina, širenje gradova i naselja, ali i industrije, dodatno donose uslove da vodovi koji su građeni van zona uticaja danas mogu biti izloženi ljudima i imati uticaje na njihovo okruženje. Buka, kao efekat korone pri radu 400 kV vodova, je sada i zakonski definisana, tako da i propisi prepoznaju limite i uticaje o kojima nije bilo legislative pre 50 godina. Sve to ukazuje da se efektom buke od korone, moramo baviti sada i na postojećim vodovima, za koje to nije bio predmet analize kada su građeni pre 50 i više godina.

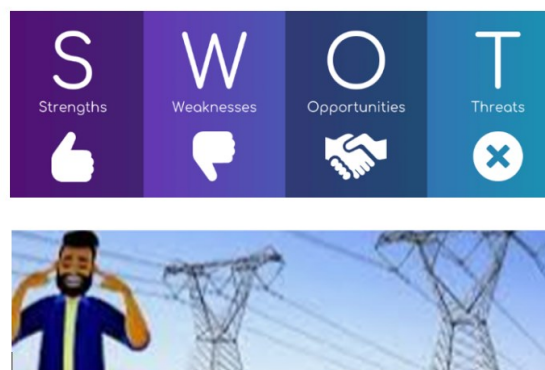
Ekološka i društvena odgovornost operatora prenosnog sistema, ali i zakonski okviri, su osnovni parametri zbog kojih operator mora da se bavi bukom na postojećim objektima.

Primenom mera eko-dizajna na starim objektima mogu se kroz modifikacije i rekonstrukcije stvoriti sistemi koji su znatno usklađeniji sa okruženjem po pitanju nivoa buke koju emituju. U ovakvim situacijama, kada nema jasnog tehničkog limita u kom trenutku je potrebno reagovati i kolika je ta mera prisutnosti stanovništva kada treba primeniti neke od mera, neophodno je uraditi strateške analize, koje bi pomogle da se definiše strategija postupanja sa svakim pojedinačnim vodom.

Za ovaj model primene eko-dizajna izabrana je SWOT analiza. SWOT analiza (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats* - snage, slabosti, prilike, pretnje) je nastala kao strateška tehnika upravljanja kompanijama putem koje se uočavaju strategijski izbori dovodenjem u vezu snaga i slabosti sa šansama i pretnjama u eksternom okruženju. Razvio ju je autor *Albert S. Humphrey* kao analitičku metodu kojom se definišu kritični faktori koji imaju najveći uticaj na poslovanje preduzeća na tržištu[6]. Međutim, kasnije se njena primena prepoznala i u mnogim drugim oblastima i sistemima. Dobar je alat kada se jasnim metričkim parametrima ne mogu poslovne odluke opredeliti.

U ovoj analizi, dva parametra “Snaga” (S) i “Slabost” (W) predstavljaju internu analizu, što u ovom slučaju znači karakteristike samog dalekovoda, dok analiza “Prilika” (O) i “Pretnje” (T) predstavlja eksternu analizu, tj. analizu uticaja i odnosa dalekovoda i okoline.

Ovde će biti primenjena kako bi pomogla u prioritizaciji objekata, i donošenju odluka na kojim vodovima i u kom trenutku će se primeniti metode eko-dizajna za umanj enje buke na postojećim vodovima.



Slika 4: Primena SWOT analize na upravljanju efektom buke na dalekovodima

Ukoliko se SWOT analiza primeni na analizu dalekovoda, potrebno je najpre u skladu sa principima, definisati i polja analize.

**S** - snaga (engl. *strengths*) - označava snagu i potencijal analiziranog sistema. Uopšteno, ovo polje se odnosi na sve ono što je dobro i sve ono što dobro funkcioniše. Ovom stavkom ukazuje se na prednosti sistema i njegovu konkurentnost. Pri analizi dalekovoda, sve uneto ovde je ono što se mora zadržati i ne sme narušiti eventualnim primenama eko-dizajn mera umanj enja buke. Ovde se ceni pouzdanost, kapaciteti prenosa električne energije, kategorizacija objekta i važnost u sistemu, broj korisnika sistema zavinih od objekta, i sve dodatne važne komponente koji ocenjivač na svakom pojedinačnom objektu prepozna kao važne za taj vod.

**W** - slabosti (engl. *weaknesses*) - Ovde se navodi sve ono što ne funkcioniše dobro, ili bilo koji drugi parametar koji nije u rang u prihvatljivog ili željenog postavljenog cilja. Realno se popisuju greške/ispadi/problemi u radu/neželjeni efekti/ itd. Izmerene vrednosti nivoa

buke u dB ovde mogu biti deterministički parametar u ocenjivanju. Takođe, broj žalbi koji je pristigao na efekat buke od dalekovoda se ovde sagledava kao slabost objekta.

**O** - prilike (engl. *opportunities*) – Važna komponenta koja osvetljava i prepoznaje sve mogućnosti razvoja, primene novih tehnologija, šta je danas od unapređenja dostupno, a šta primenjivo na konkretnom objektu, fleksibilnost objekta, prilagodljivost sistema, brzinu transformacije kroz eko-dizajn metode unapređenja u smeru smanjenja buke. Mera potencijala konkretnog objekta za primenom unapređenja i razvojnih tehnologija koje će omogućiti smanjenje buke.

**T** - pretnje (engl. *threats*) - promene u spoljnoj okolini koje predstavljaju pretnju za usklađenost dalekovoda i okruženja. Ukoliko imamo prisustvo stanovništva izloženog efektu buke od korone, govorimo o pretnji koja je nastala u toku eksploatacije i koju moramo sagledati i analizirati i u zavisnosti od stepena procesuirati na kratkoročne ili dugoročne planove akcija primene eko-dizajn mera. Ukoliko imamo i žalbe, pretnja je većeg stepena. Ovde se sagledavaju i trendovi širenja naselja. Važno je na vreme sagledati šta su pretnje koje dolaze i da li se očekuje u bliskoj budućnosti da buka vodova može da bude efekat kome su ljudi izloženi. Ukoliko imamo neki dalekovod gde vrednosti nivoa buke već prelaze limite, onda je ovaj parametar primaran, i na osnovu njega se donosi odluka o primeni mera odmah. U tom slučaju pretnja nije potencijalna, već zakonska.

Sva ova polja SWOT analize postojećeg 400 kV voda, poslužiće u donošenju poslovne odluke da li se za neki objekat pristupa primeni tehničkih mera umanjavanja buke, koja je dinamika realizacije u skladu sa sagledanim parametrima, i koje su mere adekvatne za konkretan objekat.

U tabeli 1 dat je predlog kvantifikacije rezultata SWOT analize na upravljanju efektom buke na dalekovodima. Kvantifikacija je u cilju donošenja odluke o pokretanju aktivnosti primene mera za umanjavanje buke, ali i određivanju perioda u kome treba da se pokrene.

**Tabela 1:** Predlog kvantifikacije rezultata SWOT analize na upravljanju efektom buke na dalekovodima

SWOT	OPIS SKALE OCENJIVANJA	OCENA $W_i$
<b>S</b>	Ocenjivanje „Jačine dalekovoda“ je na način da se ocenama od 1 do 4 boduju pouzdanost, kapacitet prenosa, važnost elementa u sistemu. Preporučuje se da se interkonektivnim vodovima uvek daje ocena 4. Veća ocena „Snage“ dalekovoda kandiduje ga što ranije za primenu mera umanjavanja buke, i samim tim obezbeđenja bolje ekološke usklađenosti sa okruženjem.	$V_S$
<b>W</b>	„Slabost“ se ocenjuje kroz izmerene vrednosti povećanog nivoa buke, broj pristiglih žalbi, evidentne probleme koji postoje sa izloženošću ljudi efektu korone, pojavom podgrađenosti dalekovoda kroz eksploataciju i svim drugim parametrima koji su doprineli slabljenju usklađenosti objekta po pitanju buke sa okruženjem. Skala ocena je od 1 do 4.	$V_W$
<b>O</b>	Potencijalne razvojne mogućnosti primene mera unapređenja i umanjavanja buke na vodu ocenjuju se	$V_O$

	skalom od 1 do 4. U toku ocenjivanja neophodno je prepoznati sa liste tehnoloških mera i primenljive za konkretan objekat i dalje ih analizirati sa stanovišta najboljih tehničkih rešenja i ekonomski optimalnih. Skala ocena je od 1 do 4.	
<b>T</b>	Sagledavaju se opasnosti i pretnje kroz statusu žalbi, opšteg javnog mnjenja i kontinualne neprihvatljivosti vodova od okruženja. Sagledavaju se trendovi širenja naselja i industrije i prepoznaju opasnosti na vreme da se može blagovremeno reagovati. Gradacija se ocenjuje kroz 4 stepena.	$V_T$

Ukupnu ocenu  $W_i$  daje suma pojedinačnih ocena po parametrima SWOT analize, i služi u svrhe svrstavanja objekta u jednu od grupa za pokretanje aktivnosti u skladu sa tabelom 2.

**Tabela 2:** Grupe za pokretanje aktivnosti umanjjenja buke

<b>Grupa</b>	<b>Ukupna ocena W</b>	<b>Opis aktivnosti i dinamike aktivacije u skladu sa ocenom SWOT analize</b>
I	W od 4 do 8	Za objekat se ne pokreću aktivnosti umenjenja buke. Predviđa se kontinualni monitoring i periodična merenja, kao i ponovna analiza za tri godine
II	W od 8 do 12	Za objekat se aktiviraju mere umanjjenja buke na dalekovodu i projekat se uvrštava u trogodišnji plan investicija kroz koji je potrebno primeniti mere eko-dizajna
III	W od 12 do 16	Za objekat se aktiviraju odmah mere umanjjenja buke na objektu. Oba seta mera, kako tehničkih za umanjjenje efekta, tako i rada sa <i>stakeholder</i> -ima i upoznavanje javnosti sa preduzetim aktivnostima

Po sprovođenju ocenjivanja i kvantifikacije odluke, potrebno je proveriti za svaki objekat koji već nije ušao u grupu III, vrednost parametra  $V_T$ . Iako ukupna ocena nije iznad 12, ali ako parametar  $V_T$  ima vrednost 3 ili 4, za objekat treba sprovesti dodatnu analizu i odlučivanje o pridruživanju grupi III. Ovime se radi na umanjjenju potencijalnog rizika. Ako su „pretnje“ takvog nivoa da je evidentna visoka prisutnost izloženosti stanovništva efektu buke od korone, i pored možda nižih drugih parametra u analizi, potrebno je zbog faktora rizika dodatno odlučiti o davanju većeg težinskog faktora ovom parametru i ubrzanju realizacije umanjjenja buke iako analiza to ne pokazuje. Upravo ovo je trenutak gde se jasno pokazuje nemogućnost potpunog izjednačavanja prirodnih matematičkih metoda i nauka, sa upravljanjem reakcijama okruženja i ljudi.

#### **4 TEHNOLOŠKO – EKOLOŠKE MERE UMANJENJA EFEKTA KORONE I SMANJENJA NIVOA BUKE NA VISOKONAPONSKIM VODOVIMA**

Eko-dizajn je okvir koji čine pre svega tehnološko-ekološke mere koje se na sistemima sprovode i kojima se ostvaruju efekti umanjjenja efekta uticaja na životnu sredinu. Ono što je izuzetno važno je da se mere ne mogu posmatrati kao izolovane aktivnosti, već da se moraju sagledavati sveobuhvatno. U slučaju buke ovo je izuzetno bitno, s obzirom da određene mere

moгу imati negativne implikacije na druge uticaje. Eko-dizajn je kontrolna kapa u kojoj se ocenjuje prihvatljivost mera i donose odluke o njihovoj primeni.

Buka nadzemnog voda je prvenstveno posledica pojave korone provodnika; što znači da se smanjenjem pojave korone (sa smanjenjem naponskog gradijenta na površini provodnika) umanjuje nivo buke.

Na vrednost naponskog gradijenta na površini provodnika pre svega utiču [1] [11]:

- 1) napon mrežne frekvencije,
- 2) mrežna frekvencija,
- 3) prečnik provodnika,
- 4) oblik žila za upredanje,
- 5) rastojanje između provodnika u snopu po fazi,
- 6) broj provodnika u snopu po fazi,
- 7) geometrija snopa (prečnik snopa i pozicija pojedinog provodnika u snopu),
- 8) rastojanje između provodnika i zemlje,
- 9) rastojanje kao i međusobni položaj faznih provodnika (koji su određeni konstrukcijom glave stuba),
- 10) stanje površine provodnika,
- 11) atmosferski i meteorološki uslovi.

Neki od ovih parametara su definisani karakteristikama sistema i nisu podložni analizi tj. eventualnoj izmeni. Za određene parametre je sasvim drugačiji pristup u zavisnosti da li govorimo o novim vodovima ili modifikacijama na postojećem dalekovodu.

U tom smislu i mere se zaista moraju birati pojedinačno po projektima, sa ciljem da se odabere optimalno rešenje za svaki jedinstven slučaj dalekovoda u prostoru.

Na slici 5 je dat prikaz odnosa ponašanja određenih karakteristika u zavisnosti od primenjene mere.

Parametar	Električno polje (EF)	Magnetno polje (MF)	Radio smetnje (RI)	Nivo buke (AN)
Povećanje rastojanja između faza	↑	↑	↘	↓
Povećane udaljenosti provodnika od zemlje	↓	↓	↘	↘
Povećanje broja provodnika u snopu	↑	→	↓	↓
Povećanje poprečnog preseka provodnika	↗	→	↘	↘
Povećanje međusobnog rastojanja provodnika u snopu	↗	→	↗	↗
Obrnuti redosled faznih provodnika voda da bi se postigla niska impedansa kod dvosistemskih nadzemnih vodova	↓	↓	→	→

Komentari:

↑ povećanje efekata, jak uticaj

↓ smanjenje efekata, jak uticaj

→ nema suštinskog uticaja

↗ povećanje efekata, slab uticaj

↘ smanjenje efekata, slab uticaj

Slika 5 : Primena mera varijacija parametara i ponašanje uticaja[3]

Prikaz govori samo o smeru u kom se uticaj kreće i nije dovoljan za odlučivanje već se moraju uvek uraditi detaljni proračuni, ali je dobar orijentir i smernica za odlučivanje.

U nastavku su date dve osnovne mere koje se mogu razmatrati na projektima, ali je važno biti svestan da je ovaj problem buke izuzetno aktuelna tema u svetu vodova danas, i treba biti otvoren i za nove tehnologije koje se možda u budućnosti razvijaju.

#### 4.1 Mera umanjenja buke: Izbor tipa provodnika

Verovatno najveće unapredjenje u svetu vodova u poslednjih dvadesetak godina je implementacija specijalnih provodnika na vodovima. Bezizlazna situacija u kojoj su se operatori prenosnih sistema našli, izuzetnim pooštavanjem uslova izgradnje vodova, značajno je ublažena ovim tehnologijama. Ostvariti pravo na nove koridore u nekim zemljama je već sada nemoguće, a svedoci smo da je i kod nas postalo izuzetno teško i u nekim slučajevima potpuno nemoguće i kad nema tehničkih i ekoloških opravdanja za to. Buka nije bila razlog razvoja ovih tehnologija, već je to izuzetno povećanje zahteva za kapacitetima prenosa i nemogućnost nove gradnje. Umanjenje buke novim konstrukcijama provodnika, može se reći da je bio sporedni projekat koji se razvijao u tehnološkim centrima koji su poslednjih tridesetak godina intezivno radili na razvoju specijalnih provodnika.

U komercijalnoj literaturi najviše se pominju 4 osnovna tipa provodnika: AAC (*All Aluminium Conductors*), AAAC (*All Aluminium Alloy Conductors*), ACSR (*Aluminium Conductors Steel-Reinforced*) i ACAR (*Aluminium Conductor Alloy-Reinforced*). Za tip provodnika sa upredenim žilama trapezoidnog oblika ACSR/TW (*ACSR Trapezoidal Wire*) i proračunima je pokazano da se upotrebom ovih provodnika za isti odnos Al/Fe može očekivati smanjenje nivoa buke za 5 – 7 dB. Ta vrednost je upravo ono što često i odgovara neophodnim umanjenjima kako bi se stiglo u propisane zone [1].

Proizvođači nude različita rešenja, poput premaza i prevlaka na površini, konstrukcijama koje imaju šupljinu u sredini, ili provodnik sa plastičnim ispunama. Cilj se postiže smanjenjem naponskog gradijenta na površini provodnika, a time i nivoa buke. Na slici 6 prikazani su neki od primera specijalnih tipova provodnika za smanjenje buke.



Slika 6: Specijalni tipovi provodnika za smanjenje nivoa buke[9] [10]

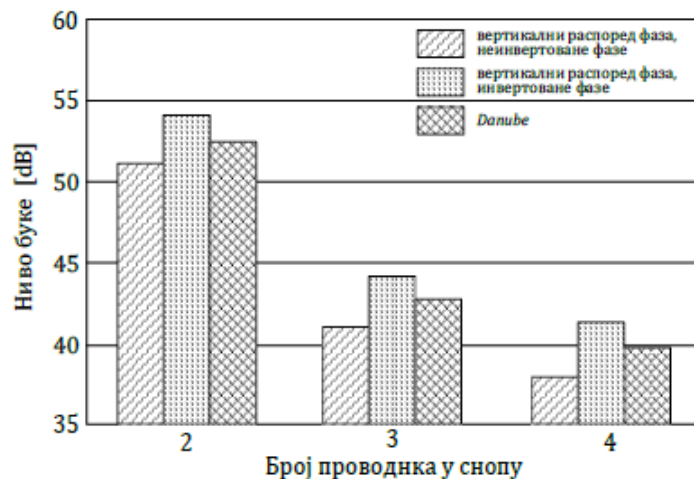
Ova mera je dobro rešenje i za nove i za postojeće vodove, a takodje je i oblast koja se intezivno razvija u istraživačkim centrima pa možemo očekivati i bolje rezultate u vrednostima umanjenja u budućnosti.



Ono što je nedostatak je nedostupnost informacija o ponašanju provodnika kroz vreme, trajnost rešenja i neizvesnost konstantnosti parametara starenjem elementa. Svakako iskustva iz eksploatacije i održavanja moći će da pomognu potvrđivanju ili unapređivanju rešenja. Kao i za svaku inovaciju u oblasti vodova, i ovde postoji određena zadržka i opreznost.

#### 4.2 Mera umanjena buke: Broj provodnika po fazi

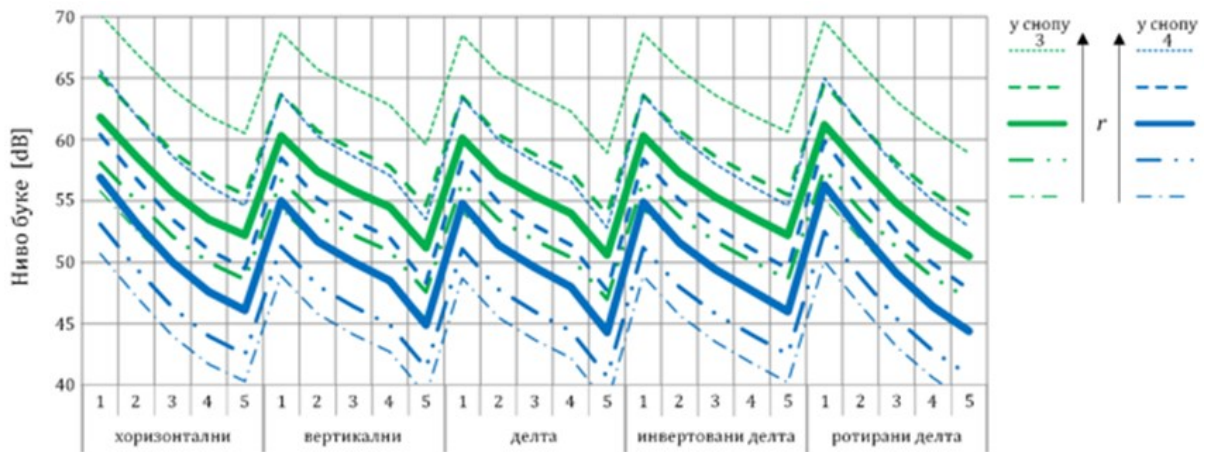
Ovo je verovatno najznačajnija mera umanjena buke na vodovima, kojom se mogu postići značajni rezultati. Međutim, njena primena ni malo nije jednostavna. Neminovno se utiče na tipizaciju stubova, i stavljaju van snage atesti koji za tipske stubove postoje. dodatno regulativa i pravilnici ne sagledavaju ova rešenja. Sve su ovo elementi koji se mogu prevazići, ali definitivno ne govorimo o lagodnom i jednostavnom rešenju. Važno je uzeti u obzir i da o umanjenu govorimo za manji broj provodnika po fazi, dok ne govorimo o umanjenu kada se predje na veći broj. Na slici 7 je prikaz zavisnosti nivoao buke od broja provodnika po fazi[1].



Slika 7: Zavisnost nivoa buke od broja provodnika po fazi (za manje brojeve) [1]

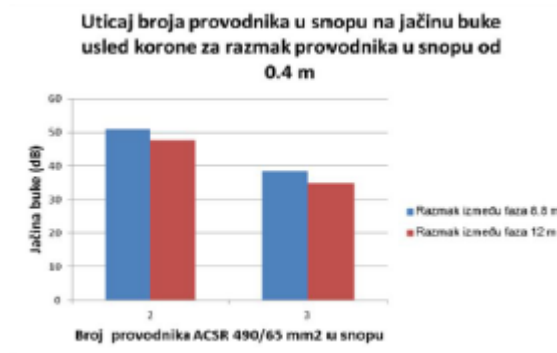
Jedno od značajnijih istraživanja je sprovedeno u SAD, tokom kog je vršeno poređenje različitih vrsta kompaktnih vodova, s ciljem da se odrede dozvoljeni limiti kompaktizacije, između ostalog, u pogledu nivoa buke i vrednosti elektromagnetnog polja na ivici zaštitnog pojasa. Istraživanje je vršeno za nadzemne vodove 500 kV za 5 različitih konfiguracija stubova, i 5 različitih veličina kompaktnosti za svaki. Na slici 8 prikazani su nivoi buke na ivici zaštitnog pojasa za svaku od konfiguracija, za 3 i 4 provodnika u snopu po fazi, za različite prečnike provodnika. Kao što se vidi sa slike, povećanje broja provodnika u snopu po fazi sa 3 na 4 rezultuje smanjenjem nivoa buke za oko 5 dB, pa se u zaključku istraživanja preporučuje upotreba 4 provodnika u snopu po fazi. Na smanjenje nivoa buke utiče i povećanje prečnika provodnika, kao što je očekivano, i to za analizirane vrednosti prečnika nivoi buke se razlikuju za 10 – 12 dB. Može se uočiti da nema izrazitih razlika između različitih tipova stubova, iako horizontalni raspored daje nešto više nivoa buke, a zatim rotirani delta raspored, za oko 1 – 2 dB, u odnosu na ostale rasporede faza[7].





Slika 8: Poređenja nivoa buke na ivici zaštitnog pojasa za vreme nepovoljnih meteoroloških uslova za razne tipove kompaktnih stubova, različite prečnike provodnika i broj provodnika po fazi[7]

Ako posmatramo naš sistem, naponski nivo 400 kV i ustaljeni broj provodnika po fazi 2, varijacije i proračuni o kojima možemo govoriti su urađeni na prvim projektima u prethodne dve godine. Za potrebe izgradnje Transbalkanskog koridora donete su odluke da se na nekoliko raspona, u zonama pojačane osetljivosti i prisustva stambenih objekata u koridorima, primene tri provodnika po fazi. Isto rešenje će se primeniti i na projektu Beogrid. Na ovaj način za te zone će se obezbediti umanjeni nivo buke. proračuni su urađeni kako za buku, tako i za opterećenja na stubovima koji će u ovom slučaju imati drugačiju konfiguraciju sila i opterećenja. U ovom slučaju se radilo o dvosistemskim vodovima naponskog nivoa 400 kV. Urađeni su i proračuni i za jednosistemске vodove. Na slici 9. dat je odnos jačine buke za 2 i 3 provodnika po fazi, a za stubove 400 kV koje EMS ima na raspolaganju, sa razmakom između faza 8,8 i 12 m. Evidentno se i ovde može uočiti značajno umanjeње prelaskom na tri provodnika po fazi.



Slika 9: Zavisnost buke od broја provodnika po fazi i razmaka između faza za tipske stubove 400 kV srpskog prenosnog sistema[2]

## 5 ZAKLJUČAK

Modeli primene eko-dizajn pristupa u upravljanju efektom korone na visokonaponskim nadzemnim vodovima su primer razvoja novih tehnologija i sistematizacije aktivnosti harmonizacije visokonaponskih vodova sa okruženjem, ali i sve strožim normativima i uslovima životne sredine. Važno je imati sistematski pristup i blagovremeno rešavati situacije, ne samo zbog unapredjenja, već često i kao alat za odbranu od neopravdanih

zahteva. Sagledavanje tehničkih parametara i proaktivnost u pristupu, omogućavaju upravljačima da blagovremeno donose odluke, planiraju aktivnosti i u svakom trenutku primenjuju najbolju dostupnu inženjersku praksu. Za kvalitetnu primenu modela neophodna je konstantna inženjerska aktivnost i praćenje tehnološkog razvoja u oblasti vodova, kako bi se i mere permanentno inovirale. Primena modela na novim investicijama možda na prvi pogled donosi samo dodatne aktivnosti i onako izuzetno kompleksnim projektima upravljanja gradnjom linijske infrastrukture. Međutim, benefiti koji pristup može da pruži, a pre svega predupredi zastoje, višestruko su veći. Oblast visokonaponskih vodova je u ovom trenutku u verovatno najizazovnijim okolnostima u poslednjih 50 godina. Zahtevi za novim kapacitetima i integracijom novih izvora energije su ogromni. Sa druge strane neprihvatljivost od strane javnosti iz godine u godinu sve ozbiljnija. Da li je realno da se u kratikim vremenskim okvirima može odgovoriti na sve postavljene zahteve i planove zelene tranzicije za prenosne vodove, teško je potvrditi. Ali razvoj novih tehnologija pristupa i upravljanja sistemima i performansama po principu eko-dizajna, svakako jesu jedan od alata koji treba da obezbedi održiv razvoj, bez usporenja investicija, ali uz umanjenje uticaja na okruženje.

## 6 LITERATURA

- [1] "Studija procene uticaja i monitoringa buke usled korona efekta na nadzemnim visokonaponskim vodovima EMS AD", Institut Mihajlo Pupin (rukovodilac Iva Salom), Dirigent acoustics, Beograd 2024
- [2] N. Petrović, „Uticaj prečnika provodnika, broja provodnika po fazi, razmaka u snopu i međufaznog rastojanja 400 kV nadzemnih vodova na naponski gradijent provodnika i jačinu buke usled korone,“, CIGRE Srbija, Zlatibor 2017
- [3] F. Kiessling, P. Nefzger, J.F. Nolasco, U. Kaintzyk, "Overhead Power Lines – Planning, Design, Construction," Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003
- [4] Q. Li, "Acoustic Noise Emitted from Overhead Line Conductors," PhD Thesis, The University of Manchester, School of Electrical and Electronic Engineering, 2013
- [5] I. Gavranov, Lj. Dimitrov, Z. Milojević, "Corona EHV AC Transmission Lines as Noise Source in the Environment," 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, May 2014
- [6] R.Puyt, F. Birger Lie, "The origins of SWOT analysis", Long rank planning, Volume 56 Issue 3 June 2023
- [7] CIGRE Working Group B2.63, ref.792, "Compact AC overhead lines", Februar 2020
- [8] CIGRE Technical Brochure 278 "The influence of line configuration on environment impacts of electrical origin – principles of OHL design", 2005
- [9] Z.Xu, R.Li, "Research on anti-corona coating of the power transmission line confuctor", Energy and power engineering, Scientific research, 5, pp, 148-150, 2013
- [10] [www.lumpi-berndorf.at](http://www.lumpi-berndorf.at)
- [11] A.Čaršimamović, "Modeliranje napona početka stacionarne korone zasnovano na mjerenjima električnog polja", doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Univerzitet u Sarajevu. 2018.
- [12] Zakon o energetici (Sl. glasnik RS', br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon, 40/2021, 35/2023 - dr. zakon i 62/2023)
- [13] Zakon o planiranju i izgradnji (Sl. glasnik RS', br. 72/2009, 81/2009 - ispr., 64/2010 - odluka US, 24/2011, 121/2012, 42/2013 - odluka US, 50/2013 - odluka US, 98/2013 - odluka US, 132/2014, 145/2014, 83/2018, 31/2019, 37/2019 - dr. zakon, 9/2020, 52/2021 i 62/2023)

# MODELS OF APPLYING ECO-DESIGN APPROACHES IN MANAGING THE CORONA EFFECT ON HIGH-VOLTAGE OVERHEAD POWER LINES

NADA CUROVIĆ\*<sup>1</sup>, IVA SALOM<sup>2</sup>, NEBOJŠA PETROVIĆ<sup>1</sup>, MILENKO KABOVIĆ<sup>2</sup>,  
VLADIMIR ČELEBIĆ<sup>2</sup>, DEJAN TODOROVIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ELEKTROMREŽA SRBIJE

<sup>2</sup>INSTITUT MIHAJLO PUPIN

<sup>3</sup>DIRIGENT ACOUSTICS

BELGRADE

SERBIA

*Abstract*— Today, in addition to the basic principles of reliability and safety, energy systems must include the harmonization of infrastructure with environmental aspects as one of the primary criteria. When conceptualizing and designing new facilities, the parameters and performance of the system that define the measures of environmental impact are of utmost importance. In this regard, modern eco-design technologies are incorporated at the earliest stage of project development and must follow the implementation as well as the monitoring during the operation and maintenance of the facilities.

The corona effect on high-voltage overhead power lines is a significant impact that these lines can have on the environment, especially when routes pass through urban or partially populated areas. The application of eco-design approaches to these power lines is extremely beneficial and important for both new and existing lines. It is particularly important to consider power lines that were once built in completely empty spaces, but with the development of settlements, are now located in an entirely different environment than when they were originally designed. Additionally, it is important to note that the corona effect was not considered when these lines were constructed in the last century.

Developing eco-design approach models is not identical for new and existing facilities, and the approach, as well as the handling technology, is entirely different.

When opting for the application of an eco-design model in managing the corona effect, one of two models is chosen depending on whether it concerns new facilities or activities on existing ones. This paper will present proposals for these two models. Moreover, a series of eco-design measures within the model must be implemented for each individual project. Specifically, depending on all the technical, environmental, social, and economic characteristics of the project, all measures will be considered, and a series of measures will be developed to be applied through the eco-design approach model.

*Key words* — high voltage overhead line, corona effect, environment, eco-design

---

\* Kneza Miloša 11, nada.curovic@ems.rs

**MODELI PRIMENE EKO-DIZAJN PRISTUPA U UPRAVLJANJU EFEKTOM  
KORONE NA VISOKONAPONSKIM NADZEMNIM VODOVIMA**

**MODELS OF APPLYING ECO-DESIGN APPROACHES IN MANAGING THE  
CORONA EFFECT ON HIGH-VOLTAGE OVERHEAD POWER LINES**

**NADA CUROVIĆ\*<sup>1</sup>, IVA SALOM<sup>2</sup>, NEBOJŠA PETROVIĆ<sup>1</sup>, MILENKO KABOVIĆ<sup>2</sup>,  
VLADIMIR ČELEBIĆ<sup>2</sup>, DEJAN TODOROVIĆ<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>ELEKTROMREŽA SRBIJE**

**<sup>2</sup>INSTITUT MIHAJLO PUPIN**

**<sup>3</sup>DIRIGENT ACOUSTICS**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj -Energetski sistemi danas osim osnovnih baznih principa pouzdanosti i bezbednosti, kao jedan od primarnih kriterijuma moraju da uključe harmonizaciju infrastrukture sa ekološkim aspektima okruženja. Pri koncipiranju i dizajnu novih objekata izuzetno važan uslov su parametri i performanse sistema koje definišu mere uticaja na životnu sredinu. U tom smislu savremene tehnologije eko-dizajn pristupa uključuju se u najranijoj fazi razvoja projekta i moraju ispratiti kako implementaciju, tako i monitoring tokom eksploatacije i održavanja objekata.*

*Efekat korone na visokonaponskim nadzemnim vodovima je značajan uticaj koji vodovi mogu imati na okruženje, posebno kada trase prolaze kroz urbana ili delom naseljena područja. Primene eko-dizajn mera na vodovima izuzetno su korisni i važni kako za nove vodove, tako i za postojeće. Posebno treba imati na umu vodove koji su nekada građeni na potpuno praznim prostorima, a sa razvojem naselja se sada nalaze u sasvim drugačijem okruženju nego kada su projektovani. Dodatni efekat je i činjenica da se o efektu korone, u trenutku kada su ti vodovi građeni u prošlom veku, nije vodilo računa.*

*Razvijanje modela eko-dizajn pristupa nije identičan za nove i postojeće objekte, i sasvim je drugačiji pristup, kao i tehnologija postupanja.*

*Kada se opredelimo za primenu modela eko-dizajn u upravljanju efektom korone, biramo jedan od dva ponuđena modela u zavisnosti da li se radi o novim objektima ili o aktivnostima na postojećim objektima. U radu su prikazani predlozi ova dva modela. Modeli primene eko-dizajn pristupa u upravljanju efektom korone na visokonaponskim*

---

\* Kneza Miloša 11, nada.curovic@ems.rs

*nadzemnim vodovima su primer razvoja novih tehnologija i sistematizacije aktivnosti harmonizacije visokonaponskih vodova sa okruženjem, ali i sve strožim normativima i uslovima životne sredine. Važno je imati sistematski pristup i blagovremeno rešavati situacije, ne samo zbog unapredjenja, već često i kao alat za odbranu od neopravdanih zahteva. Sagledavanje tehničkih parametara i proaktivnost u pristupu, omogućavaju upravljačima da blagovremeno donose odluke, planiraju aktivnosti i u svakom trenutku primenjuju najbolju dostupnu inženjersku praksu. Za kvalitetnu primenu modela neophodna je konstantna inženjerska aktivnost i praćenje tehnološkog razvoja u oblasti vodova, kako bi se i mere permanentno inovirale. Oblast visokonaponskih vodova je u ovom trenutku u verovatno najizazovnijim okolnostima u poslednjih 50 godina. Zahtevi za novim kapacitetima i integracijom novih izvora energije su ogromni. Sa druge strane neprihvatljivost od strane javnosti iz godine u godinu sve ozbiljnija. Da li je realno da se u kratikim vremenskim okvirima može odgovoriti na sve postavljene zahteve i planove zelene tranzicije za prenosne vodove, teško je potvrditi. Ali razvoj novih tehnologija pristupa i upravljanja sistemima i performansama po principu eko-dizajna, svakako jesu jedan od alata koji treba da obezbedi održiv razvoj, bez usporenja investicija, ali uz umanjeње uticaja na okruženje.*

**Ključne reči** – visokonaponski nadzemni vod, efekat korone, životna sredina, eko dizajn.



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.222J](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.222J)

C2 15

**ПРИМЕНА СНИМАКА ВИДЕО НАДЗОРА ДАЉИНСКИ УПРАВЉАНИХ  
ПОСТРОЈЕЊА ЕМС АД У АНАЛИЗИ УЗРОКА И ПОСЛЕДИЦА ИСПАДА ПО  
СТАЊЕ ПРИМАРНЕ ОПРЕМЕ**

**ХРИСТИНА ЈОВАНОВИЋ<sup>\*1</sup>  
ГОРАН МАРИЋ<sup>2</sup>  
МИЛОШ ЈАЋОВИЋ<sup>1</sup>  
ДУШАН СТОЈКОВИЋ<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ЕМС АД  
<sup>2</sup>ЦИП**

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

*Кратак садржај* - Видео надзор у даљински управљаним трансформаторским станицама донео је оперативном особљу регионалних диспечерских центара ЕМС-а реално надзирање расклопне опреме којом диспечери практично управљају делом преносног система, било променом уклопног стања и токовима снага, било управљањем напонским приликама. Оваквим концептом избегнути су безбедоносни ризици, пре свега у комуникацији са руковаоцем, а сами руковаоци су постављени у много безбедније зоне при манипулацијама.

Овако дизајниран квалитетан видео надзор постројења уз примену апликативног софтвера даје на видео зиду управљачких центара различите кадрове постројења, било да се ради о камерама које покривају расклопну опрему у специфицираним пољима, било да се ради о панорамским камерама које дају свеобухватније кадрирање постројења.

Особље оперативних центара сада је у могућности да користећи апликативни софтвер и само задаје ново кадрирање, позицију и ротацију превасходно панорамских камера. На тај начин добила се могућност да се део или цело постројење посматра из више кадрова и перспектива.

**Кључне речи:** видео надзор, анализа, испади

---

<sup>\*</sup>Словенска 2, 37000 Крушевац, 069/199-72-87, [hristina.jovanovic@ems.rs](mailto:hristina.jovanovic@ems.rs)

## 1. УВОД

Технолошки напредак и вештачка интелигенција интензивно пишу нова правила глобалног пословања. Као алат од изузетног значаја многи високо технолошки проналасци су променили и унапредили процесе пословања.

ЕМС АД прати трендове унапређења и примене напредних технологија и труди се да коришћењем и увођењем најновијих алата олакша производне процесе и да акценат на унапређењу квалитета рада посебно у оквиру своје “core” делатности.

Као један од најзначајнијих новитета на пољу управљања електроненергетским системом јесте увођење видео надзора у даљински управљаним трансформаторским станицама у свом власништву. Овај подухват је дао нови приступ у управљању електроенергетским системом и са собом је донео низ позитивних могућности, које олакшавају и доприносе ефикаснијем, поузданијем и сигурнијем раду преносног система.

Увођењем камера у објектима променио се не само начин експлоатације и одржавања самог постројења, него и композиција самих регионалних диспечерских центара. Диспечерски центри сада су опремљени видео зидовима на којима се приказују расклопна опрема постројења којом се манипулише позивањем команде директно са SCADA система. Поред тога, постоји апликативни софтвер који олакшава надзор постројења у реалном времену и даје нам велики број могућности на основу којих се диспечерима у регионалним центрима, а и оперативном особљу трансформаторских станица, олакшава испуњење главних задатака.

## 2. ПОЗИЦИОНИРАЊЕ КАМЕРА КАО ОСНОВ ФУНКЦИОНАЛНОГ НАДЗОРА ПОСТРОЈЕЊА

Даљински управљане трансформаторске станице добиле су тада најсавременије и иновативно најнапредније технологије видео надзора, које су оперативном особљу и трансформаторских станица и центара регионалног управљања умногоме олакшале основне функције надзора и експлоатације. Модернизацијом методе управљања постигао се велики корак, а самим увођењем камера у трансформаторским станицама постигла се сигурност и ефикасност у надзору и командовању опремом.

Физички камере у постројењима постављене су тако да обухвате што прецизније и што прегледније расклопну опрему којом се управља. У самој поставци камера у појединим постројењима коришћена су и искуства телевизијских камермана како би се са расположивим бројем камера добио видео надзор над расклопном опремом у пољима из више различитих углова. Генерално, ове видео камере су физички постављене на порталима у пољима и самим тим нуде адекватан приказ расклопне опреме где се у неким пољима могу уочити и детаљи који нису видљиви из перспективе оперативног особља трансформаторских станица. Такође, захваљујући адекватном позиционирању камера у постројењу помоћу апликативног софтвера можемо ротирати, зумирати и мењати кадрове камера тако да се не губи на квалитету и прецизности надзора. Прегледност коју пружају видео камере је веома значајна и некада кључна за квалитет и прецизност приликом командовања расклопном опремом.





*Слика бр.1 Приказ камера у постројењу*

Поред камера које служе за приказ расклопне опреме у постројењима се налазе и термовизијске камере које омогућавају прецизан увид о стању опреме у пољу са становишта саме температуре контакта. Оне су изведене тако да имају два објектива, па се у самом постројењу лако препознају. Термовизијске камере су направљене тако да имају функцију обичне видео камере, које уз то поседују и додатак за термо мод. Оне су заслужне за рано откривање кварова, јер детектују разлике у температури које могу указивати на потенцијалне проблеме у раду опреме.



*Слика бр. 2 Изглед термовизијске камере*

Међутим, коришћење камера у постројењу није само допринело бољем праћењу расклопне опреме приликом редовних манипулација искључења и укључења елемената. Сама њихова примена је допринела сигурности и безбедности рада самог оперативног особља трансформаторских станица и ефикасном решавању проблема приликом изненадних испада. Највећи значај камера је заправо у томе што се у тренуцима када трансформаторска станица није поседнута може лако, у највећем броју случаја, увидети узрок настанка испад. Могућношћу увиђања узрока настанка испад доприноси анализи, планирању и самом приступу решавања поремећаја. Диспечери регионалних центара су добили на времену, у тренуцима када се очекује да оперативном



особље трансформаторске станице поседне објекат, тиме што имају могућност да путем апликативног софтвера пронађу и преузму из архиве видео снимака самог постројења у тренутку настанка поремећаја и тиме испланирају адекватан метод за нормализацију уклопног стања.

Пропратни апликативни софтвер који је део система видео надзора поред видео снимака у реалном времену нам даје могућност прегледа архиве снимака које су видео камере забележиле и он је подједнако значајан за диспечере регионалних центара управљања. Уз ову функцију прегледа видео снимака из архиве доступне су и функције израда фотографија, као и ротације и мењање кадрова померајући позицију камера путем апликативног софтвера.

Коришћењем овог апликативног софтвера диспечери у регионалним центрима управљања сада се могу похвалити искуству које свакодневно стичу и проширују доживљавајући многобројне изненадне догађаје у постројењу из ближег угла.

## 2.1 ПРОБЛЕМ СА ИЗЛАЗНИМ РАСТАВЉАЧЕМ У ТС ВРАЊЕ 4

Потврда да је увођење камера допринело квалитету и сигурности при манипулацији расклопном опремом је и случај у ТС Врање 4. Наиме, због планираних радова у далеководном пољу 400 кV бр. 462 у ТС Врање 4 далековод бр. 462 ТС Врање 4 – ТС Штип је био искључен, растављен и уземљен на оба краја. Након завршетка радова и опозива дозволе за рад било је потребно укључити далековод и тако нормализовати уклопно стање на 400 кV страни. Како при самој манипулацији диспечери регионалних центара преко SCADA система позивају камере, у могућности су да се поред саме потврде оперативног особља о положају расклопне опреме увере директно пратећи манипулацију у реалном времену. Захваљујући томе били смо сведоци несвакидашње ситуације када се након команде састављања излазног растављача догодило то да су се два пола растављача саставила, а да је трећи остао у отвореном положају.



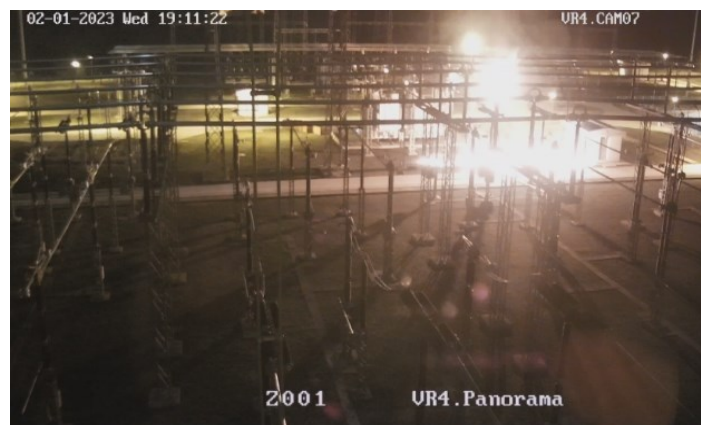
Слика бр. 3 Излазни растављач у ТС Врање 4 у ДВП 400 кV бр. 462

Овом приликом били смо у могућности не само да уочимо новонастало стање, већ и да испратимо ситуацију решавања насталог проблема. Поред помоћи оперативног особља трансформаторске станице огромну улогу у праћењу положаја опреме је одиграо и

видео приказ у реалном времену где је уочено да се приликом издавања команде за искључење излазног растављача ради решавања проблема, растављачи отварају и аутоматски поново састављају два пола као и при првом покушају састављања. Ово је омогућило екипи одржавања ВН опреме да брзо и ефикасно санирају квар користећи информације које им је припремило особље оперативног центра управљања. Оваква синергија доприноси значајном смањивању времена нерасположивости елемента ЕЕС-а и знатно повећава показатеље пословања преносне компаније. Веома значајан тренутак забележен је и архивиран помоћу апликативног софтвера уз помоћ којег данас имамо могућност поново приказати тренутак неусклађеног положаја расклопне опреме при редовној манипулацији укључења далековода, како би смо евентуалне сличне испаде могли брзо и квалитетно санирати.

## 2.2 ЕКСПЛОЗИЈА НМТ-а У ТС ВРАЊЕ 4

У следећем случају панорамске камере су забележиле тренутак када је, такође, у ТС Врање 4 у току ноћи експлодирао напонски мерни трансформатор у ТРП 110 kV од ТР бр.1. Овде се увиђа сам значај постојања видео камера, јер у оваквим опасним ситуацијама може се утврдити стање у постројењу без излагања оперативног особља трансформаторске станице ризику како би диспечери регионалних центара били информисани детаљније о догађају. Ова безбедносна улога видео надзора долази до изражаја баш у оваквим тренуцима еволутивног пожара у постројењу и надјачава потребу за видео надзором само за сврхе обављања реднових манипулација. Наравно, сам труд уложен у планирање позиционирања видео камера у постројењу препознаје се у анализи ситуације из више перспектива, јер се приликом дешавања оваквих типова експлозија могу утврдити поља захваћена ватром без довођења у опасности оперативног особља трансформаторске станице, што је у оваквим случајевима и најбитније. Диспечери имају јасну слику на основу које могу донети диспечерске акције о евентуалним додатним искључењима за санирање самог пожара. Са друге стране колеге из одржавања могу врло прецизно одредити степен оштећења и изложености ватри сваког поједног уређаја и склопова у пољима.



Слика бр. 4 Експлозија НМТ у ТРП 110 kV од ТР бр. 2 у ТС Врање 4

## 2.3 ИСПАД ИЗАЗВАН ОД СТРАНЕ ПТИЦЕ У ТС КРУШЕВАЦ 1

Сам панорамски преглед постројења нуди нам детаљан и јасан приказ дешавања у тренуцима који су били кључни за испад елемената.

У ТС Крушевац 1 имали смо несвакидашњу ситуацију када је птица у лету испустила комад жице на систем сабирница и тиме изазвала експлозију већег интензитета. Важан моменат за расветљавање узрока испада система сабирница и реаговања заштите забележен је и архивиран. Међутим, анализа овог снимка нема само циљ унапређење рада оперативних центара управљања, већ је и помогла оперативном особљу трансформаторске станице у потрази за делом постројења које је било захваћено електричним луком. На тај начин су екипе одржавања имале јасну слику и јасне смернице за санацију квара. Напомињемо да је степен оштећења проводника био много мањи и ако се по слици са надзорних камера не би тако закључило.



*Слика бр.5 Експлозија у ТС Крушевац 1*

## **2.4 ШИРЕЊЕ ПРЕНАПОНСКОГ ТАЛАСА У ТС НИШ 2**

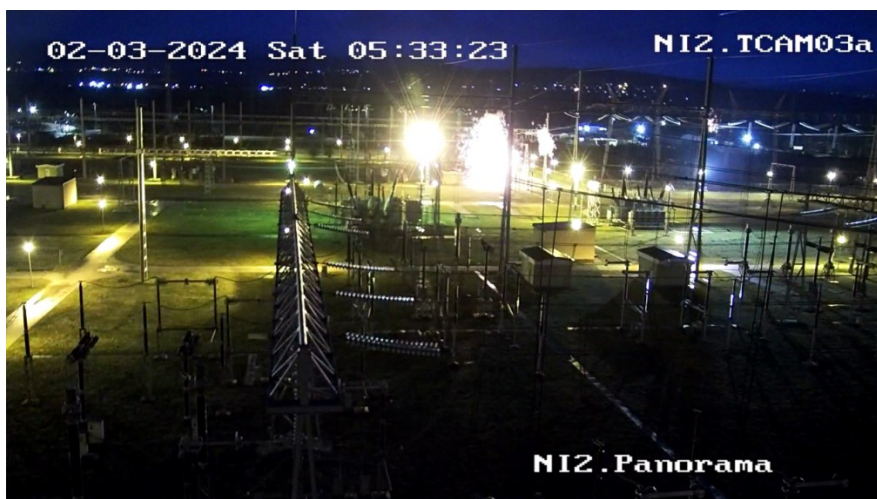
Приликом следећег испада панорамске камере су успеле да сниме распрострање пренапонског таласа по проводницима изнад кваром погођеног поља и његов утицај на изолаторске ланце на њима. Јасно се уочава различит интензитет интеракције пренапонског таласа и изолаторског ланца. Такође се види до којих ланаца се простира талас и који ланци су према интензитету варницења најугроженији.



*Слика бр. 6 Приказ првих тренутака пренапонског таласа у ТС Ниш 2*

Са различитих видео камера које покривају постројење може се из различитих кадрова боље дочарати и приближити сам догађај, па смо тако у могућности да исте поремећаје доживимо из различитих перспектива. Све ово знатно доприноси много лакшој детекцији делова опреме погођених кваром и бржој санацији квара.

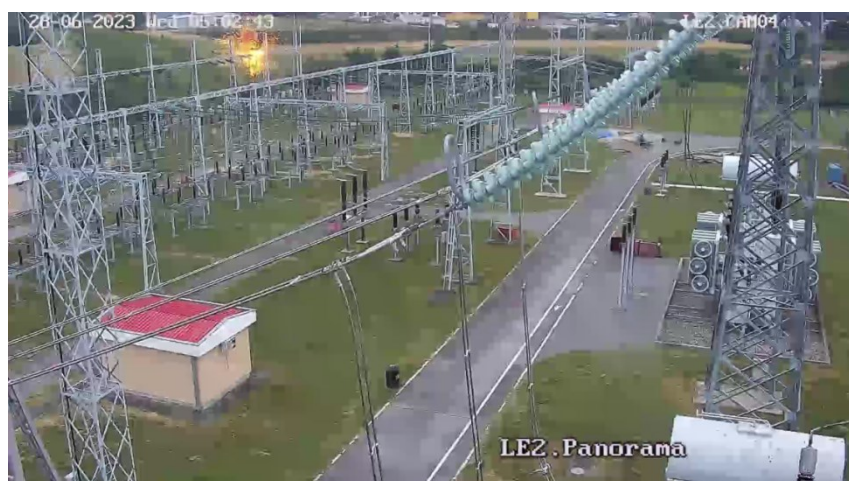




Слика бр. 7 Ширење пренапонског таласа у ТС Ниш 2

## 2.5 ПРЕНАПОНСКИ ТАЛАС У ТС ЛЕСКОВАЦ 2

Сличан пример видимо и у трафостаници Лесковац 2, али је сада пренапонски талас готово локализован само на стубу портала и није се пренео као у претходном случају. Анализом снимака знатно је убрзана санација.



Слика бр. 8 Пренапонски талас у ТС Лесковац 2

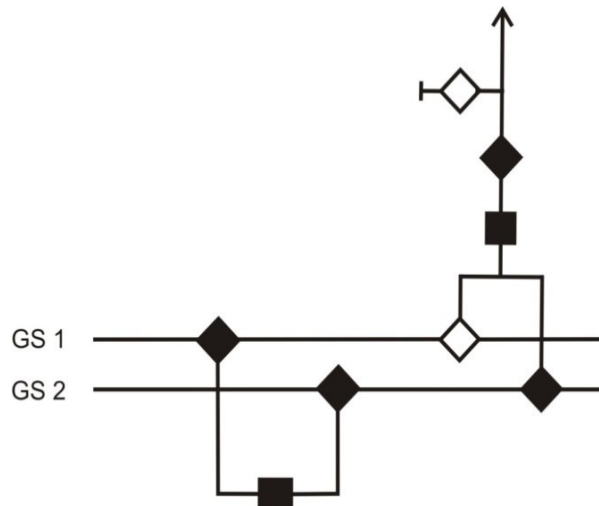
## 2.6 КВАР ОБРТНОГ МЕХАНИЗМА РАСТАВЉАЧА

У својој каријери диспечери регионалних центара сусрећу се и са проблемима који су специфични. Један од таквих проблема је квар обртног механизма растављача. Приликом дешавања оваквих кварова огромну улогу за њихово увиђање играју како оперативно особље трансформаторске станице, тако и видео камере које су на адекватан начин распоређене у постројењу. Како је овај квар веома сложен, а одиграва се при редовним манипулацијама укључења или искључења расклопне опреме, у даљем тексту су описана оба случаја.

## 2.6.1 КВАР ОБРТНОГ МЕХАНИЗМА РАСТАВЉАЧА ПРИ ИСКЉУЧЕЊУ САБИНИЧКОГ РАСТАВЉАЧА

Приликом искључења сабирничког растављача ради пребацивања активних извода са једног система сабирница на други систем сабирница може доћи до квара обртног механизма растављача и тиме се може угрозити нормалан рад.

У првим тренуцима припреме за манипулацију ослобађања једног од система сабирница имамо то да је спојно поље укључено како би се изједначили потенцијали оба система сабирница и безбедно приступило манипулацији.

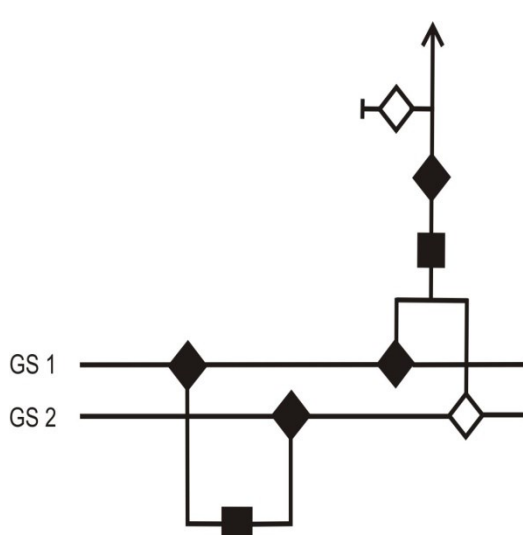


Слика бр.9 Припрема за манипулацију ослобађања система сабирница

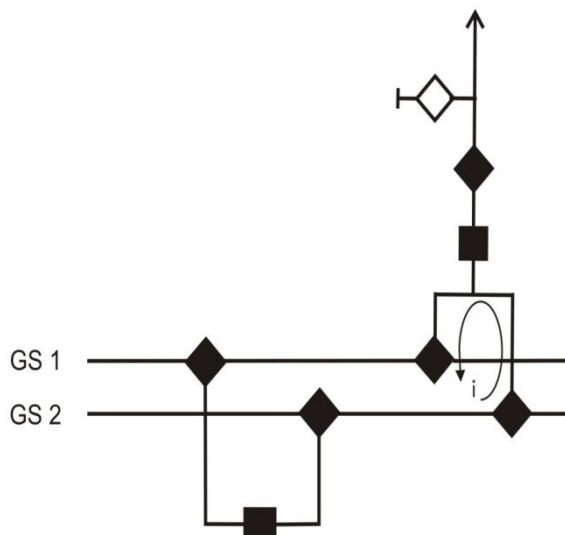
Након извршене припреме следи тренутак када се укључује сабирнички растављач система сабирница на који се пребаца активни извод, а потом искључује сабирнички растављач система сабирница који је потребно ослободити. Након дате команде за искључење сабирничког растављача система сабирница који се ослобађа долази до испада механичког осигурача, дела обртног механизма већ поменутог сабирничког растављача. У том тренутку, мотор погонског механизма растављача одрађује свој радни циклус, а сигнална склопка добија информацију да је сабирнички растављач искључен. Треба напоменути да се приликом свих манипулација у постројењу користе камере ради безбедног извођења манипулација. Зато је ово кључни моменат када се помоћу видео камера и SCADA система може уочити квар оваквог типа.

На SCADA систему се приказује да је сабирнички растављач искључен. Међутим, путем видео камера се може јасно видети да је сабирнички растављач остао укључен и долази до јављања вртложних струја, и може деловати диференцијална заштита сабирница. У оваквој ситуацији не постоји могућност командовања растављачима, већ се мора приступити искључењу прекидача елемента.

Врло значајан моменат употребе видео камера при редовним манипулацијама даје на значају самом принципу рада напредне методе надзора, командовања и управљања.



Слика бр. 10 Приказ са SCADA система



Слика бр.11 Реално стање опреме

## 2.6.2 КВАР ОБРТНОГ МЕХАНИЗМА РАСТАВЉАЧА ПРИ УКЉУЧЕЊУ САБИНИЧКОГ РАСТАВЉАЧА

У случају настанка истог квара при манипулацији укључења сабирничког растављача када је потребно ослободити један систем сабирница, приказ на SCADA систему неће се усагласити са реалним уклопним стањем које се путем видео камера може јасно утврдити. На SCADA систему се добија информација да је сабирнички растављач укључен, међутим, реално стање је такво да је растављач остао у отвореном положају. Овај случај је веома опасан јер не долази до електричне блокаде командовања растављачем, те се може догодити грешка да се сабирнички растављач система сабирница који је потребно ослободити искључи под теретом.

## 3. ЗАКЉУЧАК

Примена нових метода надзора, командовања и управљања електроенергетским системом допринела је не само ефикаснијем, већ и безбеднијем, поузданијем начину рада. Присутност видео камера у постројењима повећала је сигурност при манипулацији и тиме се још више смањила могућност за неадекватним реаговањем при изненадним ситуацијама. Бенефити који су постигнути видео надзором су јасно видљиви како на пољу раног откривања потенцијалних кварова уз помоћ термовизијских камера, тако и на пољу смањења трошкова одржавања. Ово све са собом носи повећану поузданост и сигурност при вршењу свакодневних задатака, као и смањењу броја кварова и тиме се директно доприноси повећању квалитета рада преносног система. Рано препознавање проблема у постројењу смањује ризик од озбиљнијих кварова коришћењем видео надзора. Такође, примена видео камера као и термовизијских камера није само значајна за дужи радни век опреме, већ и за безбедност екипе одржавања и оперативног особља трансформаторских станица јер су смањени физички прегледи потенцијално опасних подручја, што је на крају и најбитније.

#### **4. ЛИТЕРАТУРА**

CIGRE SEERC 2023

The use of advanced software tools in the management of surveillance cameras in EMS plant in the remote control system

(Dejan Marković, Hristina Jovanović EMS AD)

**APPLICATION OF VIDEO SURVEILLANCE OF REMOTELY CONTROLLED FACILITIES OF EMS AD IN THE ANALYSIS OF CAUSES AND CONSEQUENCES OF OUTAGES FOR THE STATE OF PRIMARY EQUIPMENT**

**Hristina Jovanović<sup>†1</sup>**  
**Goran Marić<sup>2</sup>**  
**Miloš Jaćović<sup>1</sup>**  
**Dušan Stojković<sup>1</sup>**  
**<sup>1</sup>EMS AD**  
**<sup>2</sup>CIP**

**BELGRADE**

**SERBIA**

*Abstract* - Video surveillance in remotely controlled substations brought operational staff of EMS regional dispatch centers real monitoring of switchgear in real time with which dispatchers practically manage a part of the transmission system, either by changing the switching state of equipment and power flows, or by managing voltage conditions. With this concept, safety risks are avoided, primarily in communication with the operator, and the operators themselves are placed in much safer zones during manipulations.

High-quality video plant surveillance designed in this way with the application of application software provides various frames of the plant on the video wall of the control centers, whether it is cameras that cover switchgear in specified fields, or panoramic cameras that provide a more comprehensive framing of the plant.

Operations center staff are now able to use the application software and simply assign new framing, position and rotation of primarily panoramic cameras. In this way, it was possible to observe a part or the whole plant from several frames and perspectives.

*Keywords* - video surveillance, analysis, outages

---

<sup>†</sup>Словенска 2, 37000 Крушеваци, 069/199-72-87, hristina.jovanovic@ems.rs



**ПРИМЕНА СНИМАКА ВИДЕО НАДЗОРА ДАЉИНСКИ УПРАВЉАНИХ  
ПОСТРОЈЕЊА ЕМС АД У АНАЛИЗИ УЗРОКА И ПОСЛЕДИЦА ИСПАДА ПО  
СТАЊЕ ПРИМАРНЕ ОПРЕМЕ**

**APPLICATION OF VIDEO SURVEILLANCE OF REMOTELY CONTROLLED  
FACILITIES OF EMS AD IN THE ANALYSIS OF CAUSES AND CONSEQUENCES  
OF OUTAGES FOR THE STATE OF PRIMARY EQUIPMENT**

**ХРИСТИНА ЈОВАНОВИЋ<sup>‡1</sup>**

**ГОРАН МАРИЋ<sup>2</sup>**

**МИЛОШ ЈАЋОВИЋ<sup>1</sup>**

**ДУШАН СТОЈКОВИЋ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ЕМС АД

<sup>2</sup>ЦИП

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

*Кратак садржај* - Видео надзор у даљински управљаним трансформаторским станицама донео је оперативном особљу регионалних диспечерских центара ЕМС-а реално надзирање расклопне опреме којом диспечери практично управљају делом преносног система, било променом уклопног стања и токовима снага, било управљањем напонским приликама. Оваквим концептом избегнути су безбедоносни ризици, пре свега у комуникацији са руковаоцем а сами руковаоци су постављени у много безбедније зоне при манипулацијама.

Овако дизајниран квалитетан видео надзор постројења уз примену апликативног софтвера даје на видео зиду управљачких центара различите кадрове постројења, било да се ради о камерама које покривају расклопну опрему у специфицираним пољима, било да се ради о панорамским камерама које дају свеобухватније кадрирање постројења.

Особље оперативних центара сада је у могућности да користећи апликативни софтвер и само задаје ново кадрирање, позицију и ротацију превасходно панорамских камера. На тај начин добила се могућност да се део или цело постројење посматра из више кадрова и перспектива.

Поред основне функције управљања камерама апликативни софтвер даје огромне могућност архивирања фотографија и видео записа према изабраним критеријумима. Са новостеченим искуствима у примени софтвера први пут је

---

<sup>‡</sup>Словенска 2, 37000 Крушеваци, 069/199-72-87, hristina.jovanovic@ems.rs

снимљен сами транутак испада елемената у постројењу и забележен на видео запису из више углова што је омогућило документовање самог испада.

Апликација је омогућила и документовање тренутка када птица из обрушавајућег лета испушта из кљуна парче жице на сабирнице постројења као прави бомбардер.

Приликом следећег испада панорамске камере су успеле да сниме распростирање пренапонског таласа по проводницима изнад кваром погођеног поља и његов утицај на изолаторске ланце на њима. Јасно се уочава различит интензитет интеракције пренапонског таласа и изолаторског ланца. Такође се види до којих ланаца се простире талас и који ланци су, према интензитету варничења угроженији.

Експлозија напонских трансформатора током ноћи у незапоседнутом постројењу посматрана из различитих углова доноси слику до којих делова може доспети запаљено уље и до које висине се простире пламен.

На овим примерима врло различитих испада се уочава колико је овај софтвер напредан и колико користи диспечерима у управљачким центрима, јер даје могућност приказа и појашњења ситуације у постројењу у тренуцима када руковаца није присутан на објекту, односно када објекат није поседнут. Време до доласка руковаца на објекат, поред анализе SCADA сигнала, може се искористити за кратку анализу снимљеног материјала са камера. Ово је од веома велике важности јер омогућава диспечерима, колико је то могуће, да сагледају узрок квара и анализирајући новонасталу ситуацију у постројењу добију смернице деловања док се трансформаторска станица не поседне.

*Кључне речи:* видео надзор, анализа, испади



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.235K](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.235K)

C2 16

## UPRAVLJANJE ODRŽAVANJEM ELEKTROPRENOSNE MREŽE PRIMJENOM INTELIGENTNIH ZEMLJIŠNIH KARATA

ANĐELA KRLJAŠ<sup>\*1</sup>, MAJA ANTIĆ<sup>2</sup>, TIJANA MILOVANOVIĆ<sup>1</sup>,  
HRISTINA ŠARAC<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CENTAR ZA KOORDINACIJU SIGURNOSTI SCC D. O. O. BEOGRAD

<sup>2</sup>ELEKTROPRENOS BIH A. D. BANJA LUKA, OP SARAJEVO

<sup>3</sup>NEZAVISNI OPERATOR SISTEMA BIH, SARAJEVO

BEOGRAD, SARAJEVO

SRBIJA, BOSNA I HERCEGOVINA

*Kratak sadržaj* - U ovom radu je predložena inovativna metoda upravljanja održavanjem elektroprenosne mreže zasnovana na primjeni inteligentnih zemljišnih karata, suprotno postojećim tradicionalnim pristupima održavanju. Opisan je postupak kreiranja inteligentnih zemljišnih karata, način prikupljanja, obrade, analize i prikaza digitalnih podataka od interesa za održavanje elektroprenosne mreže. Sagledani su relevantni aspekti primjene geografskog informacionog sistema (*GIS*) za integraciju geografije sa drugim relevantnim podacima poput tehničkih podataka, usklađenosti sa propisima i tehničkim preporukama, uvida u evidencije o radu, vizuelnog pregleda i rezultata fotografskih i termovizijskih snimanja. Na osnovu raspoloživih podataka opisan je način na koji se vrši procjena hitnosti intervencije na pojedinim elementima kao i predikcija potencijalnih slabih tačaka. Za analizu primjene *GIS*-a izabran je dio elektroprenosnog sistema Bosne i Hercegovine (BiH) te je formirana jedinstvena baza atributnih, prostornih, tehničkih i topoloških podataka o dalekovodima (DV), elektranama i transformatorskim stanicama (TS) kako bi se dobio sistem potpuno sposoban za analizu pogonske spremnosti elektroenergetskih objekata (EEO).

*Ključne riječi* - inteligentne karte, *GIS*, mapiranje dalekovoda, digitalizacija podataka, održavanje

---

\* Vojvode Stepe 412, Beograd, [andjela.krljas@scc-rsci.com](mailto:andjela.krljas@scc-rsci.com)

## 1 UVOD

S obzirom na to da kvalitet nadzora i održavanja elektroprenosne mreže zauzima značajno mjesto za poboljšanje performansi elektroenergetskog sistema (EES) teži se da se aktivnosti održavanja unapređuju kroz stalni razvoj i poboljšanje kvaliteta redovnih poslovnih procesa. U tom procesu raspolaganje tačnim i pouzdanim informacijama predstavlja ključnu ulogu jer neblagovremene, nepotpune i/ili netačne informacije mogu dovesti do usporavanja ili potpunog zaustavljanja rada. Zbog same prostorne raspodjele i predispozicija EES-a, izloženosti prirodnoj sredini sa pojavama hazarda upotreba geoinformacionih tehnologija osigurava sticanje potpunijih znanja o prostornim i vremenskim pozicijama, međusobnim relacijama, prednostima, rizicima i ograničenjima. Na osnovu postojećih fondova podataka, klasičnih informacionih sistema i iskustva iz prakse jasan je odgovor na pitanje šta je naša šticeana vrijednost i koje su joj osobine, dok uz pomoć *GIS*-a dobijamo odgovore na pitanja - gdje se naša šticeana vrijednost nalazi (prostor) i kada (vrijeme). Odgovori na ova pitanja olakšavaju rad i razumijevanje problematike službama zaduženim za održavanje, pružaju bitne informacije u pogledu planiranja i analiziranja performansi elektroenergetske mreže, omogućuju procjenu hitnosti intervencije, upravljanje prirodnim, tehničko-tehnološkim i drugim rizicima, predikciju potencijalnih slabih tačaka, analizu troškova održavanja i sl [1, 2].

## 2 OPŠTA SVOJSTVA *GIS*-A

Postoji više različitih definicija *GIS*-a zavisno od potrebe i stanovišta posmatranja. Neke od njih proizilaze iz informatičkih principa, dok druge proizilaze iz teorijskih saznanja o prostoru i vremenu, najveći broj zasnovan je na *GIS*-u kao sredstvu za rad ili na bazama podataka i organizaciji [1]. Analizirajući prethodne koncepte opšta definicija mogla bi da glasi: *GIS* tehnologija objedinjuje bazu podataka koja sadrži geografske podatke (tj. opise fenomena čija je realnost prostor i za koje je lokacija relevantna) u kombinaciji sa softverskim alatima za upravljanje, analizu i vizuelizaciju tih podataka i korisničkom podrškom sa ciljem rješavanja složenih problema (slika 1) [2].



Slika 1. Geografski informacioni sistem

## 2.1 GIS softverski alati

GIS softverska rješenja su sofisticirana i raznovrsna, kao i podaci koji se obrađuju, a najrasprostranjeniju primjenu imaju: desktop GIS programi, *WebMap* serveri, sistemi za upravljanje i skladištenje prostornih podataka, mobilne aplikacije i sl. Najveći proizvođači GIS softvera su *Environmental Systems Research Institute – ESRI*, *PitneyBowes MapInfo*, *Autodesk* itd. Najpopularniji softverski sistem kompanije *ESRI* pod imenom *ArcGIS Server* korišten je za kreiranje geografske baze podataka (*geodatabase*) sa elektroenergetskim sadržajem koja je prikazana u radu.

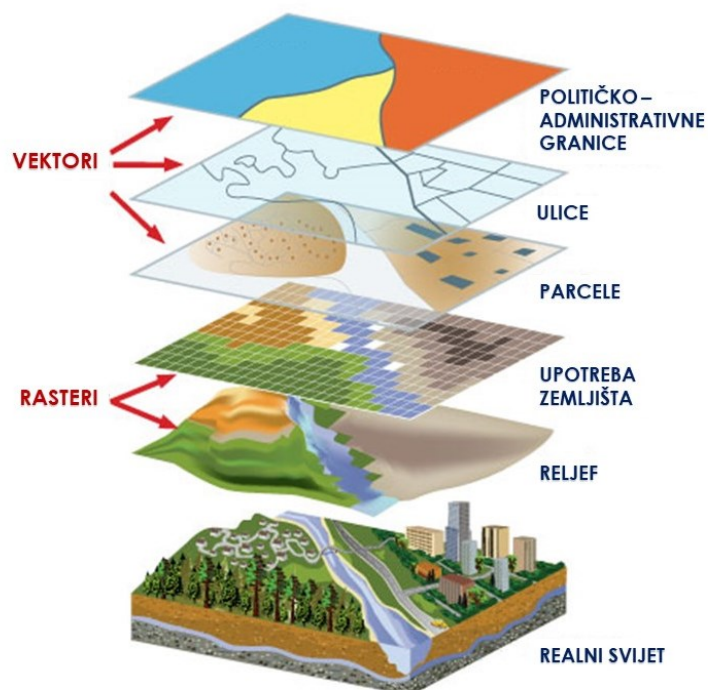
GIS alati postaju neophodni u svim fazama projektovanja, planiranja, upravljanja i analiziranja. Širom svijeta koriste ga elektro, mašinski i građevinski inženjeri, arhitekte, novinari, inženjeri geodezije, ekolozi, prostorni planeri, putničke i avio kompanije i drugi. Osim što razvijene georeferencirane baze podataka pružaju aplikativnu pomoć u radu i obezbjeđuju moćan interfejs za višestruko razumijevanje problematike u raznim djelatnostima, kreirane inteligentne karte postaju roba kojom se trguje i koja ima svoju cijenu. Na tržištu postoji veliki broj razvojnih softverskih kompanija koja proizvode GIS softvere, ali značajan broj malih i velikih specijalizovanih kompanija koje nude finalni GIS proizvod – inteligentnu kartu.

## 2.2 Vrste geografskih podataka

Pomoću GIS-a na jednoj karti moguće je prikazati ogromnu količinu informacija. Geografski informacioni sistemi integrišu različite tipove podataka: rasterske podatke, vektorske podatke, alfa-numeričke podatke i digitalni model visine (reljef). Kao sinonim za rasterske podatke koriste se i termini slikovni podaci ili rasterske slike. Osnovne karakteristike rasterske slike su: rezolucija slike, dimenzije slike, broj boja (dubina slike) i format zapisa. Vektorski podaci su podaci čiju strukturu čine osnovni geometrijski pojmovi: tačka, linija ili poligon. Atributski podaci se izražavaju u alfa-numeričkom obliku, odnosno pomoću teksta i brojeva. Reljef sa ostalim elementima (hidrografijom, infrastrukturom, naseljenim mjestima i sl.) čini jednu prirodnu neodvojivu cjelinu i osim za povećanje vizuelnog efekta povećava kartometrijske i analitičke osobine prikaza prostora [1].

Analizom ovih podataka i njihovog prostornog položaja organizuju se slojevi informacija (slika 2) i vrši vizualizacija pomoću karata i 3D prikaza. Softverska GIS rješenja omogućavaju korišćenje i skladištenje multimedijalnih tipova podataka kao što su: zvuk, slika, animacije i video sadržaj.

Podaci koji se obrađuju mogu imati i vremensku komponentu u smislu prikupljanja i unosa novih podataka i odbacivanja starih i u smislu podataka o količini nekog fenomena koji se prati, a koji se prikupljaju u različitim vremenskim periodima. GIS se koristi kako za kartiranje tako i za izradu fizičkog modela terena. Takođe se koristi za kartiranje događaja kakvi su zemljotresi, razorne oluje, uticaji klizišta na teren i drugih prirodnih rizika što pomaže boljem razumijevanju dinamike ovih događaja i njihovog uticaja na ljude, privredu, kritičnu infrastrukturu i okolinu. Osnova za sve ove informacije je adresa, region, putevi, prostor tj. sve što može biti prikazano i interaktivno upravljano na karti [2, 3].



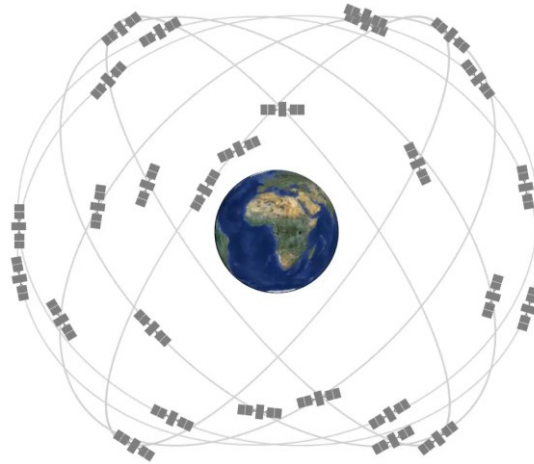
Slika 2. Preklapanje slojeva u GIS-u

### 2.3 Prikupljanje i izvori podataka

Faza prikupljanja podataka je najzahtjevniji korak pri kreiranju GIS baze podataka. Neki autori navode da oko 80% vremena, a i troškova otpada na ovu fazu [4]. Ulazni geografski podaci pribavljaju se iz različitih izvora: geografskih karata, satelitskih i avionskih snimaka, direktnim prikupljanjem na terenu itd, dok se atributski podaci koji opisuju svojstva objekata (kvantitativna i kvalitativna) preuzimaju iz relevantnih zapisa i izvještaja ili medija kao što su zvučni zapisi, slike i sl.

Svi podaci koji se prikupljaju i obrađuju imaju tri dimenzije: vremensku, tematsku i prostornu. Vremenska dimenzija nam daje informaciju kada su podaci prikupljeni, tematska (neprostorna ili atributska) opisuje svojstva stvarnog svijeta koja se odnose na podatak. Prostorna dimenzija daje informaciju o lokaciji pojave ili objekta koji se posmatra. Svim prostornim podacima upotrebljenim u GIS-u moraju se dati matematičke reference, što se najčešće postiže upotrebom koordinatnog sistema [1]. Do matematičkog referenciranja se najlakše dolazi upotrebom sistema za globalno pozicioniranje (*Global Positioning System - GPS*). To je sistem lociranja zasnovan na radu 24 satelita, raspoređena u orbiti Zemlje na visinama od približno 20 200 km, koji šalju radio signale na površinu Zemlje (slika 3). GPS se sastoji od tri dijela: satelita u orbiti Zemlje, kontrolne i nadzorne stanice na Zemlji i GPS prijemnika u vlasništvu korisnika čijom interakcijom se obezbjeđuje tačno pozicioniranje 24 sata dnevno, bilo gdje na Zemlji. Svaki GPS prijemnik može da odredi svoju tačnu poziciju: geografsku širinu, geografsku dužinu, nadmorsku visinu (x, y, z koordinate) i vrijeme (T) [5].





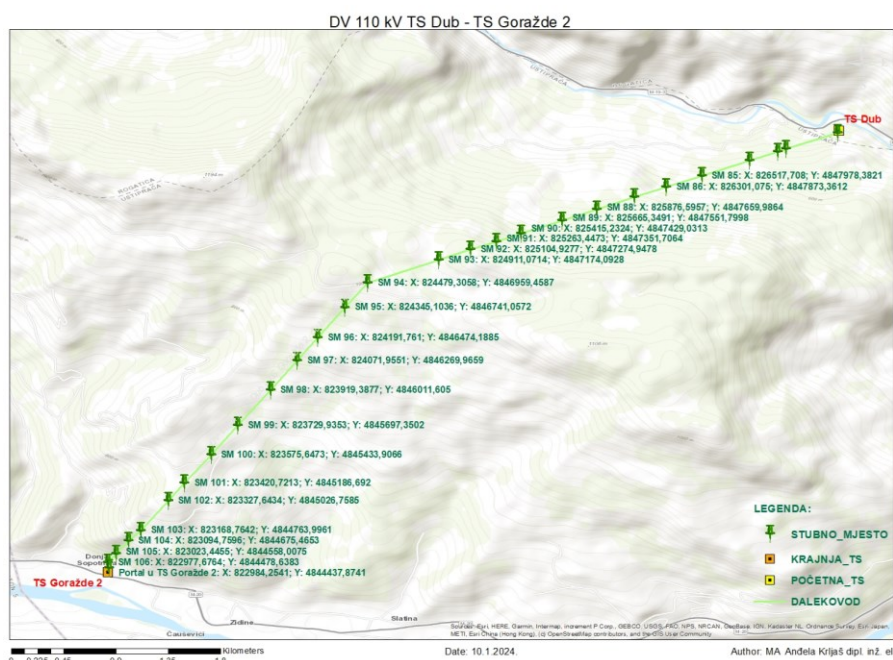
Slika 3. GPS konstelacija od 24 satelita u 6 orbitalnih ravni koje su nagnute pod uglom od 55° u odnosu na ekvatorijalnu ravan [6]

### 3 UPRAVLJANJE ODRŽAVANJEM ELEKTROPRENOSNE MREŽE UZ POMOĆ GIS TEHNOLOGIJE

Uz pomoć GIS tehnologije modelovana je prostorna šema dijela elektroprenosne mreže BiH 400 kV, 220 kV i 110 kV sa položajem sedam TS-a, trasama pratećih DV-a (dva interkonektivna i 16 internih) te položajima hidroelektrana povezanih na mrežu (HE Višegrad i MHE Dub). GIS projekat sproveden je kroz tri faze:

1. Sumiranje aktuelnih izvora podataka i njihovo digitalno transformisanje;
2. Uspostavljanje modela inteligentne karte koja će ispuniti zahtjeve poslovnog procesa;
3. Kreiranje baze podataka i interaktivnog ekrana, izlaznih mapa, analitičkih podataka i karakterističnih izvještaja od strane GIS-a.

Primjenom GPS prijemnika određena je pozicija EEO-a čime su dobijeni ulazni podaci za mapiranje. Primjer jednog DV-a dat je na slici 4.



Slika 4. Karta sa koordinatama

Dalje, kreirana je odgovarajuća GIS baza podataka, korisnički orijentisana, sa prijedlogom atributne liste za svaki DV, TS, HE, MHE te za svaki stub (slika 5) i karakteristični raspon (slika 6). Samo neki od podataka sadržanih u kreiranim atributnim listama su:

- **DV:** naziv, godina izgradnje, centar upravljanja, naponski nivo, dužina trase, broj stubova, sistem užadi, materijal i presjek provodnika i zaštitnog užeta, ukrštanja sa drugim DV-ima itd;
- **HE:** naziv, godina puštanja u pogon, instalisana snaga, tip turbine, prosječna godišnja proizvodnja, broj transformatora (TF), prenosni odnos i snaga TF-a, srednji godišnji protok, zapremina akumulacije, ostvareni rekord proizvodnje, broj generatora, snaga generatora, instalisani proticaj, konstruktivni pad, stepen iskorištenja, broj obrtaja generatora, dužina i visina brane, donja i gornja kota akumulacije itd;
- **TS:** naziv, godina izgradnje, broj i prenosni odnos TF-a, tehnički podaci o TF-ima, broj i naziv DV-a 400, 220, 110 kV, postrojenje 35, 20, 10 kV;
- **STUB:** naziv DV-a, redni broj stubnog mjesta, nadmorska visina, visina konstrukcije stuba, vrsta konstrukcije stuba, položaj stuba na trasi, raspored provodnika, zaštitno uže, oznaka stuba, tablice za upozorenje, stanje temelja, objekti u blizini stuba, stanje uzemljivača, stanje konzola i opreme, stanje konstrukcije, stanje ovjesne opreme, vrsta izolatora, stanje izolatora;
- **KARAKTERISTIČNI RASPON:** naziv DV-a, redni broj raspona, početna i krajnja tačka raspona, dužina raspona, karakteristika raspona, karakteristični detalj na trasi.

Pored pobrojanih atributa svaki kreirani vektor sadrži koordinatu x, koordinatu y, nadmorsku visinu, datum pregleda i datum unosa. Urađeno je i **skladištenje dokumentacije** poput jednopolnih šema, pogonskih uputstava, projektne dokumentacije, slika, izvještaja o izvršenim vizuelnim i/ili termovizijskim pregledima, izvještaja o periodičnim ispitivanjima relejne zaštite, TF-a i visokonaponske (VN) opreme i aparata, unos napomena itd.

OBJ	SHAPE	NAZI	RE	KOORDINATA X	KOORDINATA Y	NADMORSKI	TIP	ST	POLOZAJ	STU	RASPORED	SISTEM	U	TABL	OZN	OBJEK	STANJE KONZOLA	STANJE KONSTRUKCIJE
1	Point	DV 40	1	43,762415	19,128935	370,1765	Y7		Krajnji		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
2	Point	DV 40	2	43,763945	19,28787	460,1617	Y3		Ugaono zatezni		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
3	Point	DV 40	3	43,764804	19,28547	550,1656	Y1		Linjski noseći		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
4	Point	DV 40	4	43,765799	19,28272	623,0197	Y1		Linjski noseći		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Otklačen L profil 50x50.	
5	Point	DV 40	5	43,766695	19,28026	655,4158	FINAC		Ugaono zatezni		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
6	Point	DV 40	6	43,76976	19,27559	544,9479	Y3		Ugaono zatezni		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
7	Point	DV 40	7	43,772424	19,27419	539,0482	Y1		Ugaono zatezni		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
8	Point	DV 40	8	43,77465	19,27351	585,1504	Y3		Ugaono zatezni		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
9	Point	DV 40	9	43,778077	19,27457	685,4233	Y1		Ugaono zatezni		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
10	Point	DV 40	10	43,77908	19,27463	624,2725	Y1		Linjski noseći		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
11	Point	DV 40	11	43,781102	19,27487	547,0491	Y1		Linjski noseći		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
12	Point	DV 40	12	43,782893	19,27509	474,1858	Y3		Ugaono zatezni		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
13	Point	DV 40	13	43,787925	19,27487	491,5472	5Y		Ugaono zatezni		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nedostaje 1 L profil.	
14	Point	DV 40	14	43,790849	19,27814	442,926	3Y		Ugaono zatezni		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
15	Point	DV 40	15	43,7491918	19,28069	404,7374	1Y		Ugaono zatezni		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	
16	Point	DV 40	16	43,792079	19,28119	396,4539	Portal		Krajnji		Horizontalni	Dvostruki	Imaju	Imaju	Nema	Nisu uočena oštećenja	Nisu uočena oštećenja	

Slika 5. Dio atributne liste DV 400 kV HE Višegrad - TS Višegrad za klasu STUB

OBJ	NAZIV DALEKOVOODA	STI	STU	DUZINA RASPONA	KARAKTERISTIKA RASPONA	KARAKTERISTIČNI DETALJ U RASPONU	UOCENI NEDOSTACI U RASPONU	Ocjena	HITNOSTI INTERVENCIJE
1	DV 400 kV HE Višegrad - TS Višegrad	7	8	232,61 m	Prelazak trase.	Šni mreža 10 kV	Nema		Intervencija nije potrebna.
2	DV 400 kV HE Višegrad - TS Višegrad	12	13	584,70 m	Prelazak trase.	Makadamski put i NN mreža.	Nema		Intervencija nije potrebna.
3	DV 400 kV HE Višegrad - TS Višegrad	13	14	420,37 m	Prelazak trase.	Asfaltni put, NN mreža, javna rasvjeta, objekti	Nema		Intervencija nije potrebna.
4	DV 400 kV HE Višegrad - TS Višegrad	14	15	294,31 m	Prelazak trase.	DV 110 kV, Šni mreža 35 kV, objekti.	Nema		Intervencija nije potrebna.
5	DV 400 kV HE Višegrad - TS Višegrad	11	12	212,72 m	Prelazak trase.	Makadamski put i NN mreža	Nema		Intervencija nije potrebna.
6	DV 400 kV HE Višegrad - TS Višegrad	4	5	279,67 m	Približavanje trasi	Šuma i rastinje.	Nekontrolisan rast drveća i rastinja.		Hitno potrebna intervencija.

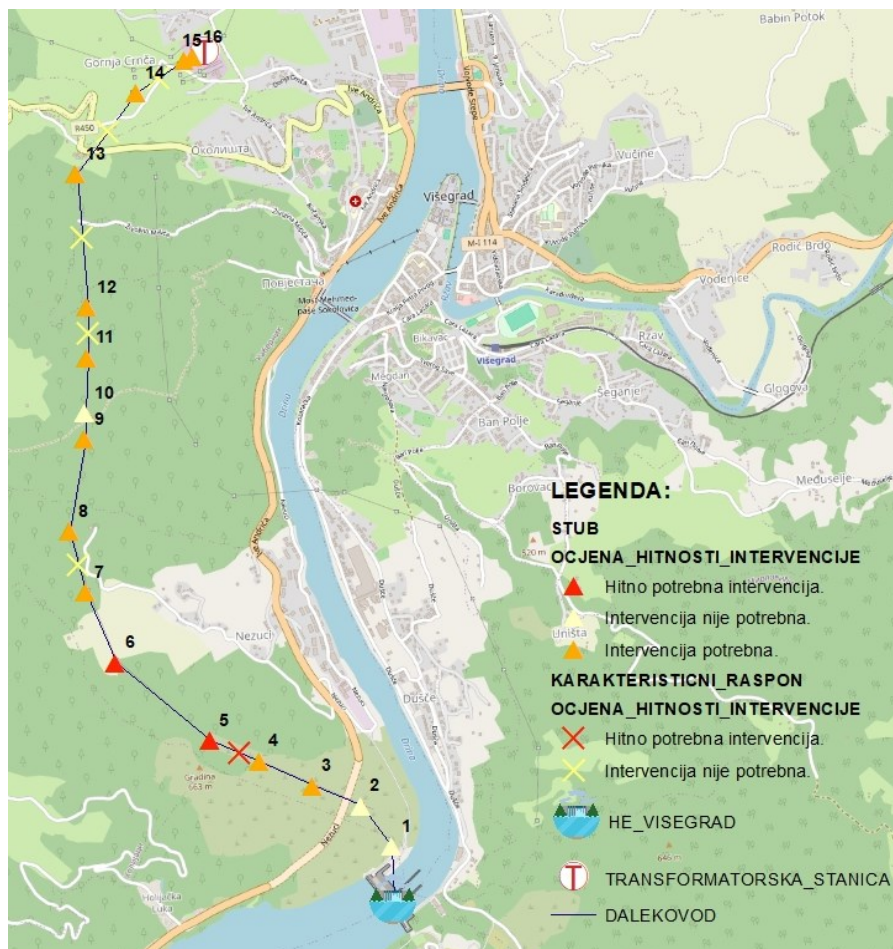
Slika 6. Dio atributne liste DV 400 kV HE Višegrad - TS Višegrad za klasu KARAKTERISTIČNI RASPON

Kreirana atributna lista se može mjenjati u skladu sa korisničkim potrebama jer se podaci unutar atributnih listi mogu podijeliti na trajne (nepromjenljive) i varijabilne. Trajni podaci su



tehnički i opšti podaci čije izmjene u bazi podataka nisu predviđene dok su varijabilni predviđeni za izmjenu nakon svakog pregleda.

Atributi dodijeljeni klasama brojniji su i opširniji nego što su prikazani u prethodnim tabelama zbog tehničkih ograničenja u radu. Služe za analizu pogonskog stanja DV-a koje se utvrđuje nakon svakog redovnog godišnjeg pregleda. Kao najvažnija sredstva pri analizi pogonske spremnosti DV-a uzima se: usklađenost sa pravnim aktima koji uređuju sektor elektroenergetike i sa internim propisima javnog preduzeća (JP) Elektroprenos BiH a.d. Banja Luka, uvid u evidencije o radu, vizuelni pregled i rezultati fotografskih i termovizijskih snimanja. Primjenom svega navedenog kao zaključak izvodi se ocjena hitnosti intervencije što je detaljnije opisano u radu [2] i kartografski prikazano na slici 7.

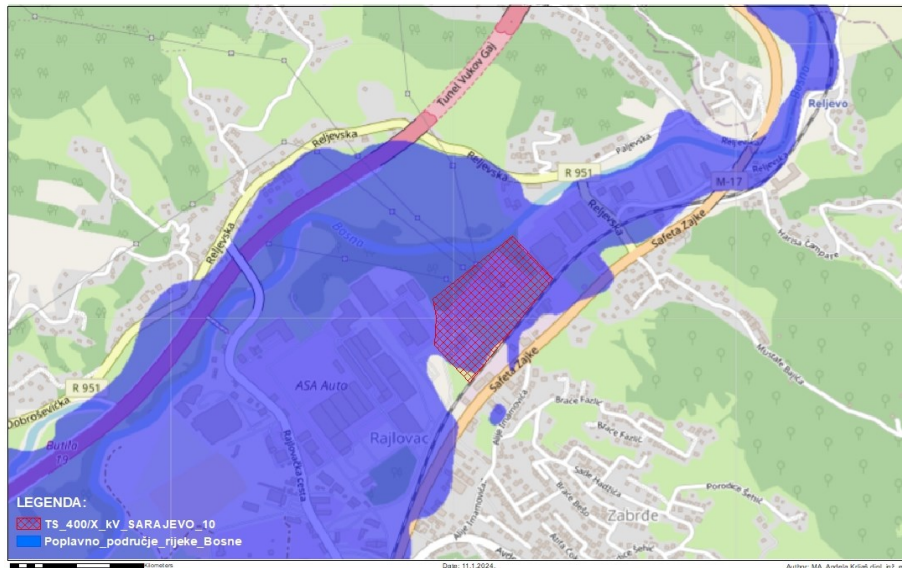


Slika 7. Ocjena hitnosti intervencije na osnovu GIS baze podataka

GIS tehnologija pomaže da se identifikuju prirodni rizici kartiranjem poplavnog područja rijeka i jezera, seizmički aktivnih zona, geološke građe terena i morfoloških svojstava koji predodređuju procese klizanja tla, zatim događaja kakvi su požari, razorne oluje, visoki snjegovi itd. Prirodnim rizicima se u razvijenijim zemljama odavno upravlja primjenom tehnologija koje omogućavaju modelovanje terena. Na slici 8 mapirano je poplavno područje rijeke Bosne koje obuhvata prostor TS 400/X kV Sarajevo 10.

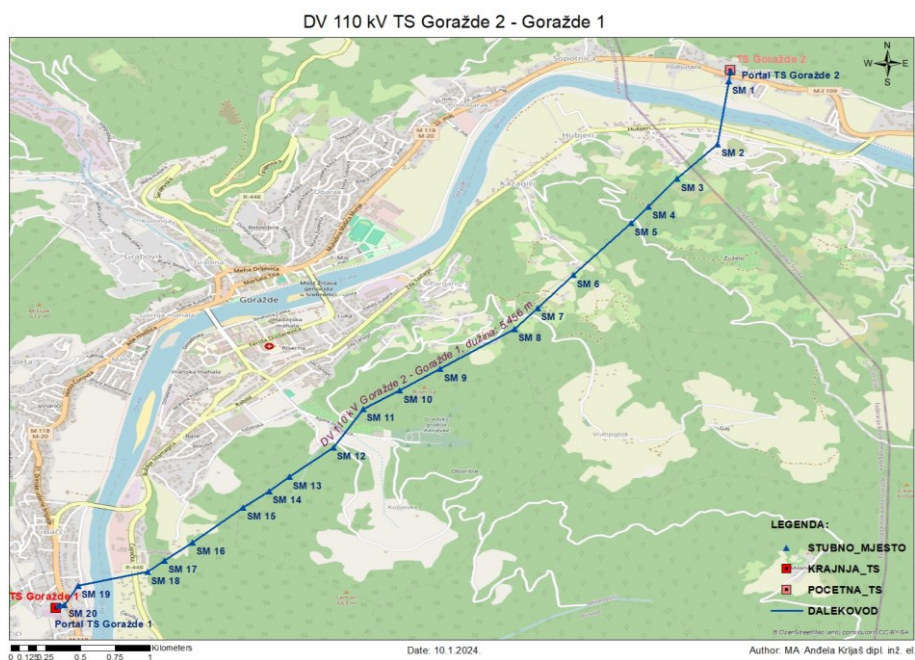
Upravo plavljenje ove TS-e prouzrokovalo je djelimičan raspad EES-a BiH 2021. godine i prekid napajanja velikog broja potrošača. Mapiranje i upravljanje prirodnim rizicima se mora raditi preventivno i, u zavisnosti od vjerovatnoće da se neki hazard dogodi i posljedica koje mogu nastati, raditi predikciju prirodnih rizika u budućnosti umjesto da samo čekamo da se

oni dogode. Poligon koji na karti predstavlja prostor TS 400/X kV Sarajevo 10 je vektorski podatak, koji u sebi ima atributnu listu sa podacima poput naziva, godine izgradnje, tehničkim podaci o TF-ima, broj i naziv DV-a i odvoda srednjeg napona, jednopolne šeme, pogonsko uputstvo i izvještaje o radu i pogonskim događajima.



Slika 8. Mapa prirodnih rizika preklapljen sa elektroenergetskim sadržajem

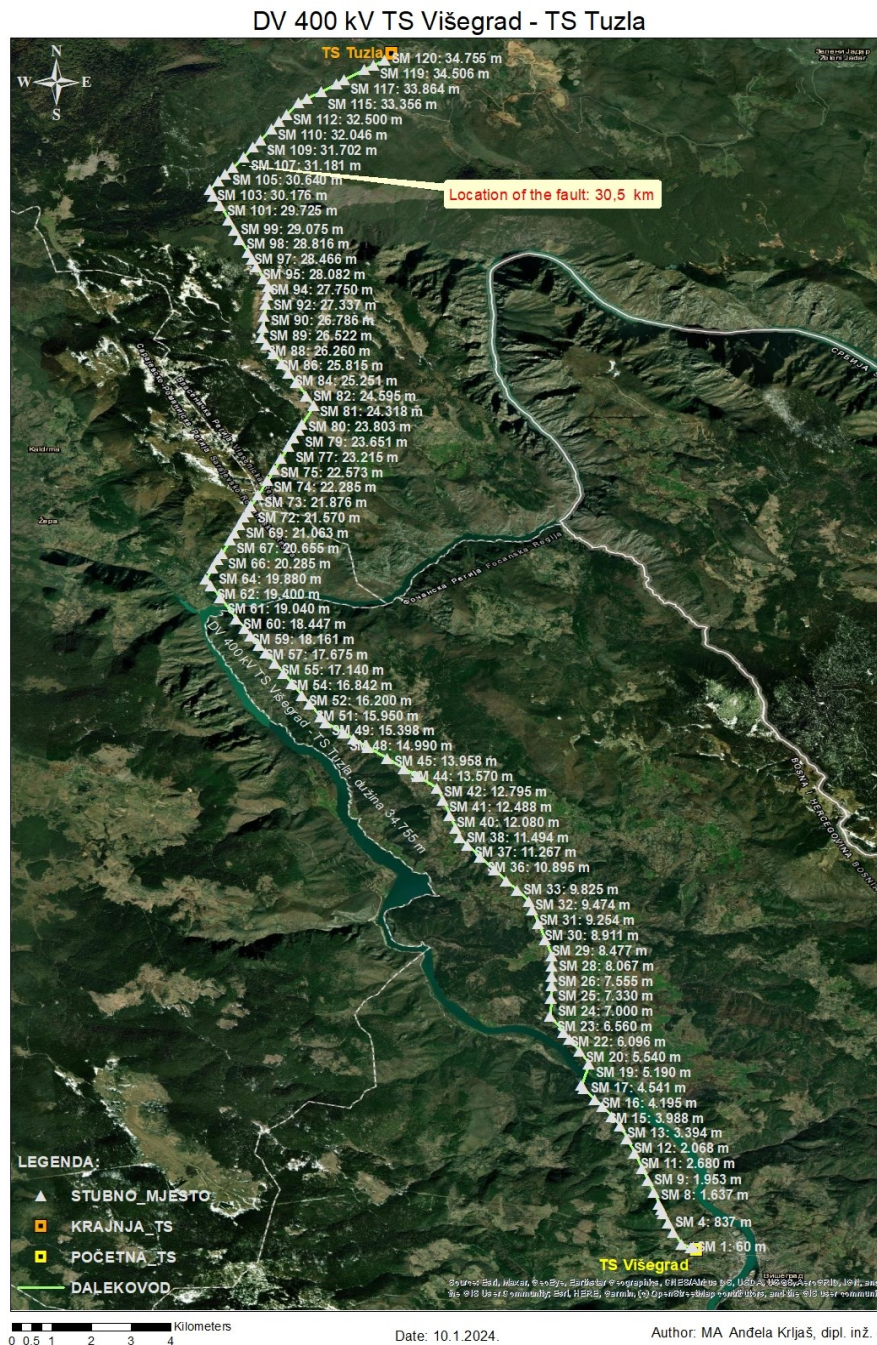
Doprinos inteligentnih karata je i u uočavanju povezanosti saobraćajne i elektroenergetske infrastrukture (slika 9) što je ključni faktor za održavanje, ali i preduzimanje konkretnih mjera u slučaju da se određeni rizik pojavi. Npr. u slučaju nezgode na radu ili pojave požara na trasi DV-a služi za procjenu vremena dolaska Vatrogasne jedinice od momenta prijema dojave požara ili vrijeme potrebno da se radnici evakušu na sigurno ili zbrinu u najbližoj Službi hitne pomoći.



Slika 9. Saobraćajna i elektroenergetska infrastruktura



Prilikom ispada DV-a, lokatori kvara u TS-ma daju informaciju o udaljenosti mjesta kvara od TS-e, ali primjenom georeferenciranih podataka (slika 10) koji jasno opisuju geografski položaj DV-a u odnosu na rijeke, puteve, naselja, šumske predjele dobijamo informaciju o prostornom profilu mjesta kvara (konkretnom rasponu, stubnom mjestu, objektima u blizini itd.) što daje osnovu za pretpostavku o potencijalnom uzroku kvara te omogućuje brže vrijeme reagovanja i otklanjanja nedostataka [2]. U praksi se dešava da je kvar lociran u blizini međudržavne ili entitetske granice i da ponekad postoji neslaganje oko toga ko treba izaći na teren i u čijoj nadležnosti je otklanjanje kvara. Primjenom GIS-a ta se pitanja brzo prevazilaze.



Slika 10. Međuentitetski DV sa udaljenostima stubnih mjesta od početne TS-e i mjestom kvara

Svrha sprovedenog procesa prikupljanja i digitalizacije podataka o EEO jeste da se unaprijede poslovi održavanja. Za kvalitet održavanja nesumnjivo najvažniju ulogu imaju redovni periodični pregledi i ispitivanja. Redovnim ispitivanjima pronalaze se oštećenja koja nisu vidljiva okom, dok je svrha vizuelnih pregleda da se uoče vidljiva oštećenja. Pregled se može vršiti jednostavnim obilaskom duž trase, ali se za otkrivanje težih oštećenja mogu upotrijebiti specijalne letjelice. U razvijenim zemljama često se koriste helikopteri, ali su u posljednje vrijeme bespilotne letjelice sve popularnije i kada je u pitanju pregled trase DV-a. Bespilotna letjelica (*Unmanned Aerial Vehicle – UAV*) ili popularno *dron* je letjelica bez posade koja se može kontrolisati daljinski ili kretati samostalno upotrebom unaprijed programiranog plana leta. Da bi bespilotne letjelice našle svoju primjenu u održavanju EEO u BiH neophodna su početna ulaganja u opremu i obuku potencijalnih dron operatera, ali i dobijanje posebnih dozvola za korištenje drona te dobijanje saglasnosti za snimanje u zavisnosti od lokacije za izvođenja operacije dronom od strane Direkcije za civilno zrakoplovstvo Bosne i Hercegovine (BHDCA).

Bespilotne letjelice osim što se mogu koristiti pri redovnim pregledima EEO, korisne su kod interventnih pregleda. Nakon što se desi kvar i lokatori kvara daju informaciju o udaljenosti mjesta kvara od TS-e, pomoću *GIS*-a se odredi fizički položaj (x, y koordinate) mjesta kvara na trasi DV-a. Koristeći se tim podatkom, bespilotna letjelica se automatski pozicionira te interpolira sliku sa mjesta događaja mnogo brže nego što bi to ekipa zadužena za otklanjanje kvara uradila. Ovdje nije bitna slika ili lokacija mjesta kvara, već informacija šta je dovelo do prekida napajanja, koliki je obim nastale štete, koja oprema za rad je potrebna, broj ljudi i sl. Takođe, termovizijske bespilotne letjelice omogućavaju, u nedostatku svjetla ili u drugim otežavajućim uslovima, identifikaciju termalnih anomalija, što ih čini idealnim i jeftinim rješenjem za potrebe održavanja EEO.

U BiH su veoma brojni sudski sporovi po pitanju štete učinjene u šumama državnog, a posebno privatnog vlasništva od strane elektroprivrednih kompanija zaduženih za poslove održavanja. Sljedeći korak jeste da se postojeće karte preklope *.dwg* fajlovima sa katastarskim česticama koje ulaze u trase DV-a i da se te parcele prevedu u vektorske podatke koji će u sebi sadržavati podatke o vlasništvu (javno ili privatno), ugovore o eksproprijaciji zemljišta, ako postoje, podatke i dokumenta o sudskim predmetima, odluke o naknadama za ekspropisano zemljište, rekapitulaciju nastale štete u novčanom iznosu, geodetske izvještaje te zakone koji tretiraju ovu problematiku. Cilj ovog koraka jeste da se na jednom mjestu objedine svi podaci vezani za postupak eksproprijacije zemljišta i da se spriječe eventualne manipulacije i zloupotrebe koje se često javljaju u praksi.

## **5 PREGLED POSTOJEĆE I PREDLOŽENE METODE ODRŽAVANJA ELEKTROPRENOSNE MREŽE**

Tradicionalna metoda održavanja elektroprenosne mreže uglavnom se zasniva na preventivnom i interventnom održavanju. Komponente mreže se preventivno održavaju u određenim vremenskim intervalima, bez obzira na njihovo stvarno stanje. Ovaj pristup je zasnovan na predviđenom životnom vijeku opreme. Interventno održavanje odnosi se na aktivnosti koje se sprovode kada dođe do neočekivanog kvara ili problema u elektroprenosnoj mreži i može biti pokazatelj lošeg planiranja preventivnog održavanja.

U tradicionalnom modelu, baze podataka često su bile fizičke, zasnovane na skladištenju papira, pisanih izvještaja, crteža, slika i drugih dokumenata u štampanoj ili elektronskoj formi. Ovaj pristup je bio dominantan prije razvoja digitalnih sistema, ali ga mnoge

elektroprenosne kompanije i dalje koriste. Tradicionalni pristup nosi sa sobom brojne rizike, neki od njih su:

- ograničena dostupnost i spora pretraga podataka posebno kada je potrebno brzo pronaći informacije tokom hitnih intervencija i/ili kada je dokumentacija obimna ili neorganizovana,
- mogućnost gubitka ili oštećenja podataka jer su fizički dokumenti podložni gubitku, oštećenju ili čak potpunom uništenju i često izloženi neadekvatnom arhiviranju,
- ažuriranje podataka nije automatsko, što znači da se može desiti da dokumentacija ne bude u skladu sa trenutnim stanjem opreme ili mreže,
- papirni sistem otežava efikasno dijeljenje podataka između timova i sektora, a zaposleni često moraju fizički prenijeti dokumentaciju, što usporava procese,
- tradicionalni pristup ne omogućava lako praćenje podataka o performansama opreme, istoriji kvarova i trendovima u održavanju, što otežava donošenje odluka,
- veliki dio informacija o mreži oslanja se na znanje i iskustvo pojedinih radnika, posebno starijih, a kada ti radnici napuste firmu, znanje može biti izgubljeno, a nove generacije radnika mogu imati poteškoće u radu bez adekvatne dokumentacije,
- u slučaju vanrednih situacija ili hitnih intervencija, brzo pristupanje relevantnim podacima je presudno za brzu reakciju, u suprotnom vrijeme zastoja mreže se povećava itd.

S obzirom na ove rizike, prelazak na digitalne sisteme za upravljanje podacima i održavanjem postaje sve važniji u modernim elektroprenosnim mrežama, jer omogućava efikasniji rad, bolju analizu i minimizaciju negativnih efekata tradicionalnog pristupa.

Iako *GIS* tehnologija nije novost, u elektroenergetici se vrlo malo koristi. Za razliku od mnogih električnih veličina koje inženjeri prate i analiziraju, elektroenergetsku infrastrukturu čine objekti za koje je realnost prostor i za koje je lokacija relevantna pa se upotreba geoinformacionih tehnologija nameće kao logičan korak u radu jer omogućava objedinjavanje prostornih, električnih i tehničkih podataka, kako u pogledu topologije tako i u pogledu karakteristika i eksploatacionih uslova, u jedinstvenu bazu podataka smještenu na inteligentnoj zemljišnoj karti. Počevši od proizvodnje električne energije (primarni resursi su negdje u prostoru) preko prenosa električne energije (DV-i, TS-e i ostala postrojenja su takođe u prostoru) pa do distribucije svakom pojedinačnom kupcu (svaki kupac je na svojoj adresi), kroz cijeli sistem oslanjamo se na prostorno orijentisane podatke koji su u uzročno posljedičnoj vezi sa tehničkim podacima i električnim veličinama koje se monitorišu. Lako je zaključiti da je u elektroenergetskom sektoru primjena *GIS* tehnologije neophodna. Osnovne prednosti u odnosu na tradicionalne pristupe u radu u elektroenergetici su [1-3]:

- Optimalna i efikasna organizacija podataka: standardizacija podataka, obezbjeđenje integriteta podataka, višekorisnički pristup podacima, primjena *client-server* arhitekture, brzina pretraživanja i analize podataka itd;
- Mogućnost povezivanja sa drugim bazama podataka (povezujući tehnologiju *GIS*-a sa *SCADA* (*Supervisory Control And Data Acquisition*) sistemom dobija se sistem sposoban za automatizovano prikupljanje i analizu prostornih podataka i električnih veličina na jednom mjestu);
- Stalni uvid u sve raspoložive resurse, kako ljudske tako i materijalne: oprema, objekti, ekipe na terenu, potrošači, istorija pogonskih događaja itd;
- Vizuelizacija podataka se proširuje uvođenjem koncepta geografskih baza podataka, postiže se veća mogućnost prilagođavanja promjenama cilja i korisničkim

zahtjevima, veća kreativnost za krajnje korisnike na relaciji podaci i konačni izlazi (karte, slika, tekst, zvuk, boja itd);

- Karte sa elektroenergetskim sadržajem (TS-e, DV-i, elektrane) preklopljene sa drugim slojevima koji jasnije opisuju njihov geografski položaj (rijeke, jezera, putevi, naselja, administrativne granice itd);
- Primjena *GIS*-a olakšava mapiranje regiona povoljnih za eksploataciju energije Sunca, vjetra i drugih obnovljivih izvora energije (OIE);
- Kartografija, prostorni koncept i operativnost u vremenu i prostoru doprinose optimalnijem eksploataciji energetske resursa poput hidro potencijala, čvrstih goriva, vjetra ili Sunca. Svojom baziranošću na prostornim informacijama *GIS* pomaže očuvanju životne sredine te je ključ efikasnije brige o životnoj okolini;
- *GIS* pomaže u uočavanju povezanosti saobraćajne i elektroenergetske infrastrukture što je ključni faktor za projektovanje i održavanje;
- *GIS* može biti koristan da pobliže opiše i kreira model mreže instalacija i integriše druge tipove podataka kakvi su rasteri ili *CAD* crteži. Pomoću *GIS*-a na jednoj karti moguće je prikazati ogromnu količinu podzemnih instalacija, analizu urbanističkih planova, raspored kuća, kontrolu korištenja zemljišta, zoniranje, lokacije objekata itd. Takve karte su važan vodič za planiranje i izvođenje građevinskih radova pri izgradnji novih EEO ili obnovi postojećih;
- Koristeći *GIS* i podatke iz prenosnog ili distributivnog sistema koji se osvježavaju u realnom vremenu, inženjeri su u prilici da analiziraju performanse elektroenergetske mreže. Cijeli sistem može biti modelovan i predstavljen u digitalnom obliku što omogućava njegovu procjenu sa stanovišta pouzdanosti, energetske gubitaka, kapaciteta ili bilo kojeg drugog kriterijuma.

Primjene i prednosti upotrebe *GIS*-a su mnogostruke. Uzevši u obzir prethodno pobrojane mogućnosti jasno je da se višestruke koristi mogu ostvariti i u gasnoj industriji, mobilnim komunikacijama, a posebno pri integraciji pametnih mreža (*smart grid*) i sl.

## 6 ZAKLJUČAK

U cilju podizanja kvaliteta održavanja EEO-a, unapređenja poslova i boljeg i efikasnijeg sistema donošenja odluka sproveden je *GIS* projekat. Urađena je digitalna transformacija postojećih podataka poput: tehničke baze podataka o EEO, glavnih projekata DV-a i TS-a, katastarskih i geodetskih podataka, snimaka fotografskom i termovizijskom kamerom, evidencija o radu i pogonskim događajima, izvještaja o redovnim i vanrednim pregledima EEO-a itd. Uspostavljena je georeferencirana baza podataka i jedinstven model inteligentnih karata za sve objekte u nadležnosti te obezbjeđen moćan interfejs za višestruko razumijevanje problematike održavanja EEO-a. Kreiranim inteligentnim kartama se lako pristupa, podacima se može jednostavno manipulirati u skladu sa korisničkim potrebama, a kreirani izvještaji i karte su vrlo čitljivi i jednostavni za analizu.

Važno je naglasiti da vrijednost *GIS* projekta nisu same inteligentne karte, one su posrednik kojim se dolazi do jednog integrisanog sistema održavanja koji uspješno povezuje maksimum svih raspoloživih resursa: ljudi, znanja, opreme, finansija i informacija te predstavljaju dobar osnov za ekonomično i efikasno analiziranje performansi elektroenergetske mreže.

Na osnovu prethodno izloženog može se zaključiti da je upotreba *GIS* tehnologije u elektroenergetskom sektoru ne samo potrebna već i neophodna. Najbolji rezultati postigli bi se objedinjavanjem *GIS*-a sa sistemima za daljinsko praćenje i kontrolu kako bi se pružile

korisne informacije korisnicima s obzirom na potrebu za informacijama u realnom vremenu. To bi mogao biti neki od *CTR - SCADA (Close-to-realttime Supervisory Control And Data Acquisition)* sistema, bez mogućnosti upravljanja, s obzirom na to da je ovdje naglasak stavljen na održavanje. *GIS* sistemi ne mogu zamijeniti ni jedan od postojećih sofisticiranih sistema koji se već koriste u elektroenergetskom sektoru, ali kao dodatak i/ili integrisani sa njima mogu značajno poboljšati njihove mogućnosti. Da bi se ovo postiglo temeljni preduslov su školovani stručni ljudi, motivisani da ovladaju potrebnim vještinama i znanjima, razumijevanje od strane nadređenih te kvalitetna i pouzdana oprema koja bi im to omogućila.

#### LITERATURA:

- [1] V. Jovanović, B. Đurđev, Z. Srdić, U. Stankov: “Geografski informacioni sistemi,” Univerzitet Singidunum, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2012.
- [2] A. Krljaš, M. Antić: “Aplikacija sistema za georeferenciranje prostornih podataka u aktivnosti održavanja dalekovoda”, Savetovanje Energetika Zlatibor, 2022.
- [3] Primjena GIS-a, <http://www.gis.ba/primjena-gis-a/> [10.12.2023].
- [4] M. Kukrika: “Geografski informacioni sistemi”, Univerzitet u Beogradu, Geografski fakultet, Beograd, 2000.
- [5] A. Nagaraja Sekhar, K. S. Rajan, Amit Jain: “Application of Geographical Information System and Spatial Informatics to Electric Power Systems”, Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay, December 2008.
- [6] <https://www.engineersgarage.com/> [10.12.2023]

## MANAGEMENT OF THE MAINTENANCE OF THE ELECTRIC TRANSMISSION NETWORK USING INTELLIGENT LAND MAPS

ANDELA KRLJAŠ<sup>\*1</sup>, MAJA ANTIĆ<sup>2</sup>, TIJANA MILOVANOVIĆ<sup>1</sup>,  
HRISTINA ŠARAC<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CENTAR ZA KOORDINACIJU SIGURNOSTI SCC D. O. O. BEOGRAD

<sup>2</sup>ELEKTROPRENOS BIH A. D. BANJA LUKA

<sup>3</sup>NEZAVISNI OPERATOR SISTEMA BIH, SARAJEVO

BELGRADE, SARAJEVO

SERBIA, BOSNIA AND HERZEGOVINA

*Abstract* — In this paper, an innovative method of managing the maintenance of the electric transmission network based on the application of intelligent land maps is proposed, contrary to the existing traditional approaches to maintenance. The process of creating intelligent land maps, the method of collection, processing, analysis and display of digital data of interest for the maintenance of the power transmission network is described. The relevant aspects of the application of the geographic information system (GIS) for the integration of geography with other relevant data such as technical data, compliance with regulations and technical recommendations, insight into work records, visual inspection and the results of photographic and thermal imaging were reviewed. Based on the available data, the method of assessing the urgency of the intervention on individual elements is described, as well as the prediction of potential weak points. A part of the electrical transmission system of Bosnia and Herzegovina (BiH) was selected



**for the analysis of the application of GIS, and a unique database of attribute, spatial, technical and topological data on transmission lines (TL), power plants and transformer stations (TS) was formed in order to obtain a system fully capable for the analysis of operational readiness of power facilities.**

***Key words* - intelligent maps, GIS, transmission line mapping, data digitization, maintenance**



**UPRAVLJANJE ODRŽAVANJEM ELEKTROPRENOSNE MREŽE PRIMJENOM  
INTELIGENTNIH ZEMLJIŠNIH KARATA**

**THE MAINTENANCE OF THE ELECTRIC TRANSMISSION NETWORK USING  
INTELLIGENT LAND MAPS**

**ANDELA KRLJAŠ\*<sup>1</sup>, MAJA ANTIĆ<sup>2</sup>, TIJANA MILOVANOVIĆ<sup>1</sup>,  
HRISTINA ŠARAC<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>CENTAR ZA KOORDINACIJU SIGURNOSTI SCC D. O. O. BEOGRAD**

**<sup>2</sup>ELEKTROPRENOS BIH A. D. BANJA LUKA**

**<sup>3</sup>NEZAVISNI OPERATOR SISTEMA BIH, SARAJEVO**

**BEOGRAD, SARAJEVO**

**SRBIJA, BOSNA I HERCEGOVINA**

*Kratak sadržaj* - U ovom radu je predložena inovativna metoda upravljanja održavanjem elektroprenosne mreže zasnovana na primjeni inteligentnih zemljišnih karata, suprotno postojećim tradicionalnim pristupima održavanju. Opisan je postupak kreiranja inteligentnih zemljišnih karata, način prikupljanja, obrade, analize i prikaza digitalnih podataka od interesa za održavanje elektroprenosne mreže. Sagledani su relevantni aspekti primjene geografskog informacionog sistema (*GIS*) za integraciju geografije sa drugim relevantnim podacima poput tehničkih podataka, usklađenosti sa propisima i tehničkim preporukama, uvida u evidencije o radu, vizuelnog pregleda i rezultata fotografskih i termovizijskih snimanja. Na osnovu raspoloživih podataka opisan je način na koji se vrši procjena hitnosti intervencije na pojedinim elementima kao i predikcija potencijalnih slabih tačaka. Za analizu primjene *GIS*-a izabran je dio elektroprenosnog sistema Bosne i Hercegovine (BiH) te je formirana jedinstvena baza atributnih, prostornih, tehničkih i topoloških podataka o dalekovodima, elektranama i transformatorskim stanicama kako bi se dobio sistem potpuno sposoban za analizu pogonske spremnosti elektroenergetskih objekata.

U radu su opisani rizici i nedostaci koje sa sobom nosi tradicionalni pristup održavanju. Prelazak na digitalne sisteme za upravljanje podacima i održavanjem postaje sve važniji u modernim elektroprenosnim mrežama, jer omogućava efikasniji rad, bolju analizu i minimizaciju negativnih efekata tradicionalnog pristupa.

Uspostavljanjem georeferencirane baze podataka i jedinstvenog modela inteligentne karte obezbjeđen je moćan interfejs za višestruko razumijevanje problematike održavanja EEO-a. Kreiranim inteligentnim kartama se lako pristupa, podacima se može jednostavno manipulirati u skladu sa korisničkim potrebama, a kreirani izvještaji i karte su vrlo čitljivi i jednostavni za analizu. Inteligentne karte su posrednik kojim se dolazi do integrisanog sistema održavanja koji uspješno povezuje maksimum svih raspoloživih resursa: ljudi, znanja, opreme, finansija i informacija te predstavljaju dobar osnov za ekonomično i efikasno analiziranje performansi elektroenergetske mreže.

*Ključne riječi* - inteligentne karte, GIS, mapiranje dalekovoda, digitalizacija podataka, održavanje



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.251DJ](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.251DJ)

C2 17

## **PRIMENA SOFTVERSKIH ALATA ZA UNAPREĐENJE ASSET MANAGEMENT SISTEMA U EES**

**BRANKO ĐORĐEVIĆ, MAJA ADAMOVIĆ, VLADIMIR M. ILIĆ, VLADIMIR ILIĆ,  
MIRKO BOROVIĆ  
AD ELEKTROMREŽA SRBIJE BEOGRAD**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* — Ovaj rad opisuje različite alate za upravljanje elektroenergetskom imovinom (Asset Management) u prenosnom sistemu, s posebnim osvrtom na primenu softverskih paketa baziranih na GIS (geografski informacioni sistem) podlogama. Efikasna primena Asset Management-a u prenosnom sistemu je ključna za održavanje pouzdanosti i stabilnosti električne mreže, smanjenje operativnih troškova i povećanje životnog veka infrastrukturnih elemenata.

Samim tim, neposredna primena konkretnog softvera kojima se vrši detekcija atmosferskih pražnjenja u blizini dalekovoda, ili softvera kojim se prikazuje raspodela temperature u kablovskim vodovima, ili pak softvera kojim se evidentira položaj nelegalno izgrađenih objekata koji ugrožavaju pouzdan rad dalekovoda, svaka na svoj način ubrzava vreme pronalaženja kvara odnosno smanjuje vreme ispada elementa odnosno verovatnoću mogućeg neželjenog događaja u eksploataciji objekata smanjuje na minimum i može se koristiti za analizu stanja ili procenu ugroženosti odnosno pouzdanosti sistema.

U radu su predstavljeni rezultati implementacije ovih tehnologija na stvarnim primerima iz prakse. Analizirani su njihovi efekti na efikasnost Asset Management-a, kao i potencijalni izazovi i buduće mogućnosti razvoja. Zaključci prikazuju značaj integracije ovih alata u standardne procedure upravljanja EES, kao i na potrebu za kontinuiranim unapređenjem softverskih rešenja kako bi išli u korak sa sve kompleksnijim pristupima Asset Management-a modernih elektroenergetskih mreža.

*Ključne reči* — upravljanje imovinom, elektroenergetski sistem, detekcija atmosferskih pražnjenja, GIS, temperaturna raspodela, kablovski vodovi.

## 1 UVOD

Upravljanje imovinom u elektroenergetskim sistemima (EES) postaje sve značajniji aspekt u održavanju pouzdanosti, stabilnosti i efikasnosti električnih mreža. Složenost infrastrukture i povećani zahtevi za energetsom sigurnošću i pouzdanosti rada prenosnog sistema uslovljavaju potrebu za naprednim alatima koji mogu poboljšati procese održavanja, eksploatacije i investicionog planiranja. Jedan od ključnih tehnoloških napredaka u ovoj oblasti je primena softverskih paketa baziranih na geografskim informacionim sistemima (GIS). Ovi alati omogućavaju integrisano upravljanje podacima, vizualizaciju, bržu analizu i optimizaciju svih aktivnosti u procesu održavanja i eksploatacije imovine u elektroenergetskim mrežama.

Tradicionalne metode održavanja elektroenergetske imovine oslanjaju su se na manualne procese i upotrebu osnovne dokumentacije, kao što su postojeća tehnička dokumentacija, mape i tehnički izveštaji. Ovi pristupi omogućavaju osnovno praćenje i održavanje infrastrukture, ali imaju značajna ograničenja kada je reč o obradi podataka i vizualizaciji informacija. Dokumentacija se najčešće čuva u fizičkom obliku ili u osnovnim digitalnim formatima poput tablica i tekstualnih datoteka. Analiza ovih podataka može biti komplikovana i vremenski zahtevna, što za posledicu utiče na vreme obrade i donošenje odluka, a samim tim može dovesti i do neadekvatnog planiranja.

Jedan od ključnih problema ovih tradicionalnih metoda je nemogućnost efektivne integracije i analize velikih količina podataka. U elektroenergetskim sistemima, gde su podaci često raznoliki i dolaze iz različitih izvora (npr. tehnički izveštaji sa pregleda, inspeksijski zapisi, izveštaji iz dispečerskih dnevnika i slično), nedostatak adekvatne obrade podataka može dovesti do nepovezanih i nesistematičnih informacija.

Sa adekvatnim alatima za vizualizaciju informacija i centralizaciju istih, i inženjeri i menadžeri dobijaju sveobuhvatan pregled stanja elektroenergetske imovine i jasniju sliku o stanju pojedinačnih elektroenergetskih elemenata. To znači da se odluke baziraju na preciznim i sveobuhvatnim podacima.

## 2 ULOGA GIS TEHNOLOGIJE U UPRAVLJANJU IMOVINOM

Jedna od najvažnijih funkcionalnosti GIS-a je geolokacija, odnosno mogućnost preciznog određivanja pozicije različitih infrastrukturnih elemenata na geografskoj karti. U prenosnom sistemu, gde je imovina često rasprostranjena na velikim geografskim područjima, geolokacija omogućava da se tačno lociraju pozicije elektroenergetskih elemenata.

Dodatna funkcionalnost koja se pruža krajnjim korisnicima jeste mogućnost da analiziraju kako različiti prostorni faktori, kao što su klimatski uslovi i reljef terena, utiču na performanse prenosnog sistema. Moguće je otkriti da se određeni tip kvarova češće javlja u specifičnim klimatskim ili geografskim uslovima ili pri određenim uslovima na jednom tipu opreme, što omogućava unapred planiranje dodatnih mera.

U kombinaciji sa sistemima za monitoring i primenom umreženih senzora putem tehnologije interneta stvari (Internet of Things, IoT) pružaju se dodatne mogućnosti praćenja u realnom vremenu, preciznije stanje u uvid opreme i mogućnost donošenja brzih odluka u sprečavanju incidenata.

Vizualizacija podataka u GIS-u takođe omogućava bolju komunikaciju između različitih timova i nivoa upravljanja unutar organizacije. Optimizacija ljudskih resursa, integracija sa drugim sistemima radi centralizacije podataka iz različitih izvora, a u cilju jednostavnije analize i bržeg donošenja odluka je nešto što karakteriše primenu softverskih alata baziranih na primeni geografskog informacionog sistema.

### 3 SOFTVERSKI ALATI U PRIMENI

Nesporno je da implementacija GIS alata donosi značajne prednosti u upravljanju imovinom, omogućavajući precizniju detekciju kvarova, utvrđivanje rizika po operativno osoblje i samu elektroenergetsku imovinu, kao i optimizaciju operativnih procesa. U ovom poglavlju biće opisani softveri koji imaju svakodnevnu primenu od strane stručnih službi u Akcionarskom društvu „Elektromreža Srbije” Beograd (u nastavku EMS AD), kao i benefiti istih.

#### 3.1 Softver za vizuelizaciju elektroenergetskih objekata i praćenje stanja telekomunikacione mreže

IPLAN je GIS aplikacija koja je rezultat projekta nadogradnje postojećeg INOVA GIS sistema za evidenciju i upravljanje telekomunikacionim kapacitetima. Osnovna namena aplikacije je vizuelizacija i prikaz na mapi postojećih objekata tj. dalekovoda, kablovskih vodova i VN postrojenja. Objekti se iscrtavaju na mapi automatski: stubovi i dalekovodi, kao i kablovski vodovi. Ostali objekti poput VN opreme se prikazuju na mapi ako im se pomoću odgovarajućih alata u aplikaciji dodele koordinate u prostoru. Podaci za konstruisanje onoga što čini fizičku elektroenergetsku infrastrukturu se preuzimaju iz tehničkog informacionog sistema tj. tehničke baze jednom u toku dana.

Informacije koje pruža ovaj softver se koriste za:

- vizuelizaciju postojeće i planirane elektroenergetske mreže,
- vizuelizaciju optičke telekomunikacione mreže,
- pokazivanje kritičnih mesta (mesta na kojima postoje slabljenja i prekidi na optičkoj telekomunikacionoj mreži),
- unos podataka o elektroenergetskim objektima i izmenu podataka u tehničkoj bazi,
- vizuelnu proveru ispravnosti unetih podataka u tehničku bazu,
- prikaz izveštaja održavanja elemenata elektroenergetskih objekata, isključenja i ispada,
- utvrđivanje katastarskih parcela koje se nalaze u zaštitnom pojasu visokonaponskog objekta,
- evidenciju nelegalnih objekata izgrađenih u zaštitnom pojasu dalekovoda,
- vizuelizaciju ispada usled događaja koje detektuje softver za lokalizaciju atmosferskog pražnjenja.

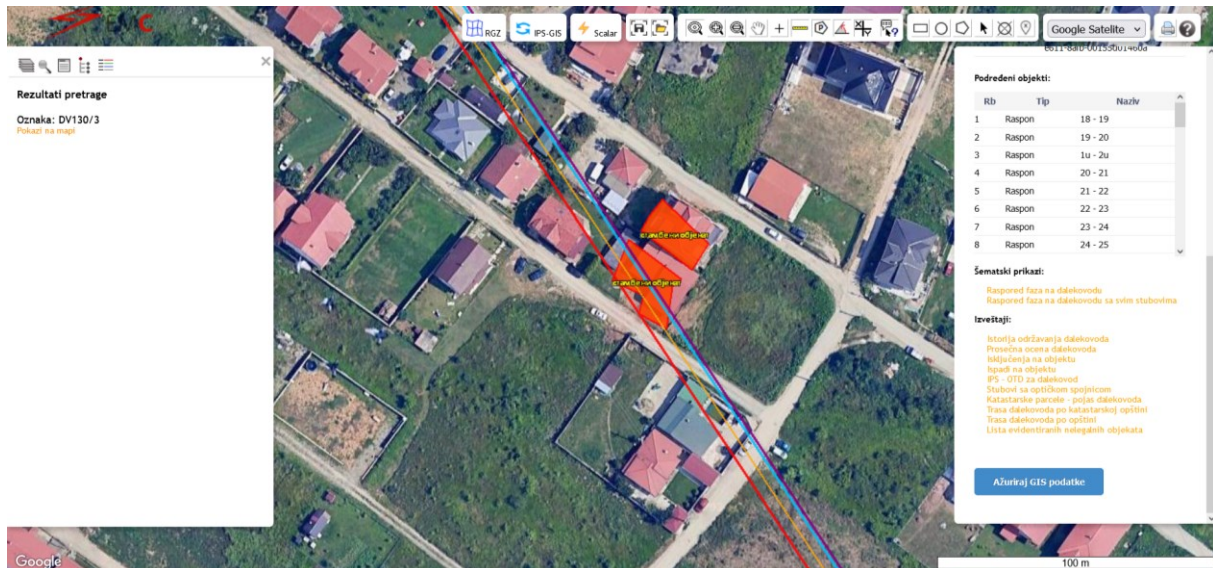
Implementacija ovakve aplikacije donela je nekoliko ključnih benefita za sistem upravljanja imovinom (Asset Management). Automatsko iscrtavanje objekata kao što su linijski objekti - dalekovodi na mapi omogućava bolji pregled i vizuelnu proveru ispravnosti unetih podataka, kao i unos i izmenu podataka, čime se poboljšava pouzdanost celog sistema. Ranije je situacija bila da podaci nisu bili ažurirani promptno, čak je nekad trebalo i vreme mereno mesecima jer se ljudi nisu pre svega oslanjali na takve alate u radu. Korišćenjem ovih softvera i praktičnom proverom koliko je olakšan sam način rada, svi su postepeno prešli isključivo na rad u softverima. Potpuno je jasno da je od suštinske važnosti za proces održavanja i planiranja, neophodno da se raspolaze pouzdanim podacima u realnom vremenu.

Dodatno, aplikacija pruža i podršku za pravne i administrativne procese u procesu izdavanja odgovora na zahteve za izgradnju novih ili ozakonjenje postojećih objekata, koji se nalaze u zaštitnim pojasevima dalekovoda i kablovskih vodova.

Konkretna aplikacija je integrisana sa više različitih sistema (dispečerskim dnevnicima, aplikacijom za detekciju i lokalizaciju grmljavinskih pražnjenja SCALAR, softver za monitoring optičke mreže - Optical Network Monitoring System – ONMSi, digitalnim katastrom i slično), čime je moguće jednostavno i brzo doći do podatka od interesa, značajno

je skraćeno vreme potrebno za ekspertske analize i donošenje odluka o merama za unapređenje rada nekog dalekovoda, sagledavanja rizika u eksploataciji i slično.

Na slici 1 je prikazan glavni ekran aplikacije. Sa leve strane se nalaze paneli sa legendom, pretragom i aset navigatorom pri čemu je već izvršen izbor konkretnog dalekovoda. Sa desne strane je panel sa karticom objekta. Na vrhu ekrana se nalazi paleta sa alatima za kretanje po mapi, dobijanje informacija o objektu, crtanje novih objekata itd.



Slika 1 Glavni ekran aplikacije INOVA GIS

### 3.2 Softver za lokalizaciju atmosferskog pražnjenja

SCALAR je softver koji se koristi za detekciju i lokalizaciju atmosferskog pražnjenja.

Informacije koje pruža ovaj sistem koriste se za sledeće aktivnosti:

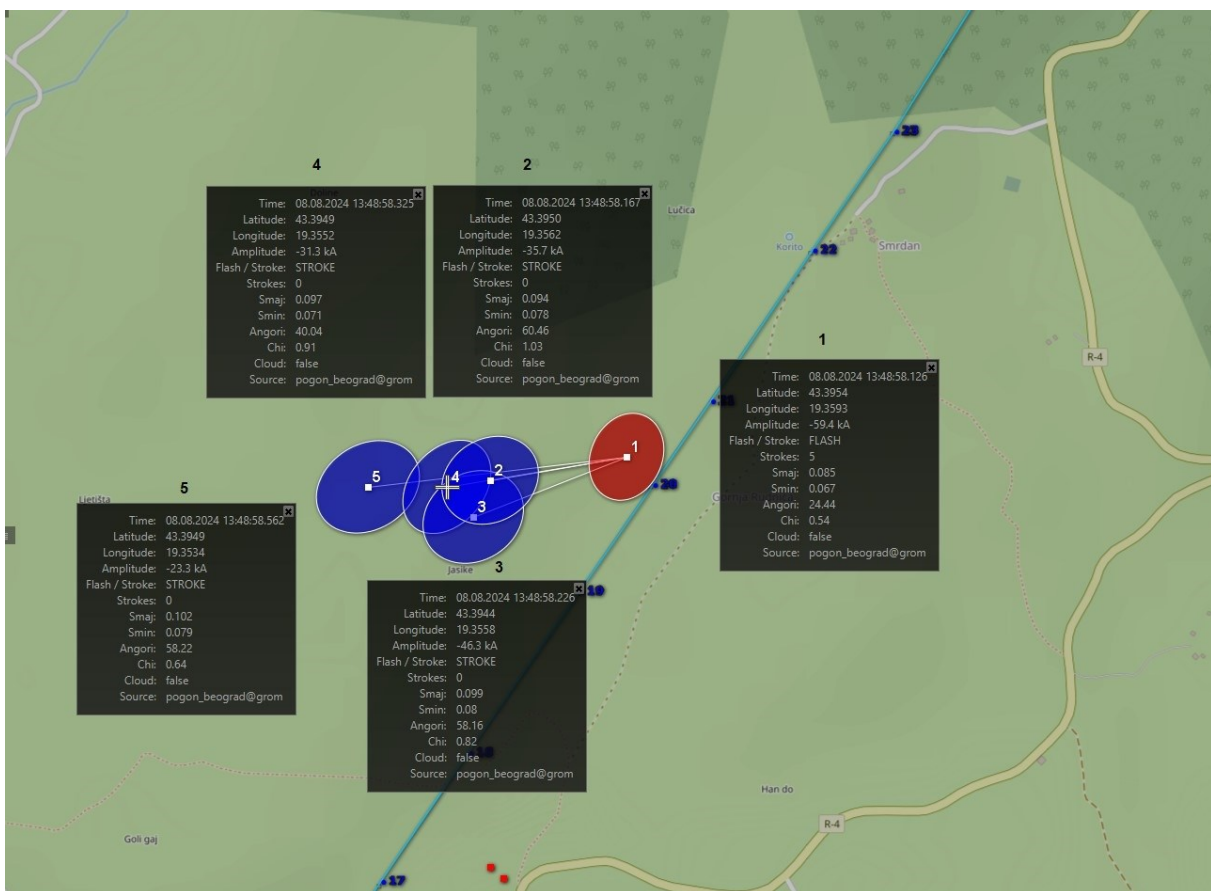
- Automatsko alarmiranje ekipa, koje obavljaju aktivnosti na održavanju dalekovoda i transformatorskih stanica, kao i centara upravljanja o pražnjenjima u alarm zoni elektroenergetskih objekata. Alarmna zona se definiše kao koridor duž trase dalekovoda širine 10 km, odnosno po 5 km sa svake strane dalekovoda i krug prečnika 5 km oko transformatorskih stanica.
- Detekciju atmosferskog pražnjenja u dalekovode i simultanu tj. real-time korelaciju ispada dalekovoda usled preskoka ili povratnih preskoka koji se javljaju u takvim situacijama. Najveći benefit je u pouzdanom utvrđivanju uzroka prolaznog ili trajnog ispada elektroenergetskog elementa i smanjenju potrebnog vremena za utvrđivanje mesta kvara. U situacijama kada dođe do trajnog ispada dalekovoda, jednostavnija je koordinacija ekipa zaduženih za održavanje na terenu, i smanjeno je vreme za koje se dalekovod vraća u stanje normalnog rada, a posebno u situacijama kada nije dostupna informacija o lokaciji kvara sa uređaja relejne zaštite ugrađenim u krajnjim transformatorskim stanicama.

Implementacija ovakvog sistema je značajna sa aspekta Asset Management-a jer se imaju i informacije o polaritetu, broju pražnjenja i amplitudama struja prilikom atmosferskog pražnjenja. Dodatno je moguće na osnovu istorijskih podataka svih zabeleženih udara gromova na teritoriji neke zemlje napraviti kartu gustine udara gromova koja se može koristiti kao ulazni podatak za projektovanje novih dalekovoda i utvrđivanje lokacija na kojima se mogu postaviti

odvodnici prenapona sa ciljem da se smanji broj prolaznih i trajnih ispada usled atmosferskog pražnjenja na postojećim dalekovodima.

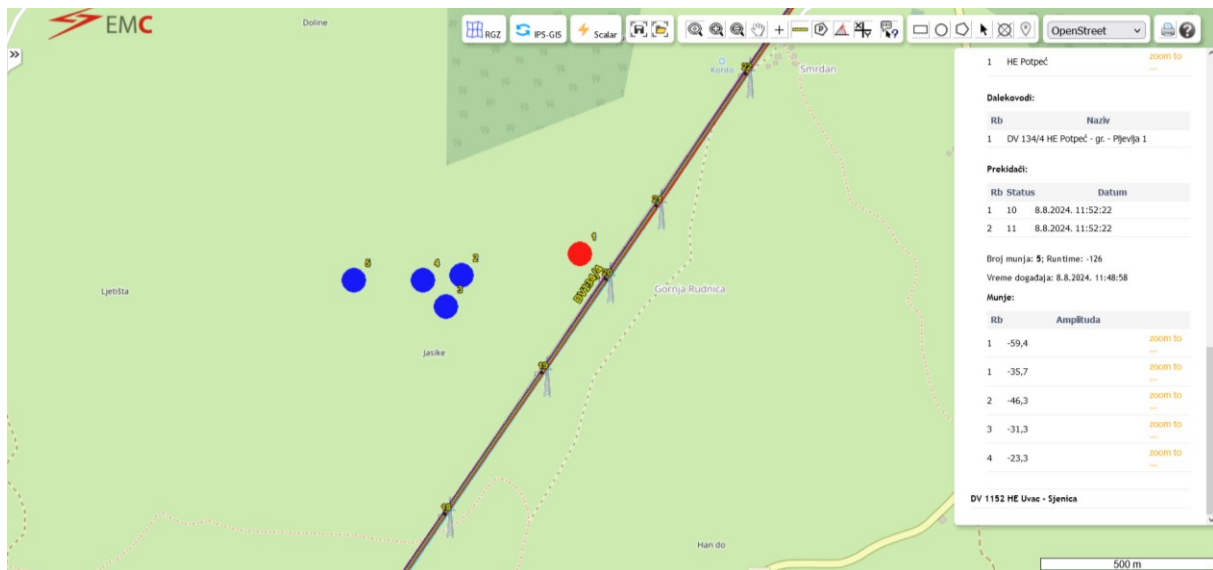
SCALAR zahteva integraciju sa SCADA sistemom radi pouzdane korelacije ispada dalekovoda i prorade prekidača. Dodatno ga je moguće povezati i sa GIS aplikacijama, kao što je već urađeno u EMS AD. Na ovaj način se postiže da se informacije, zabeležene u specijalizovanom softveru, koriste i u drugom alatu sa mogućnošću vizuelizacije i prikazom različitih podataka od interesa, kao i da se prave korelacije ili vrše dodatne analize, a sve u cilju optimizacije resursa.

Prikaz atmosferskog pražnjenja u dalekovod naponskog nivoa 110 kV koji je izazvao ispad dalekovoda je dat na slici 2. Na slici 3 je dat prikaz istog događaja, ali u GIS aplikaciji. Mogućnost integracije informacija iz različitih sistema i centralizacija podataka na jednom mestu pruža mnogo mogućnosti, ali prvenstveno štedi i optimizuje vreme koje je potrebno za prikupljanje podataka u cilju analize nekih događaja i donošenja odluka.



Slika 2 Registrovan događaj atmosferskog pražnjenja





**Slika 3** Prikaz u GIS aplikaciji podataka koji su zabeleženi SCALAR sistemom

### 3.3 Softver za vizuelizaciju temperature duž trase kablovskog voda

SmartVision je softver koji se koristi za vizuelizaciju podataka koji se prikupljaju sistemima za distribuirano merenje temperature (DTS) i distribuirano akustično merenje (DAS) na kablovskim vodovima.

Informacije koje pruža ovaj softver se koriste za:

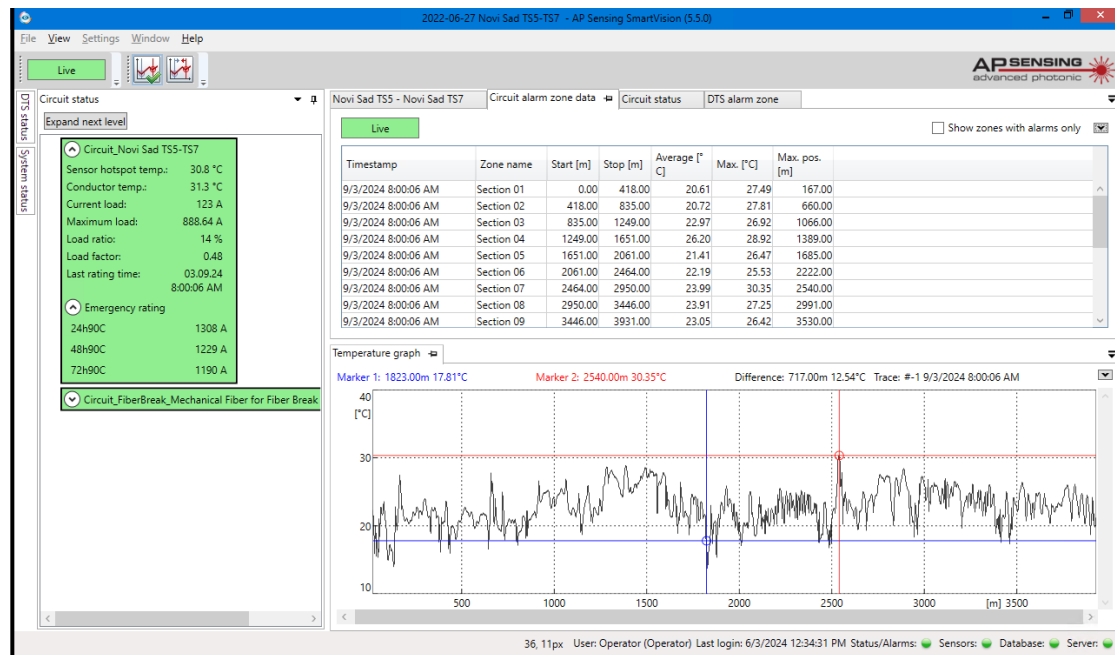
- automatsku detekciju tačke pregrevanja tj. stacionaže u kojoj je temperatura duž trase kabla najveća,
- alarmiranje službi održavanja i centara upravljanja ako se u toku eksploatacije premaše određene temperature koje su dozvoljene u trajnom radu,
- kreiranje temperaturnog profila duž trase,
- određivanje vrednosti trajno dozvoljene struje (Real Time Thermal Rating) i vrednosti struja u nužnom pogonu,
- alarmiranje službi održavanja ako se u blizini kablovskog voda izvode ručni ili mehanizovani iskopi i prikaz stacionaže od interesa.

Implementacija ovakvog sistema je značajna sa aspekta Asset Management sistema, jer je moguće utvrditi da li je u toku eksploatacije nekog voda prekoračena trajno dozvoljena temperatura izolacije i u kom vremenskom periodu, na osnovu čega je moguće proceniti preostali životni vek kabla. Sa aspekta upravljanja moguće je preduzeti manipulativne operacije kako bi se smanjilo opterećenje kablovskog voda i sprečio režim koji termički ugrožava kablovski vod i smanjuje životni vek istog. Primena sistema koji se koristi za distribuirano merenje temperature je u primeni na više kablovskih vodova EMS AD od momenta puštanja u probni pogon istih.

Očekivani eksploatacioni vek nekog kablovskog voda iznosi 40 godina i više. U momentu izgradnje i po puštanju u rad, službama koje se bave održavanjem jesu poznati eksploatacioni uslovi (temperature tla, ukrštanja sa drugim toplotnim izvorima kao što su energetske kablove i toplovođe). Vremenom se mogu izgraditi novi izvori ili promeniti lokalni uslovi usled radova trećih lica i primene neadekvatnih posteljica tj. promene karakteristika tla koje će otežati uslove pri kojima se hlade kablove. Ovakav sistem će ukazati na takve promene i službama održavanja će biti poznat obim potencijalnog problema, a samim tim i obim aktivnosti za otklanjanje istog.



Prikaz glavnog ekrana aplikacije SmartVision na kom se vide podaci od interesa i za Asset Management i za upravljanje u realnom vremenu su dati na slici 4.



Slika 4 Glavni ekran aplikacije SmartVision

U budućnosti se očekuje implementacija sistema za distribuirano akustično merenje na kablovskim vodovima EMS AD. Tradicionalne metode održavanja podrazumevaju da se trase kablovskih vodova obilaze jedanput nedeljno kako bi se utvrdilo da li duž trase postoji neovlašćeno izvođenje radova koje može uzrokovati mehaničko oštećenje i ispad kablovskog voda. Ovakav pristup ne garantuje rezultate pa je samim tim i ugrožena pouzdanost elektroenergetskog sistema u gustim gradskim jezgrima, gde je zastupljenost kablovske mreže velika.

Sve gore navedno ukazuje da je moguće planirati i eksploatisati kablovski vod na racionalan način koji podrazumeva i minimalne troškove održavanja.

#### 4 BUDUĆI RAZVOJ SOFTVERSKIH ALATA

Potreba da se ima bolja slika o trenutnom stanju elektroenergetskih objekata tako da se prepoznaju kritična mesta postaje jedinstvena za sve operatore prenosnih sistema. Tehnologije koje su dostupne na tržištu pronalaze sve veću primenu, a posebno u oblasti inspekcije nadzemnih vodova.

U poslednjoj deceniji zabeležen je niz inovacija koje su inspekciju nadzemnih vodova podigli na viši nivo. Inspekcije se vrše iz vazduha, a letovi se izvode i pomoću bespilotnih letelica (UAV -Unmanned aerial vehicle) visokih performansi namenjenih za operacije unutar ili izvan vizuelnog vidnog polja sa visokim kapacitetom nosivosti senzora.

Održavanje linijske nadzemne infrastrukture u oblasti energetike, zahteva više različitih vrsta senzora koji pružaju potpunu sliku o stanju sistema. Za potrebe analize potrebno je imati u vidu da postoje:

- Laserski skener (LiDAR),
- Kamera visoke rezolucije za izradu ortofoto snimaka i RGB slika stubova i raspona,

- Termalna kamera (Infracrveni senzor).

Količina podataka koja se prikupi inspekcijom na gore opisan način je velika i zahteva primenu softvera koji će korisniku obezbediti mehanizme da na brz način iste obradi i da na osnovu istih donosi odluke.

Iz tog razloga je doneta odluka da se pristupi razvoju softvera koji će koristiti različite module za sledeće procese:

- 3D mreža – vizuelizacija položaja nadzemne infrastrukture kao i objekata koji se nalaze u pojasu istog. Na ovaj način će se postići izrada digital twin modela za nadzemne vodove. Ovaj modul će se koristiti da se izvrši provera sigurnosnih razmaka, visina i udaljenosti u odnosu na druge objekte i utvrdi usklađenost sa pravilnikom koji se koristi u procesu projektovanja i održavanja dalekovoda. Kao krajnji rezultat određiće se kritična mesta koja ugrožavaju pouzdan rad i planirati aktivnosti tokom održavanja ili investicione aktivnosti na otklanjanju istih.
- Upravljanje vegetacijom – upravljanje procesima seče rastinja i eliminisanja rizika ispada dalekovoda zbog vegetacije. Ovim modulom će se utvrditi precizne lokacije stabala čiji rast ugrožava pouzdan rad dalekovoda, a kao krajnji rezultat ovo će omogućiti da se na vreme planiraju aktivnosti i racionalizuju troškovi za seču rastinja. U okviru istog uzeće se u obzir tip rastinja i prirast konkretne vegetacije, tako da će se raditi i predikcije i utvrditi tačne površine koje ugrožavaju elektroenergetske objekte od interesa.
- Opterećenje dalekovoda– poznavanje statičkih opterećenja faznih provodnika na osnovu dozvoljenih temperatura koje se mogu imati u eksploataciji. Ovo omogućava da se racionalnije koriste dalekovodi, kao i da se ima bolji uvid tokom planiranja razvoja celokupne elektroenergetske mreže.
- Stanje opreme – utvrđivanje defekata na konstrukciji stubova ili izolatorima, određivanju stepena korozije i slično.
- Izveštaji– ogleda se u automatizovanoj izradi izveštaja u izuzetno kratkom vremenu sa podacima o najkritičnijim mestima ili deonicama na nekom vodu. Ovo omogućava racionalnije korišćenje postojećih ograničenih ljudskih resursa i eliminiše mogućnost greške prilikom analize podataka.

## 5 ZAKLJUČAK

Softverski alati zasnovani na GIS tehnologiji omogućavaju integraciju i analizu različitih slojeva podataka, čime se stvara sveobuhvatan pregled stanja elektroenergetske imovine. Primena ovih alata omogućava bržu i tačniju detekciju problema, optimizaciju resursa i unapređenje operativnih procedura. Jedan primer iz prakse je i softver za detekciju atmosferskih pražnjenja pomoću kog se značajno smanjuje vreme potrebno za otklanjanje kvarova.

Softveri bazirani na GIS tehnologiji su se pokazali kao neophodan alat u modernom upravljanju elektroenergetskim mrežama i dalji razvoj tehnologija i implementacija sa drugim postojećim i novim sistemima za monitoring u realnom vremenu će pojednostaviti i poboljšati proces održavanja. Na taj način će se potvrditi uloga i značaj softvera kao ključnog faktora za unapređenje sistema za upravljanje imovinom (Asset Management sistema).

Dosadašnji rezultati u primeni Asset Management sistema u EMS AD, uz konstantna unapređenja uvođenjem i povezivanjem novih aplikacija, pokazuju da je proces planiranja,

održavanja i eksploatacije prenosnog sistema podignut na značajno viši nivo, čime je i sama pouzdanost rada prenosnog sistema povećana.

## **LITERATURA**

- [1] Korisničko uputstvo v2.0 Nadogradnja INOVA sistema, Jun 2020.
- [2] Uputstvo za upotrebu SCALAR Flash Client, ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR Inštitut za elektrogospodarstvo in elektroindustrijo Oddelek za vodenje in delovanje elektroenergetskih sistemov, Oktobar 2021.
- [3] AP Sensing SmartVision™ – User’s Guide Edition 12, April 2022.

# APPLICATION OF SOFTWARE TOOLS FOR IMPROVEMENT OF THE ASSET MANAGEMENT SYSTEM IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM

BRANKO ĐORĐEVIĆ, MAJA ADAMOVIĆ, VLADIMIR M. ILIĆ, VLADIMIR ILIĆ,  
MIRKO BOROVIĆ  
JOINT STOCK COMPANY ELEKTROMREŽA SRBIJE, BELGRADE SERBIA

BELGRADE

SERBIA

*Abstract — This paper describes various Asset Management tools in the transmission system, with a particular focus on the application of software packages based on Geographic Information System (GIS) platforms. Efficient application of Asset Management in the transmission system is crucial for maintaining the reliability and stability of the electrical grid, reducing operational costs, and extending the lifespan of infrastructure elements.*

*Thus, the direct application of specific software for detection of atmospheric discharges near power lines, software that displays temperature distribution in cable lines, or software that records the location of illegally constructed objects that threaten the reliable operation of power lines, each in its own way accelerates fault detection, reduces downtime, and minimizes the probability of undesirable events during the operation of assets. These tools can be used for condition analysis or risk and reliability assessment of the system.*

*The paper presents the results of the implementation of these technologies based on real-world examples. The effects of these tools on the efficiency of Asset Management are analyzed, along with potential challenges and future development opportunities. The conclusions highlight the importance of integrating these tools into standard management procedures of power systems and the need for continuous improvement of software solutions to keep pace with the increasingly complex approaches to Asset Management in modern power grids.*

*Keywords — asset management, electric power system, atmospheric discharge detection, GIS, temperature distribution, cable lines.*



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.261M](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.261M)

C2 18

## DIGITALIZACIJA VN POSTROJENJA – IZAZOVI VELIKE KOLIČINE PODATAKA

SRĐAN MIJUŠKOVIĆ, WSP UK\*

BEOGRAD

SRBIJA

**Kratak sadržaj** — Visokonaponska VN postrojenja su ključni elementi prenosnog dela elektroenergetskog sistema, koji s jedne strane povezuju izvore energije značajnih instalisanih snaga i s druge raznovrsne potrošače električne energije. Postojeća elektroenergetska mreža je osetljiva na primetan broj izvora obnovljive energije zasnovanim na inverterima. Na drugoj strani spektra, struktura potrošača se neumitno menja. Digitalizacija putem IEC 61850 Standarda je proces koji bi trebao da omogući i reši navedene zahteve, posebno komunikacioni aspekt. Ukoliko se navedenim izazovima pridoda i potreba za izuzetno preciznim i brzim reakcijama na promene u sistemu, primena veštačke inteligencije – *Artificial Intelligence* (AI) i mašinskog učenja - *Machine Learning* (ML) se nameće kao svrsishodna opcija. Opisana količina i tip podataka važnih parametara se definiše kao *Big Data* i mogućnosti ovog rešenja, kao i analize i istraživanja na tu temu, su u primetnoj ekspanziji. Pažljivo planiranje sofisticiranih komunikacionih sistema primenom adekvatnih digitalnih uređaja, uz uvažavanje principa računarske bezbednosti i primenom postojećih standarda, čini navedeni proces izuzetno dinamičnim i zahtevnim.

**Ključne reči** — Digitalizacija, IEC 61850, Big Data, Machine Learning

---

\* Makedonska 12, Beograd [srdjan.mijuskovic@wsp.com](mailto:srdjan.mijuskovic@wsp.com)

## 1 UVOD

Visokonaponska VN postrojenja su ključni elementi prenosnog dela elektroenergetskog sistema, koji s jedne strane povezuju izvore energije značajnih instalisanih snaga, a s druge, raznovrsne potrošače električne energije. Koordinacija i upravljanje nepredvidivih i nestalnih izvora energije s jedne i izuzetno raznolikih i zahtevnih potrošača s druge strane, predstavlja veoma složen zadatak, za čiju uspešnu funkcionalnost je neophodno prikupljanje i obrada velike količine podataka, često i u realnom vremenu. Razmena tako značajne količine informacija u višestrukim pravcima, takođe zahteva i robusnu i visokopouzdanu komunikacionu mrežu. Postoji više pravaca odgovora na navedene i povezane izazove, stoga je njihovo razumevanje ključno za sadašnjost i budućnost elektroenergetske mreže.

## 2 SMART GRID

Proces kojem se posvećuje značajna pažnja Industrija 4.0, nudi nove koncepte (*Big Data, System Integration, Internet of Things, Cloud Computing, Cybersecurity..*) usko povezane s idejom pametne mreže (*Smart Grid*). Svako unapređenje digitalizacije i prateće analitike u elektroenergetici i srodnim disciplinama zapravo postaje deo ideje *Smart Grid*-a. Uključivanjem značajne instalisane snage izvora obnovljive energije navedena ideja dobija svoje uočljive konture u našoj svakodnevnicu [1].

Energetska tranzicija uglavnom je motivisana ciljevima dekarbonizacije, kao što su NET zero – klimatske akcije i inicijative za čistu energiju [2]. Izazovi energetske tranzicije sa centralizovanih proizvodnih jedinica velike snage, baziranih na sinhronim generatorima, na izvore manje instalisane snage, distribuiranim na sveobuhvatnoj površini elektromreže (*DER – Distributed Energy Resources*), dobro su poznati i značajna pažnja im je pružena realizovanjem *DERMS (Distributed Energy Resources Management System)* [3].

Postojeća elektroenergetska mreža je osetljiva na primetan broj izvora obnovljive energije zasnovanim na invertorima. Dodatan problem jeste prisustvo HVDC sistema koji ne prenose elektromehaničku inerciju rotirajućih mašina, već sadrže specijalizovane kontrolne sisteme za upravljanje elementima energetske elektronike koji invertuju naizmničnu u jednosmernu električnu energiju, kao i obrnuto [4]. Obnovljivi izvori energije (OIE) velikih kapaciteta su direktno povezani na VN postrojenja i uspešna realizacija energetske spregnutosti navedenih sistema u velikoj meri zavisi od uspešne komunikacione interkonekcije [5]. Spregnutost VN i sistema OIE velike snage se često navodi kao jedan od glavnih tehničkih razloga za digitalizaciju VN postrojenja, kako bi se koordinacija i upravljanje navedenih nepredvidivih i nestalnih izvora energije uspešno izvršavala [6]. Na drugoj strani spektra, sve je više malih potrošača kojima je neophodno neprekidno napajanje (rad od kuće) i potrošača koji su povremeno i proizvođači manjih količina električne energije (prozjumeri).

Evidentno ideju *Smart Grid*-a moramo razumeti kao kontinualan proces i to se izuzetno precizno može sagledati kroz razvoj VN postrojenja tokom 21-og veka. Budući da se funkcionalno nalaze u samom središtu elektroenergetskih sistema, za očekivati je da promene i unapređenja u datom i povezanim sektorima direktno utiču i na VN postrojenja. Promene se prevashodno odnose na aspekt informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT). IKT domen u industrijskim i shodno energetskim delatnostima nazivamo operacionim OT tehnologijama, za razliku od informacionih IT tehnologija koje povezujemo prvenstveno s poslovnim procesima.

### 3 DIGITALIZACIJA VN POSTROJENJA

Digitalizacija VN postrojenja putem IEC 61850 Standarda je proces koji bi trebao da omogući i reši navedene zahteve, posebno komunikacioni aspekt. Često se u brojnim materijalima može videti naglašavanje da se radi o Standardu, nikako samo o komunikacionom protokolu. Međutim i reč standard ne opisuje sveobuhvatnost ove platforme za digitalizaciju EE objekata. Reč je o soluciji koja omogućava da *Smart Grid* postane realan i održiv cilj. Protoklo je 20 godina od objavljivanja i početaka praktične upotrebe IEC 61850. U 40-ak različitih dokumenata na već sada više od 8000 strana date su jasne smernice za digitalizaciju elektroenergetskih objekata, inicijalno i prevashodno VN objekata.

Model zaštitno-upravljačkog sistema koji se najčešće primenjuje u savremenim digitalizovanim VN postrojenjima s pravom se naziva hibridni. Moderni zaštitno-upravljački sistemi primenjuju digitalizovane IED (*Intelligent Electronic Device*) uređaje, redundantne SCADA sisteme i koriste u svojim procesima poruke bazirane na 8-1 delu Standarda – MMS i GOOSE, što se smatra digitalizacijom do staničnog nivoa [7]. Shodno definicijama IEC 61850, proces digitalizacije zaštitno-upravljačkih VN sistema bi morao biti zaokružen korišćenjem *Sampled Values* – digitalizovanih merenja ili prema SRPS EN 61850-9-2:2013 vrednosti uzoraka [8][9].

Termin potpuno digitalizovani zaštitno-upravljački sistem bi bio apsolutno regularan da nepredviđen globalni zastoj u digitalizaciji procesne mreže nije toliko odužen. Sledstveno, mnoge nove tehnologije (VLAN, *Digital Twin*, Virtuelizacija IED..) su počele da pronalaze svoje pozicije u modernizaciji zaštitno-upravljačkih sistema. Sofisticiranost razlika i složenost preciznog definisanja nivoa digitalizacije postrojenja jasno ilustruje sveobuhvatnu zahtevnost izazova navedenog procesa, rada na globalnom nivou već više od decenije, u cilju uspostavljanja Standardom definisane arhitekture zaštitno-upravljačkih sistema [10].

#### 3.1 Sampled Values

Vrednosti uzoraka (SV) predstavljaju kontrast u odnosu na konvencionalne implementacije, gde se skalirana analogna merenja šalju direktno na zaštitno-upravljačke uređaje (IED). Glavna karakteristika SV jeste izuzetna brzina, frekvencija slanja od uobičajeno 4000Hz i 4800Hz za zaštitno-upravljačke sisteme i 14400Hz za kvalitet EE, shodno IEC 61869 - Part 9 [11]. Digitalizacija procesnog nivoa (*Process Bus*) kao jedan od zahteva za ispravan rad postavlja usklađenost vremena podataka – vremenskih znački (*timestamp*), shodno IEC 61850-5 (*Table 3*) u klasi T5 (ispod 1 $\mu$ s) [12]. Prema praktičnim iskustvima, nivo reda veličine potreban za ispravno funkcionisanje je i do 50ns (10<sup>-7</sup>s/10<sup>-8</sup>s) [13][14].

Uspostavljanje funkcionalne arhitekture sistema procesnog nivoa sa SV očigledno predstavlja izuzetno složen zadatak, kako sa aspekta vremenske sinhronizacije, tako i količine podataka na lokalnoj mreži [15]. U modernim VN postrojenjima digitalizovanim do staničnog nivoa, celokupno mrežno opterećenje retko prelazi ukupne vrednosti od svega nekoliko Mbps sa pikom tokom iznenadnih problema ili specifičnih situacija u elektromreži. Uvođenjem SV digitalizovanih merenja u proces, svaki *Merging Unit* uređaj unosi opterećenje reda veličine od 3 do 5Mb svake sekunde, u zavisnosti od strukture SV podatka. Usled navedene karakteristike digitalizovanih merenja i u zavisnosti od veličine VN objekta, mrežno opterećenje će se sigurno kretati u desetinama Mbps, a za postrojenja s dvocifrenim brojem polja, očekivano mrežno opterećenje može doseći i trocifren broj u Mb svake sekunde. Tehnološki je i dalje veoma teško zadovoljiti nove zahteve, mada su učinjen značajni pomaci,

naročito po pitanju vremenske sinhronizacije [1][5]. Međutim, ostaje da se vidi da li će elektronski uređaji uključeni u novu arhitekturu digitalizovanih VN postrojenja moći da održe i izdrže značajno viši stepen zahtevnosti tokom dužeg vremenskog intervala.

#### 4 BIG DATA

*Big Data* (Velika količina podataka) – veliki i kompleksni setovi podataka, kod kojih tradicionalne softverske aplikacije za obradu nisu primenljive [16].

Razmatrajući definiciju pojma *Big Data* uočavamo da se novodobijeni podaci s procesnog nivoa VN postrojenja putem digitalizovanih SV merenja potencijalno idealno uklapaju u navedeni koncept.

Jedan od postulata IEC 61850 jeste kontinuirano ažuriranje i koncepcijska spremnost na prihvatanje novih tehnologija i komunikacionih medijuma, što nam ukazuje na plansku dugoročnu održivost i time stabilnost, potvrđujući se kao sistemsko rešenje za automatizaciju energetske sistema [17][18]. *Sampled Values* protokol prewashodno uveden u 9-2 delu IEC 61850 2004. godine [8] je definisan u skladu s pomenutim postulatom. Usklađivanjem sa navedenom idejom *Big Data* ukazuje se na nastavak progresivnosti Standarda.

Opisana značajna količina podataka memorisana u velikim bazama podataka, predstavlja idealan materijal za AI analizu, poput *deep learning*-a [19], s ciljem poboljšanja postojećih zaštitno-upravljačkih algoritama, radi bržeg i preciznijeg reagovanja na promene u sistemu.

Velike baze podataka i brzina obrade zadatih informacija u direktnoj su zavisnosti od procesne moći računarskih sistema, što još uvek predstavlja jedan od inicijalnih izazova u razvoju navedenih tehnologija.

Napredak u koordinisanju *Smart Grid* sistema se može ostvariti optimizacijom tokova snage, regulacijom napona i frekvencije, proaktivnom predikcijom proizvodnje obnovljivih izvora i potrošnje. Prostor za unapređenje u domenu *Asset Management*-a je očigledan - pravovremena detekcija kvarova i procena mogućeg trenutka kvara na opremi shodno stanju i ugroženosti. Usavršavanjem iskustava pomoću napretka AI hardvera i algoritama, industrijski koncepti na osnovama IIoT, *edge-computing*a i IoT senzori, mogu naći svoje mesto u ekvivalentnim konceptima VN postrojenja – modernizovanim lokalnim SCADA sistemima i digitalizovanim mernim transformatorima [20].

Mogućnosti su zaista nesporne i teško sagledive, međutim složenost procesa digitalizacije i često nesagledani izazovi naziru se i od same idejne faze primene opisanih AI tehnologija.

Izuzetno cenjene karakteristike interoperabilnosti i transparentnosti modelovanja Standarda IEC 61850 će verovatno morati da postanu i deo AI standardizacije i procesa funkcionalnosti, budući da sa povećanjem kompleksnosti algoritama, mogućnost nekompatibilnosti sa realnim zahtevima i očekivanjima neminovno vodi ka nesigurnosti u pouzdanost povratnih informacija [21].

#### **Računarska bezbednost**

Navedeni izazov je već primećen tokom procesa programskog učenja AI servisa u digitalizovanom VN postrojenju za potrebe računarske bezbednosti. Funkcionisanje komunikacionih protokola, njihova frekventnost i odziv prilikom normalnog radnog stanja su



klasifikovani i memorisani pomoću markera. Pokazalo se da je takav sistem pušten u paralelan rad sa postojećim, emitovao neočekivano veliki broj neželjenih (*false*) alarma. Plan je nedovoljno pripremljen za veliki broj situacija koja ne pripadaju normalnom radnom stanju. Ispostavilo se da u situacijama poput rutinskih testiranja i kontrolisanih kvarova u mreži isuviše lako dolazi do pomenutih neželjenih alarma, usled sofisticiranosti semantike komunikacionih protokola u sastavu IEC 61850. Izazvani alarmi u sebi sadrže složene tehničke detalje, a budući da AI ne spoznaje u celosti fiziku procesa, za njihovo potpuno tumačenje je neophodna stručnost iz IEC 61850 (OT), IT mrežnih i sistema računarske bezbednosti, kao i poznavanje implementiranih funkcionalnih logika zaštitno-upravljačkog sistema [22].

### **Kvalitet električne energije**

Pomenuto je da *Sampled Values* protokol može biti korišćen za merenje kvaliteta električne energije. Frejmovi tada mogu prilikom frekvencije od 14400Hz i 6 ASDU poruka po *Merging Unit*-u ubacuju oko 12.5Mbps na lokalnoj računarskoj mreži i kreiraju ogromnu bazu podataka u kratkim vremenskim intervalima. Informacije o harmonicima, padovima napona i tranzijentima mogu biti iskorišćene da kreiraju modele. Pomoću tih analiza, sagledavaju se potencijalne akcije, u cilju sprečavanja navedenih poremećaja, poput korekcija u radu elektronskih elemenata [23].

### **Vremenska sinhronizacija**

Kao posebno zanimljiv podatak, koji bi trebao da se prati i potencijalno poveže sa problemima u radu procesne mreže jeste vremenska sinhronizacija. Navedena ključna karakteristika i najizazovniji parametar tokom celog dvodecenijskog perioda primene i razvoja IEC 61850 digitalne platforme, još uvek ostavlja značajan prostor za bolje razumevanje [23].

U sinhronizovanim zaštitno-upravljačkim sistemima, posebno kod elemenata najudaljenijim od GMC (*Grand Master Clock*-a), može doći do odstupanja (*drift*) usled faktora poput kašnjenja u mreži, nepreciznosti sata, mogućih spoljnih delovanja ili problema na samoj mreži. Kao ključni parametri za praćenje odstupanja mogli bi se postaviti granice odstupanja, udaljenost elemenata od GMC, uslovi okoline i potencijalne varijacije *Sampled Values*. Analizom vremenskih serija: Rekurentna neuronska mreža RNN (*Recurrent neural network*) ili duga kratkoročna memorija *Long short-term memory* (LSTM) mogle bi biti korisne za predviđanje budućih paterna odstupanja na osnovu memorisanih podataka. Praćenjem u realnom vremenu, nepoklapanja očekivanih obrazaca mogu da ukažu na greške u radu ili čak prisustvo sajber napada. Mogućnost opisanog praćenja stanja izuzetno je složena usled kompleksnosti digitalizovanih sistema i podsistema, kao i samih uređaja i primenjenih logika, poput VLAN i PRP.

Mogućnost korišćenja rutabilnog SV kroz usavršene mrežne MPLS telekomunikacione strukture između povezanih VNP se još uvek razmatra [24]. Potencijalne distinkcije u sinhronizaciji razdvojenih objekata i njihovih međusobnih uticaja, ukazuju na dodatnu dimenziju analiza koje bi opisane ML procedure mogle da procesuiraju. Istraživanja na srodnu temu problema vremenske sinhronizacije fazora PMU su već aktuelna [25].

Za kraj, treba naglasiti kako bi bilo koja AI metodologija obrade ovakve količine podataka mogla da se sprovede u realnosti, neophodno je prvenstveno oformiti bazu koja će biti temelj svih planiranih postupaka. Baze podataka moraju biti tačno definisane i pripremljene isključivo od podataka koji sadrže informacije od značaja za monitoring željenih parametara.

Datim postupkom omogućavaju se dalje analize i daje sposobnost AI da u perspektivi donosi sve preciznije i upotrebljivije zaključke.

## 5 ZAKLJUČAK

Složenost procesa digitalizacije VN postrojenja prevazilazi striktno tehničke aspekte, budući da negativna iskustva u realizaciji ovakvih struktura imaju izuzetno štetan uticaj, kako na kompanije direktno finansijski oštećene, tako i na celokupan proces i progres uspostavljanja *Smart Grid* i *Zero Net* ciljeva, sagledanih kao globalne tendencije i inicijative. Kompleksnost opisanog procesa digitalizacije VNP se očigledno sagledava kroz sveobuhvatnost izazova integracije IEC 61850 9-2 *Sampled Values*. Pored svega, složenost parametara SV se, uz već naglašenu obimnost podataka za obradu, uklapa i u koncepte *Big Data*. Vrlo rano u procesu se mora usvojiti činjenica da posledice disfunkcionalnog rada SV protokola direktno utiču na nestabilnost zaštitno-upravljačkih sistema. Pravilnim determinisanjem ulaznih podataka, uz naglašeno uvažavanje dogmatičnosti funkcionisanja ML modela, otvara se mogućnost za kreiranje sveobuhvatnih SV analiza. Izazovi na ovom putu su zaista brojni, ali naslućeni potencijali će tokom narednog perioda inspirisati dalja istraživanja.

## ZAHVALNICA

Autor se zahvaljuje svojim dragim kolegama Sonji Knežević i Vladanu Cvejiću na brojnim korisnim savetima i podršci u pisanju rada.

## LITERATURA

- [1] A. Apostolov, 2023, *Digitizing the electric power grid*
- [2] M. Kanabar, 2023, *Building the Grid of the Future through Innovations with Digital Transformation*, [PAC World](#)
- [3] J. Ugwu, 2023, *Comprehensive Review of Renewable Energy Communication Modeling for Smart Systems*, [Energies](#)
- [4] Mohan Muniapan, 2021, *A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems*, [Springer](#)
- [5] P. Bishop, 2023, *IEC 61850 Principles and Applications to Electric Power Systems*
- [6] A. Apostolov, 2023, *Global Experience with Digital Substations*, [PAC World](#)
- [7] IEC 61850 *Communication networks and systems for power utility automation - Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802/3*, 2011
- [8] IEC 61850-9-2: *Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled Values over ISO/IEC 8802-3*. – First Edition, 2004
- [9] SRPS EN 61850-9-2:2013 - *Komunikacione mreže i sistemi za automatizaciju energetskih objekata — Deo 9-2: Specifično preslikavanje komunikacionih servisa (SCSM) — Vrednosti uzoraka prema ISO/IEC 8802-3 – Edicija 2*
- [10] Srđan Mijušković, 2024, *Pregled izazova integracije modernih komunikacionih sistema u elektroenergetskim mrežama*, CIRED, Crna Gora,
- [11] IEC 61869 - Part 9 : *Digital interface for instrument transformers*, Table 902, 2016
- [12] IEC 61850 - Part 5: *Communication requirements for functions and device models - Table 1 – Classes for transfer times*, 2013
- [13] F. Steinhäuser, 2016, *OMICRON, Route to IEC 61850: Client/Server, GOOSE and Sampled Values*, Austria

- [14] P.Mohapatra, 2020, *Application of Precision Time Protocol Standard with multi-vendor Relays over PRP and HSR Architectures: A Real Test of the PTP Standard in project FITNESS*, SP Energy Networks, UK, [PAC World](#)
- [15] Srđan Mijušković, 2022, *Digitalizacija VN Postrojenja – Sampled Values*, CIGRE Srbija
- [16] A. Apostolov, 2023, *Global Experience with Digital Substations*, [PAC World](#)
- [17] IEC TR 61850-1:2013 – *Introduction and overview*
- [18] IEC 61850-3:2013 – *General requirements*
- [19] M. Kanabar, 2024, *AI Grid Analytics in a Substation for the Grid of the Future*, [PAC World](#)
- [20] M. Petrini, 2024, *Automation, and Control (PAC) Systems*, [PAC World](#)
- [21] A. Apostolov, 2024, *Data Sources for AI application*, [PAC World](#)
- [22] A.Klien, 2019, *New approach for detecting cyber intrusions in IEC 61850 substations*, [PAC World](#)
- [23] PSRC WG C43 Report, *Practical applications of AI / ML in Power system PAC*, [PAC World](#)
- [24] G.Antonova, 2022, *Evolution of intra and inter-substation communication*, [PAC World](#)
- [25] A.Iqbal, 2023, *Machine Learning based Time Synchronization Attack Detection for Synchrophasors*

# DIGITALIZATION OF HV SUBSTATIONS – BIG DATA CHALLENGES

SRĐAN MIJUŠKOVIĆ, WSP UK\*

BELGRADE

SERBIA

***Abstract*** — HV substations are key parts of any transmission system that, on the one hand, interconnect vast amounts of energy sources and on the other, various energy consumers. The conventional grid is vulnerable to any of nowadays inverter-based sources due to the sheer multiplicity of dedicated machines. On the other hand, the structure of consumers is changing inexorably. Digitalization through IEC 61850 is a process that should contain and handle all these demands, especially the communication aspect. For the purpose of processing this type of huge amount of data, often in real time and with a need for great speed and accuracy, implementing artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) emerges as an advantage. This type and amount of important parameters are defined as big data, and this solution analysis and research are under significant expansion. Precise planning of sophisticated communication systems using adequate digital devices, while respecting the principles of cybersecurity and applying existing standards, makes the described process extremely dynamic and demanding.

***Key words*** — Digitalization, IEC 61850, Big Data, Machine Learning

---

\* [srdjan.mijuskovic@wsp.com](mailto:srdjan.mijuskovic@wsp.com)

**DIGITALIZACIJA VN POSTROJENJA – IZAZOVI VELIKE KOLIČINE PODATAKA**  
**DIGITALIZATION OF HV SUBSTATIONS – BIG DATA CHALLENGES**

**SRĐAN MIJUŠKOVIĆ, WSP UK**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj - VN postrojenja su ključni elementi prenosnog dela elektroenergetskog sistema, koji s jedne strane povezuju izvore energije značajnih instalisanih snaga i s druge raznovrsne potrošače električne energije. Postojeća elektroenergetska mreža je osetljiva na primetan broj izvora obnovljive energije zasnovanim na inverterima. Na drugoj strani spektra, struktura potrošača se neumitno menja. Sve je više malih potrošača kojima je neophodno neprekidno napajanje (rad od kuće) i potrošača koji su povremeno i proizvođači manjih količina električne energije (prozumeri). Koordinacija i upravljanje nepredvidivih i nestalnih izvora energije s jedne i izuzetno raznolikih i zahtevnih potrošača s druge strane, predstavlja veoma složen zadatak, za čiju uspešnu funkcionalnost je neophodno prikupljanje i obrada velike količine podataka, često i u realnom vremenu. Digitalizacija putem IEC 61850 Standarda je proces koji bi trebao da omogući i reši navedene zahteve, posebno komunikacioni aspekt. Može se reći da je sada i mnogo više od Standarda - digitalna platforma, solucija koja omogućava da Smart Grid postane realan i održiv cilj. Ukoliko se navedenim izazovima pridoda i potreba za izuzetno preciznim i brzim reakcijama na promene u sistemu, primena veštačke inteligencije – Artificial Intelligence (AI) i mašinskog učenja - Machine Learning (ML) se nameće kao svrsishodna opcija. Opisana količina i tip podataka važnih parametara se definiše kao Big Data i mogućnosti ovog rešenja, kao i analize i istraživanja na tu temu, su u primetnoj ekspanziji. Razmena tako značajne količine informacija u višestrukim pravcima, takođe zahteva i robusnu i visokopouzdanu komunikacionu mrežu. Pažljivo planiranje sofisticiranih komunikacionih sistema primenom adekvatnih digitalnih uređaja, uz uvažavanje principa računarske bezbednosti i primenom postojećih standarda, čini navedeni proces izuzetno dinamičnim i zahtevnim. Postoji više pravaca odgovora na navedene i povezane izazove, stoga je njihovo razumevanje ključno za sadašnjost i budućnost elektroenergetske mreže.*

**Ključne reči – Digitalizacija, IEC 61850, Big Data, Machine Learning**



**D2 00**

## **21. SIMPOZIJUM CIGRE SRBIJA**

### **STK D2: INFORMACIONI SISTEMI I TELEKOMUNIKACIJE**

#### **IZVEŠTAJ STRUČNIH IZVESTILACA**

##### **STRUČNI IZVESTIOCI:**

Telekomunikacije: **Ljiljana Čapalija i recezenti radova Dr Radoslad Raković**  
Informacioni sistemi: **Aleksandar Car**

#### **INFORMACIONI SISTEMI I TELEKOMUNIKACIJE**

##### **A. Preferencijalne teme:**

1. Razvoj i modernizacija SCADA sistema (novi moduli, funkcionalnosti, alati, arhitektura) u skladu sa novim potrebama i razvojem hardverskih i softverskih tehnologija.
2. Integracija funkcija lokalnog i daljinskog upravljanja u sistemima za automatizaciju prenosnih i proizvodnih postrojenja, razvoj i primena opreme bazirane na standardu IEC 61850.
3. Informacione i komunikacione tehnologije za povezivanje distribuiranih izvora energije (nadgledanje, upravljanje, bezbednost, korišćenje postojećih standarda, interoperabilnost, Cyber security). „Smart grid“ aplikacije u svetlu ICT za DSO (Distribution System Operator) i TSO (Transmission System Operator) organizacije.
4. Sprega SCADA i MMS/OMS/AMS sistema - SCADA kao izvor podataka za sisteme upravljanja održavanjem (Maintenance Management System - MMS), planiranja isključenja i upravljanja kvarovima (Outage Management System – OMS) i upravljanja opremom (Asset Management System – AMS).
5. Osigurnje bezbednosti (tajnosti, integriteta i raspoloživosti) informacija kroz politiku bezbednosti, arhitekturu TK sistema i opreme uz primenu postojećih standarda vezanih za bezbednost informacija i interoperabilnost. Sertifikacija otpornosti informacionih i telekomunikacionih sistema na cyber napade. Cloud servisi, primena, raspoloživost i sigurnost, kao i virtualizacija u IT tehnologiji. Disaster Recovery sistemi.
6. Iskustva u izgradnji, integraciji i eksploataciji telekomunikacione mreže prenosa u magistralnoj i regionalnoj ravni, funkcionalnih mreža/sistema elektroprivrede i multiservisne mreže zasnovane na savremenim tehnologijama. Migracija ka multiservisnoj IP/MPLS mreži elektroprivrede i obezbeđivanje nivoa kvaliteta QoS za različite kritične i administrativne (poslovne) servise.

7. Prmena novih koncepcija u automatizaciji elektroenergetskih objekata, IoT tehnologije i arhitekture u Asset Management-u i primena u elektroenergetskom sektoru.
8. Veštačka inteligencija, Big Data i alati za analitiku za poboljšanje Asset Management-a i simulatori Digital Twin u elektroenergetskim preduzećima.

## **B. Informacioni sistemi**

### **Rad po pozivu:**

#### **D2.1. PRIMENA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE ZA OBRADU IC SLIKA U DALJINSKOM MONITORINGU TEMPERATURE**

**Autori: Saša D. Milić, Miša Kožicić**

#### **D2.2 STANDARDI SERIJE ISO 22300 I OBEZBEĐENJE KONTINUITETA POSLOVANJA U ELEKTROPRIVEDNIM SISTEMIMA**

**Autori: Radoslav Raković**

Da bi se obezbedio kontinuitet poslovanja elektroprivrednih organizacija, neophodno je primeniti čitav niz mera organizaciono - tehničke prirode. Dragocen okvir predstavljaju standardi serije ISO 22300 za menadžment kontinuitetom poslovanja. U radu je dat kratak pregled navedene familije standarda a zatim su razmotreni aspekti njihove primene u elektroprivrednim organizacijama.

### **Pitanja za diskusiju**

1. Po saznanju autora, postoje li domaći standardi koji se baziraju na ISO 22300?
2. Postoji li sertifikaciono telo u Srbiji ili regionu ovlašćeno za izdavanje sertifikata o usklađenosti sa standardom ISO 22300?
3. ENTSO ima svoje preporuke za operatore TSO sistema, u kojoj meri su ENTSO preporuke usklađene sa standardom ISO 22300?

#### **D2.3 ZAŠTITA LIČNIH PODATAKA KROZ IMPLEMENTACIJU POLITIKE O BEZBIJEDNOSTI I ORGANIZACIJU IKT SISTEMA NA HARDVERSKOM I APLIKATIVNOM NIVOU**

**Autori: Milkica Petrović Rikić, Dragan Rikić, Tihomir Dabović, Željko Marković**

U radu je opisana implementacija sistema za zaštitu ličnih podataka koja se uvodi kroz standardizaciju rada, uvođenje standarda za bezbednost ISO 27001, imenovanje DPO-a, imenovanje službenika za usklađenost, kao i povjerenika za zaštitu ličnih podataka. Zatim neophodno je da firme koje potpadaju pod kritičnu infrastrukturu investiraju u IKT, za kupovinu komercijalnih sistemskih softvera vezanih za bezbednost npr. firewall, SIEM sa modulom digitalna forenzika, kao i u pouzdanu opremu.

### **Pitanja za diskusiju:**

1. Koliki je stepen zaštite servera koji proveravaju pravo korisnika da rukuje podacima?
2. Kako se zaštititi od ljudskog faktora u sistemima zaštite podataka?
3. Postoje li propisane kazne za prekršioce koji iskorišćavaju lične podatke?

## **D2.4 IMPLEMENTACIJA UNUTRAŠNJEG I SPOLJNOG PARA FAJERVOLA ZA POVEĆANJE SIGURNOSTI SCADA SISTEMA**

**Autori: Predrag Ilić, Radomir Stamatović, Gordan Konečni, Ivan Gojković**

Sigurnost SCADA sistema je kritična zbog njegove ključne uloge u upravljanju i kontroli industrijskih procesa. Ovaj rad istražuje sigurnosne aspekte SCADA sistema, sa posebnim fokusom na implementaciju unutrašnjeg i spoljnog para fajervola kao glavne mere zaštite.

### **Pitanja za diskusiju:**

1. Praksa instalacije spoljnog i unutrašnjeg firewall-a se pokazala kao dobra zaštita, ima li nekih novih rešenja koja bi pružila još veći stepen zaštite?
2. Da li je bolje instalirati firewallove spoljne i unutrašnje od različitih proizvođača ili unificirati opremu?
3. Koliko je koristan IPS sistem instaliran na spoljne firewall-ove?

## **D2.5 DIGITALIZACIJA VN POSTROJENJA - KONCEPTI VIRTUELIZACIJE**

**Autori: Srđan Mijušković, Adis Lović**

Digitalizacija transformatorskih stanica je budućnost. Rad pokazuje da IEC 61850 protokol je unapred predvideo virtualizaciju koja u današnje vreme postaje aktuelna. Definicijom slanja SV vrednosti su otvorena vrata virtualizaciji zaštita i sistema daljinskog upravljanja transformatorskih stanica.

### **Pitanja za diskusiju:**

1. Po saznanju autora postoje li projekti u regionu za digitalizaciju TS?
2. Procena uvećanja investicije za digitalizaciju TS?
3. Kolika je opasnost od hakerskih napada ovakvih sistema? Da li ćemo digitalizacijom izgubiti pouzdanost sistema zaštite i daljinskog upravljanja?

## **D2.6 SOFTVERSKI MODUL ZA PRIKAZ I ANALIZU VIBRACIJA**

**Autori: Bojana Milić, Radomir Stamatović, Gordan Konečni, Željko Aćimović, Goran Stefanović**

U radu je opisan deo SCADA sistema koji je softverski modul za prikaz, analizu i predikciju karakterističnih elemenata kod monitoringa vibracija rotacionih mašina. Korišćenjem brze Furijeove transformacije (FFT) u odabranim vremenskim intervalima, dobijaju se parametri za frekventnu analizu – spektar, Bodeov dijagram, Nikvistov dijagram, sa odgovarajućim prikazima u okviru aplikacije.

### **Pitanja za diskusiju:**

1. Gde razvijeni modul ima primenu?
2. Da li se razmišlja u pravcu uključivanja AI i generisanja savetodavne poruke u smislu detekcije i predikcije kvarova?
3. Vibromonitoring je značajan deo prediktivnog održavanja, da li se razmišlja i o drugim modulima koji bi poduprli ?



## **D2.7 PRIMJER UVOĐENJA SOLARNIH ELEKTRANA U SISTEM DALJINSKOG NADZORA I UPRAVLJANJA**

**Autori: Elvedin Cernica, Džemo Borovina, Ensar Pašić**

Rad opisuje dva specifična načina uvođenja fotonaponskih elektrana u sistem daljinskog nadzora i upravljanja na primeru dve lokacije na području grada Mostara. Na jednoj lokaciji imamo skup od tri susedne elektrane nazivne snage po 149kW sa kojih je objedinjeno prikupljanje informacija i funkcija upravljanja. Na drugoj lokaciji postoji elektrana nazivne snage 735 kW koja ima nešto drugačiju opremu u funkciji sistema daljinskog nadzora i upravljanja.

### **Pitanja za diskusiju:**

1. Da li je zakonom BiH regulisano kako se preuzimanje reaktivne energije plaća proizvođaču?
2. Upravljanje  $\cos(\phi)$  kako se reguliše sa vlasnikom elektrane?
3. Reakcije investitora na podizanje cena investicije zbog aktuelnih uslova za priključenje?

*Rad koji je prihvaćen kao informacija*

## **D2.8 DIGITALNA TRANSFORMACIJA KROZ IMPLEMENTACIJE SIGURNOSNIH I BEZBEDNOSNIH STANDARDA U DOMENU OPERACIONIH TEHNOLOGIJA**

**Autori: Vladan Đokić**

U radu su prikazani opšti pristupi i metode za implementaciju sigurnosnih i bezbednosnih standarda u proizvodnji, prenosu i distribuciji električne energije.

### **Pitanja za diskusiju:**

1. Po saznanju autora u poslednjem hakerskom napadu na EPS i EDS da li su bili napadnuti i računari koji su u ICS sistemima?
2. Postoji li i koja je kuća nadležna u Srbiji za sertifikaciju sistema za cyber zaštitu?
3. U kojoj meri primena standarda usporava sisteme ICSa?

## **C. Telekomunikacije**

### **D2.9. IMPLEMENTACIJA ISMS U UPRAVI EPS-A AD U SKLADU SA ZAHTEVIMA STANDARDA ISO 27001; IMPLEMENTACIJA KORPORATIVNOG OKVIRA I STVARANJE PREDUSLOVA ZA POVEZIVANJE SA OGRANCIMA**

**Autori: Ljubodrag Josipović, Jasna Marković – Petrović, Aco Arsenijević, Igor Čika**

Rad opisuje aktivnosti koje su preduzete u okviru EPS-a kako bi se implementirao sistem menadžment bezbednošću informacije (ISMS) kao okvir u koje bi trebalo da se uklope sve organizacione jedinice kompanije. Povoljna okolnost je da postoje iskustva u implementaciji ISMS-a u HE Đerdap i Limske HE.

### **Pitanja za diskusiju:**

1. Metodologija za ocenjivanje rizika uzela je u obzir verovatnoću nastajanja događaja i njihove posledice, svaki po skali od 1-5. Na koji način je uzeta u obzir vrednost informacione imovine? Pri tome se misli na njenu informacionu, a ne samo finansijsku

- vrednost (računar iste finasijske vrednosti može u sebi sadžati izuzetno važne informacije strateškog značaja ili informacije čiji značaj nije prevelik).
2. U literaturi je naveden standard ISO 27019 kao sektorski standard za Electric Power Utility. Na koji način su uvaženi zahtevi sadržani u njemu kao modifikacija zahteva ISO/IEC 27001, primerena elektroprivrednom okruženju?
  3. U glavi 5 navedeno je 8 ISMS timova, a u glavi 6 je navedeno da postoji problem sa obezbeđenjem potrebnih kadrova. Kako je zamišljeno da se organizuju ti timovi koji zahtevaju specifična znanja iz oblasti ISMS u uslovima nedostatka kadrova?

## **D2.10. ELEKTROPRIVREDNE TELEKOMUNIKACIONE MREŽE: RAZVOJ, ODRŽAVANJE I LJUDSKI FAKTOR**

**Autor: Dragan Bogojević**

Rad daje kratak pregled telekomunikacionih mreža koje su posle razvoja prešle u eksploataciju i koje su predmet redovnog održavanja. Data je i analiza javno dostupnih strateških dokumenata i planova razvoja, kao i analiza organizacionih struktura u oblasti telekomunikacija i IKT-a u državnim elektroprivrednim kompanijama, sa zaključkom da je ljudski faktor postao kritičan element kome treba posvetiti posebnu pažnju.

### **Pitanja za diskusiju:**

1. Da li se prema saznanju autora u dokumentu “Strategija razvoja sistema elektronskih komunikacija u republici Srbiji do 2027. godine “ navodi i već izgrađena i u eksploataciji transportna infrastruktura EPS-a bazirana na tehnologijama OPGW, SDH IP MPLS i DWDM koja je u funkciji već dugi niz godina? (Uvod rada)
2. U tački 5 Predlozi i zaključci navodi se da EPS ima smanjen obim investicija u telekomunikacioni sistem u odnosu na druge EPK, da li je razlog za to, što ova kompanija ima u eksploataciji već dugi niz godina IP MPLS i DWDM mreže, kroz koje na zahtev svojih korisnika propušta servise za IP telefonsku mrežu, WAN mrežu, SCADA mrežu, Internet servis...?
3. U radu se navodi nova reorganizacija u EPK, da li će ona prema mišljenju autora poboljšati i motivisati stručni kadar da ostanu u IKT sektorima i time smanjiti rizik u nefunkcionisanju telekomunikacionog sistema kao kritične infrastrukture?

## **D2.11. APLIKACIJE ZA DIJAGNOSTIKU I MONITORING RADIO SISTEMA ZA POTREBE UPRAVLJANJA SREDNJE NAPONSKOM DISTRIBUTIVNOM MREŽOM NA TERITORIJI BEOGRADA**

**Autori: Milija Marinković, Tamara Tomić, Predrag Šejat, Sanja Jovanović**

Rad daje opis sistema daljinskog nadzora i upravljanja srednje naponskom distributivnom mrežom na teritoriji Beograda, baziranog na digitalnim paketskim radio uređajima (Packet Data Radio) pri čemu se koristi protokol DNP3. Ovi sistemi su realizovani da se merenja, statusi i alarmi prenose po događaju sa vremenskom odrednicom pridruženoj RTU uređaju. Sinhronizacija vremena RTU uređaja vrši se sa SCADA servera preko DNP3 protokola. Naglašeno je da je korisnički interfejs za pregled podataka i kreiranje izveštaja preko Web aplikacije.

### **Pitanja za diskusiju:**

1. Šta znači rezervni put za povezivanje pet mrežnih koncentratora sa SCADA sistemom u Centru upravljanja preko PDR-a (Packet Data Radio) višeg nivoa?

2. Da li su svi objekti srednje naponske ravni na teritoriji distributivnog područja Beograd obuhvaćeni PDR (Packet Data Radio) za povezivanje RTU-ova u tim objektima sa koncentratorskim sistemima lociranih na pet lokacija (Rudo, Avala, Obrenovac, Zemun i Kosmaj)?
3. Da li su prema saznanju autora, u Elektrodistribuciji Srbije napravljeni neki koraci (studije, projekti ...) u pogledu integracije nekih servisa u jedinstvenu multiservisnu mrežu baziranu na IP tehnologiji?

## **D2.12 PRIMENA VREMENSKE SINHRONIZACIJE IEEE 1588 PRI KORIŠĆENJU STANDARDA IEC 61850 U TELEZAŠTITNIM UREĐAJIMA**

**Autori: Anka Kabović, Milenko Kabović, Vladimir Čelebić, Iva Salom, Srđan Mitrović**

U radu su prikazane mogućnosti realizacije PTP protokola (Precision Time Protocol) u okviru CPU modula telezaštitnog uređaja TZ- 600 prilagođenog za rad po standard IEC 61850 sa prikazom njegovog testiranja u okviru jedne realizacije.

### **Pitanja za diskusiju:**

1. S obzirom da su u radu dati rezultati laboratorijskog ispitivanja protokola PTP (Precision Time Protocol) po standardu IEEE 1588v2, a poznato je, da u mreži EMS-a za prenos signala telezaštite postoje montirani uređaji TZ-600, da li se predviđa testiranje PTP protokola u nekoj trafo stanici koja radi po protokolu IEC 61850, a gde bi se izvršila nadogradnja sa nadpločicom za CPU modul telezaštitnog uređaja? Na nadpločici bi komponenta DP83640PHY bila podešena za rad sa optičkim interfejsom.

## **D2.13 PRMENA IP MPLS MREŽE EPS-A ZA OBEZBEĐENJE KOMUNIKACIONIH POTREBA**

**Autori: Danilo Lalović, Vesna Vukićević, Ivan Vukadinović, Zlatko Mitrović, Miodrag Jevtić, Dalibor Mitić**

S obzirom da je u EPS-u u eksploataciji već duži niz godina mreža IP MPLS, a koristeći njenu fleksibilnost i skalabilnost, u radu je dat detaljan opis uvođenja novog Internet servisa kao i dodavanje dva nova objekta u mrežu IP MPLS, ED Velika Plana i TS Bela Crkva, a u cilju što boljeg iskorišćenja velikog saobraćajnog kapaciteta postojeće infrastrukture.

### **Pitanja za diskusiju**

1. Da li je određen poseban skup opsega IP adresa za propuštanje Internet servisa korisnika na nivou IP MPLS mreže?
2. Na koji način se nadgleda opterećenje linkova u IP MPLS mreži EPS-a i prati uticaj internet servisa na zauzeće linkova?
3. Koji servisi su propušteni iz ED Velika Plana kroz IP MPLS i kako se štiti saobraćaj od ED Velika Plana do ulaska u DWDM mrežu u TE Morava (slika 3)?

**Redosled izlaganja referata je kao u izveštaju.**



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.276M](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.276M)

D2 01

## PRIMENA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE ZA OBRADU IC SLIKA U DALJINSKOM MONITORINGU TEMPERATURE

SAŠA D. MILIĆ\*  
ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT NIKOLA TESLA, UNIVERZITET U BEOGRADU  
MIŠA KOŽIČIĆ  
AD “ELEKTROPRIVREDA SRBIJE”, OGRANAK HE ĐERDAP

BEOGRAD

SRBIJA

*Kratak sadržaj* — Današnji tehnološki razvoj pruža niz mogućnosti industrijskih primena infracrvenih kamera za brzo snimanje pokretnih industrijskih objekata, pružajući informacije o temperaturnim raspodelama tih objekata. Ove informacije se mogu koristiti za otkrivanje zagrejanih i/ili pregrejanih površina u realnom vremenu čime se pruža mogućnost brze detekcije kvara i eventualnog praćenja njegovog gradijenta sa ciljem buduće predikcije. U radu je opisana metodologija primene veštačke inteligencije u analizi infracrvenih slika za daljinski monitoring temperature. Predložena metodologija treba da omogući praktično unapređenje postojećeg mernog sistema. Unapređenje bi se zasnivalo na zameni postojećeg optičkog mernog sklopa infracrvenom industrijskom kamerom i na implementaciji mernog algoritma za analizu slike u realnom vremenu i pronalažanje pregrejanih polova rotora hidrogenatora. Dat je osnovni prikaz nekoliko pristupa u primeni modela mašinskog učenja za obradu slika i video zapisa. Detaljno su prikazana dva osnovna koncepta i jedan detekcioni algoritam: koncept zasnovan na konvolucijskim neuronskim mrežama, koncept zasnovan na dva tipa autoenkoderskih mreža i koncept YOLO algoritma za složenu klasifikaciju i detekciju objekata. Detaljno su analizirani predloženi koncepti i algoritam sa ciljem praktičnog unapređenja postojećeg monitoring sistema uvažavajući osnovne zahteve: unapređenje funkcionalnosti uz zahtevanu pouzdanost i jednostavnost održavanja.

---

\* Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija  
[s-milic@ieent.org](mailto:s-milic@ieent.org)

***Ključne reči*** — Infracveno merenje temperature, hidrogenerator, veštačka inteligencija, konvolucijske neuronke mreže, konvolucijski autoenkoder, varijacioni autoenkoder, YOLO algoritam.

## 1 UVOD

Daljinski monitoring temperature je postao ključan za veliki broj industrijskih i energetskih procesa. Infracrveni detektori i kamere omogućavaju neinvazivno merenje temperature na daljinu, što je ključno za identifikaciju potencijalnih problema povezanih sa neželjenim porastom temperature [1]. Sa velikom količinom podataka i infracrvenih slika, koji se generišu primenom raznih mernih i nadzornih sistema, stvaraju se uslovi za primenu brojnih modela i algoritama zasnovanih na veštačkoj inteligenciji. Pomenuti modeli služe za analizu različite vrste podataka (vremeskih serija i infracrvenih slika), detekciju pregrejanih površina i predikciju porasta temperature.

Sistemi za praćenje temperature sa algoritmima za donošenje odluka igraju ključnu ulogu u održavanju proizvodne efikasnosti i sigurnosti generatora u hidroelektranama. Planirano periodično održavanje je dugo bilo primarna, ako ne i jedina, strategija održavanja koja se koristila u hidroelektranama. Danas su to strategije koje se zasnivaju na praćenju parametara u realnom vremenu, njihovoj predikciji i računanju verovatnoće pojave kvara i otkaza [2,3].

Rad u osnovi analizira primenu infracrvenih industrijskih kamera za praćenje i merenje zagrejanosti plova rotora hidrogeneratora u radu. Problem zagrejanosti polova je analiziran u brojnim radovima autora, a postojeći sistem se zasniva na temperaturnom monitoring sistemu koji se sastoji od infracrvenog detektora, optičkog objektiva, elektromehaničkih sklopova sa etalonskim crnim telom i procesorskom jedinicom [4-6]. U radu je dat pregled nekoliko praktično primenljivih modela i algoritama za analiziranje infracrvenih slika sa ciljem merenja temperature i detekcije pregrejanih polova rotora hidrogenatora. Prikazani modeli će se pre svega oslanjati na konvolucijske neuronske mreže, autoenkoderske mreže, varijacione autoenkodere i YOLO detekcione algoritme poslednje generacije.

## 2 EKSPLOATACIONI USLOVI I TEHNIČKI ZAHTEVI

Infracrvene (IC) kamere funkcionišu na principu detekcije infracrvenog zračenja, koje svi objekti emituju u zavisnosti od svoje temperature. IC kamera promenom kontrasta i/ili promenom boja piksela slike prikazuje temperaturnu raspodelu snimanog objekta. Rezultat je termografska slika na kojoj se tople i hladne tačke jasno razlikuju.

IC kamere se masovno koriste u preventivnom održavanju. Njihova sposobnost da identifikuju pregrejane objekte u ranoj fazi pomaže u prevenciji kvarova na elektroenergetskoj opremi (visokonaponski motori, transformatori, generatori, kotlovi, električni spojevi, itd.). Rano otkrivanje problema smanjuje rizik od neplaniranih zastoja i produžava vek trajanja opreme. Identifikovanjem izolacionih nedostataka i toplotnih gubitaka, moguće je smanjiti energetske gubitke i poboljšati ukupnu efikasnost postrojenja. IC kamere omogućavaju monitoring opreme bez potrebe za bliskim kontaktom (visok napon, rotacione mašine, opasne materije i sl.).

### 2.1 Izbor IC kamere

Infracrvene kamere predstavljaju nezamenljiv alat u savremenoj industriji, pružajući mogućnost preciznog merenja temperature i detekcije pregrejanih elemenata. Osnovni uslovi

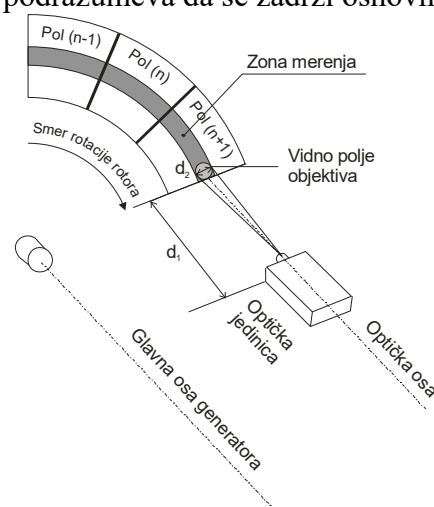
za izbor IC kamera za merenje temperature u industrijskim pogonima podrazumevaju ispunjenje sledećih kriterijuma:

1. Opseg merenja temperature.
2. Optičke karakteristike (vidno polje, zumiranje i rastojanje)
3. Rezolucija termografske slike.
4. Spektralni odziv - odziv kamere u određenom spektralnom opsegu.
5. Brzina snimanja (frame rate).
6. Tačnost i ponovljivost merenja.
7. Automatsko detektovanje toplih polja na slici.
8. Robusnost i izdržljivost na industrijske smetnje, vibracije i atmosferske uslove.
9. Kalibracija i održavanje.
10. Integracija sa drugim sistemima.
11. Dimenzije kamere i ugradnja.
12. Softverska podrška.

Pored prethodno navedenih karakteristika, moderne IC kamere imaju brojne mogućnosti u zavisnosti od oblasti primene i potrebe korisnika. Jedna od važnih osobina IC kamere za merenje temperatura pokretnih objekata je tzv. *line scan* funkcija koja se primarno koristi za monitoring pokretnih (pravolinijskih ili rotacionih) objekata. Ova funkcija omogućava samotrigovanje i sekvencijalno snimanje.

## 2.2 Merna metoda

Nadogradnja mernog sistema podrazumeva da se zadrži osnovna merna koncepcija (Sl.1).



Slika 1. Merenje temperature polova rotora hidrogenatora [7]

Postojeći merni sklop bi se zamenio IC kamerom. Obrada slike bi se vršila delimično u samim kamerama, a delimično u industrijskom računaru pomoću odgovarajućeg softvera. Za dublju analizu slike bi se primenili neki od modernih tehnika i algoritama.

## 3 MODELI MAŠINSKOG UČENJA ZA ANALIZU INFRACRVENIH SLIKA

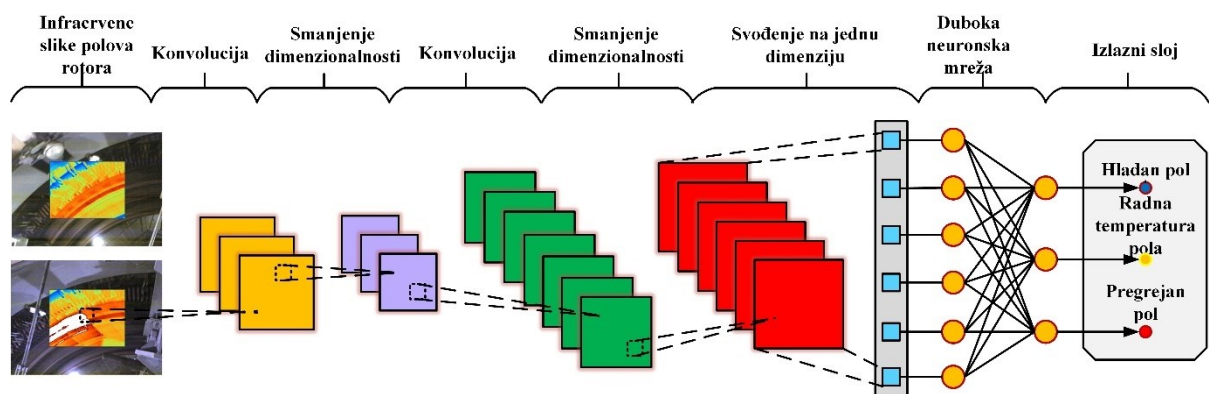
Analiza infracrvenih slika uz pomoć modela mašinskog učenja postaje sve značajnija, posebno pri specijalnim industrijskim zahtevima kao što su detekcija kvara tj. pregrejanih delova, prediktivno održavanje i energetska efikasnost. IC slike prikazuju temperaturne razlike u objektima, omogućavajući vizuelnu identifikaciju toplih i hladnih tačaka. Primena veštačke inteligencije u širem smislu, i mašinsko učenje u užem smislu, pružaju mogućnost detaljnog merenja temperature i detekcije pregrejanih objekata. Neki od najznačajnijih modela uključuju:

1. Konvolucione Neuronske Mreže (CNN)
2. Autoenkodere i Varijacione Autoenkodere (VAE)
3. YOLO (You Only Look Once) algoritme

Iako su modeli mašinskog učenja izuzetno moćni, njihova primena na infracrvenim slikama nije bez izazova. Tradicionalan pristup primene pomenutih modela podrazumeva veliku količinu označenih - labeliranih podataka tj. IC slika za treniranje modela.

### 3.1 Konvolucijske neuronske mreže

Konvolucijske neuronske mreže (CNN) i modeli (SI.2) su postali standard za analizu slika, uključujući i infracrvene slike. Zbog svoje sposobnosti da prepoznaju složene obrasce u podacima, CNN modeli se široko koriste za klasifikaciju, segmentaciju i detekciju objekata u IR slikama. Ovi modeli se posebno ističu u prepoznavanju pregrejanih delova u industrijskim aplikacijama, kao što je detekcija pregrejanih polova rotora u hidroelektranama [4,5].



Slika 2. Arhitektura konvolucijske neuronske mreže (CNN)

Upotreba konvolucijskih neuronskih mreža već odavno predstavlja standardan pristup u obradi infracrvenih slika za detekciju pregrejanih površina. Infracrvene (IC) slike pružaju vizualni prikaz raspodele temperature na površini objekta, gde se različite boje ili nijanse sivog koriste za prezentaciju površinske temperaturne raspodele. Različite temperature se prikazuju kroz različite nijanse ili boje na slici. Osnovna arhitektura CNN-a se sastoji od nekoliko ključnih vrsta slojeva:

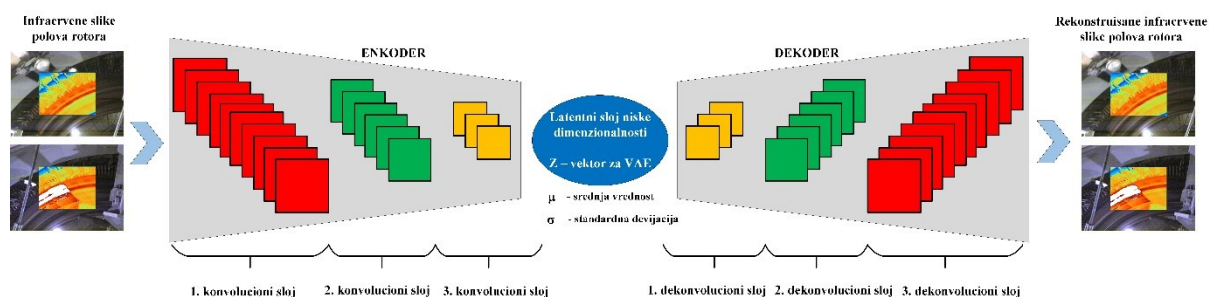
- Konvolucijski sloj (Convolutional Layer) je glavni sloj u CNN arhitekturi. Primenjuje konvolucijsku operaciju na ulazne podatke koristeći niz filtera (kernela) koji prelaze preko slike. Filteri su male matrice (npr. 3x3 ili 5x5) koje se pomiču po cijeloj slici, množeći vrednosti piksela sa predefinisanim vrednostima u filteru i sumirajući rezultate. Rezultat ove operacije je "mapa osobina" (feature map). Cilj konvolucijskog sloja je automatsko učenje filtera radi izdvajanje karakterističnih vrednosti kao što su ivice, teksture ili određeni oblici.
- Aktivacioni sloj (Activation Layer) služi za primenu neke od nelinearnih aktivacionih funkcija na rezultate konvolucije. Najčešće korišćena aktivacijska funkcija je ReLU (Rectified Linear Unit).
- Sloj za smanjenje dimenzija (Pooling Layer) služi za smanjenje dimenzionalnosti mape osobina uz očuvanje najvažnijih informacija. Najčešće korišćene tehnike smanjenja dimenzionalnosti koriste maksimalne ili srednje vrednosti u oblasti matrice koju prekrija filter, smanjujući tako veličinu mape osobina i broj parametara u modelu. „Pooling“ slojevi takode smanjuju mogućnost preučenosti (pretreniranosti) modela.

- Potpuno povezani sloj (Fully Connected Layer) služi kao standardna potpuno povezana neuronska mreža u kojima se naučene osobine koriste za klasifikaciju ili regresiju.
- Izlazni sloj (Output Layer) daje konačni rezultat konvolucije definišići klasu objekta (klasifikacija) ili njegovu vrednost (regresija).

U konkretnom slučaju nadogradnje i unapređenja postojećeg nadzornog sistema za merenje temperatura polova rotora hidrogenatora, biće primenjena klasifikacija u smislu alarmnog signala i regresija u smislu vrednosti temperature na IC slikama polova rotora.

### 3.2 Konvolucijski autoenkodori i varijacioni autoenkodori

Konvolucijski autoenkodori (CAE) i varijacioni autoenkodori (VAE) su konvolucijske neuronske mreže koje se koriste za smanjenje dimenzionalnosti podataka i ekstrakciju relevantnih karakteristika (Sl.3). Konvolucijski autoenkodori koriste konvolucijske slojeve, umesto potpuno povezanih slojeva, da bi enkodovali ulazne podatke. Ova arhitektura je posebno efikasna za obradu slika jer konvolucijski slojevi omogućavaju modelu da nauči prostorne hijerarhije u podacima i koriste konvolucije za obradu višedimenzionalnih podataka.



Slika 3. Arhitektura autoenkodera (CEA i VAE)

Varijacioni autoenkodori (VAE) predstavljaju napredniju verziju autoenkodera, koja omogućava generisanje novih slika na osnovu naučenih karakteristika. U varijacionom autoenkoderu, enkoder mreža ne proizvodi direktno latentne reprezentacije, kao što je slučaj sa konvolucijskim autoenkoderima, već generiše parametre ( $\mu$  - srednju vrednost i  $\sigma$  - standardnu devijaciju) koji definišu Gausovu raspodelu u latentnom prostoru iz koga se formira  $z$  uzorak (1). Funkcija gubitaka kod VAE je definisana Kullback-Leibler (2) divergencijom koja daje meru odstupanja dobijene raspodele u latentnom prostoru od normalne raspodele ( $\mu=0$  i  $\sigma=1$ ).

$$z = \mu + \sigma \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Uzorak  $z$  iz latentnog prostora ( $\varepsilon$  je slučajna promenljiva uzeta iz standardne normalne raspodele sa  $\mu=0$  i  $\sigma=1$ ) se dalje procesira u dekoderu sa ciljem rekonstrukcije ulaznih podataka. Kullback-Leibler divergencija (2) je regularizacioni termin koji formira raspodelu latentnog prostora  $q(z|x)$ , koji je naučio enkoder od ulaznih podataka  $x$ , da bude blizu standardne normalne raspodele  $p(z)$ . Generalna definicija KL divergencije, odnosno odstupanja, između bilo koje dve raspodele je data jednacinom (2). Koristi se kao osnovna formula za sve tipove raspodela tj. distribucija. Posebna forma  $D_{KL}$  divergencije se koristi kada su traži odstupanje uzorka  $z$  iz latentnog prostora od normalne raspodele.

$$D_{KL}(q(z|x) \parallel p(z)) = \int q(z|x) \log \left( \frac{q(z|x)}{p(z)} \right) dz \quad (2)$$



Kada su  $q(z|x) = N(\mu, \sigma^2)$  i  $p(z) = N(0, 1)$ , KL divergencija se analitički uprošćava (3):

$$D_{KL}(q(z|x) \parallel p(z)) = -\frac{1}{2} \sum (1 + \log(\sigma^2) - \mu^2 - \sigma^2) \quad (3)$$

U procesu treniranja je cilj minimizirati ukupnu  $F$  funkciju gubitaka (4), gde je  $E_{q(z|x)}$  očekivana vrednost tj, očekivanje uzorkovanih vrednosti iz distribucije  $q(z|x)$ .

$$F = E_{q(z|x)} [-\log p(x|z)] + D_{KL}(q(z|x) \parallel p(z)) \quad (4)$$

Osiguravanjem da  $q(z|x)$  bude blizu standardne normalne distribucije, model uči kontinuirani i kompaktni latentni prostor. Ovo znači da male promene u latentnom vektoru  $z$  dovode do malih promena u rekonstruisanim uzorcima, omogućavajući glatku interpolaciju i generisanje novih uzoraka. U kontekstu infracrvenih slika, VAE se mogu koristiti za detekciju anomalija upoređivanjem stvarnih slika i procenom greške odstupanja od očekivane vrednosti. Povišena vrednost funkcije gubitaka može da ukazuje na pojavu pregrejanih površina koje nisu postojale i slikama za trening autoenkoder, odnosno za učenje i formiranje uzoraka sa  $p(z)$  raspodelom u latentnom prostoru.

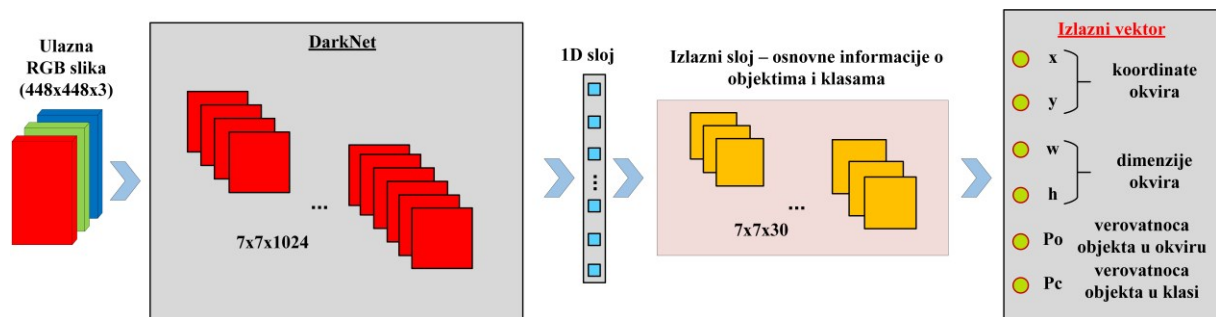
### 3.3 YOLO algoritam za obradu slika

YOLO (You Only Look Once) algoritam služi za detekciju objekata u realnom vremenu i poznat po svojoj brzini i preciznosti. YOLO je algoritam za detekciju objekata koji koristi jedinstvenu konvolucionu neuronsku mrežu (CNN) za istovremeno klasifikovanje i lokalizaciju objekata na slici. Umesto da koristi različite delove mreže za različite zadatke, YOLO koristi jedinstveni model koji istovremeno predviđa granice (bounding boxes) objekata i njihove klase (npr. pojedine podsklopove elektroenergetskog postrojenja, delove generatora, delove transformatora i sl.). YOLO je sposoban da objedini odvojene delove detektovanog objekta u jednu neuronsku mrežu koja koristi karakteristike celokupne slike kako bi predvidela svaki okvir (bounding box). Takođe, istovremeno predviđa sve okvire za sve klase na slici. To znači da ova CNN mreža globalno razmatra celu sliku i sve objekte na njoj [8]. YOLO je veoma brz algoritam koji prilikom detekcije i praćenja objekata može da postigne brzine od oko 150fps [8], pravi malo grešaka u klasifikaciji i skoro da ne pravi greške u smislu lažne detekcije.

Prva verzija YOLO.v1 algoritma (Sl.4) se naglašeno oslanja na DarkNet okvir sastavljenog od niza konvolucijskih slojeva (složena CNN mreža) koji prepoznaju apstraktne osobine objekata neophodne za njegovo detektovanje [9, 10]. Izlaz iz DarkNet mreže se transformiše u 1D niz koji se provlači kroz sledeće potpuno povezane slojeve neuronske mreže dimenzije  $7 \times 7 \times 30$ . Ova mreža služi kao osnova za predviđanja modela, uključujući predviđanja okvira (bounding box), verovatnoće prisustva objekata i verovatnoće klasa (vrste objekata u pojedinim okvirima).

Pretposlednji sloj YOLO.v1 algoritma sa dimenzijom  $7 \times 7 \times 30$  je ključni deo njegove arhitekture, jer predstavlja izlaz mreže koji sadrži sve potrebne informacije za detekciju objekata u slici. Ulazna slika se deli na mrežu (grid) sa  $7 \times 7$  ćelija. Svaka od ovih ćelija je odgovorna za predviđanje informacija o objektima čiji su centri unutar te ćelije. Dakle, mreža sa  $7 \times 7$  ćelija znači da je slika podeljena na 49 delova ili ćelija. Svaka ćelija u mreži  $7 \times 7$  predviđa 30 vrednosti koje zajedno predstavljaju informacije o dva moguća ograničavajuća okvira i 20 klasnih verovatnoća. Ključne informacije potrebne za detekciju i klasifikaciju objekata u slici, koje sadrži pretposlednji sloj u YOLO arhitekturi, su jedinstvena osobina YOLO-a jer mu omogućava da istovremeno detektuje i klasifikuje objekte u jednoj slici, čineći ga brzim i

pogodnim za primene u realnom vremenu. Zahvaljujući svojim sposobnostima brze obrade slika, arhitektura YOLO-a je posebno je pogodna otkrivanje pokretnih objekata, što je neprocenjivo za primenu u daljinskom nadzoru i detekciji pokretnih objekata i delova pogona.



Slika 4. Osnovna arhitektura YOLO.v1

Osnovni princip koji je predložio YOLO-v1 bio je postavljanje mrežnog kvadrata dimenzija  $s \times s$  na sliku. U slučaju da centar objekta od interesa padne u jednu od ćelija mreže, ta određena ćelija bi bila odgovorna za detekciju tog objekta. Ovo je omogućilo drugim ćelijama da zanemare taj objekat u slučaju višestrukih pojavljivanja. Za implementaciju detekcije objekata, svaka ćelija mreže bi predviđala  $N$  uokvirenih pravougaonika (bounding boxes) zajedno sa dimenzijama i ocenama poverenja [10–13]. Ocena poverenja ukazivala bi na prisustvo ili odsustvo objekta unutar uokvirenog pravougaonika. Stoga se ocena poverenja  $OP$  može izraziti kao (5) odnos površina preseka i unije dva uokvirenog pravougaonika koji delimično ili u celosti sadrže isti objekat iste klase.

$$OP = \frac{P_{presek}}{P_{unija}} \quad (5)$$

Algoritmi za detekciju objekata obično generišu više uokvirnih pravougaonika oko istog objekta sa različitim ocenama poverenja. Postoje razne optimizacione tehnike za smanjenje broja preklapajućih pravougaonika koji sadrže isti objekat, kako bi se poboljšao kvalitet detekcije [14].

Razvojem od prvog do trenutno najnovijeg YOLO.v8 modela se kretao u više pravaca od kojih je najznačajniji razvoj grupe tehnika i metoda u cilju unapređenja optimizacionih tehnika kako bi noviji modeli bili brži i kako bi tačnije detektovali i klasifikovali više objekata po jednoj slici (frame) u video zapisu. YOLO.v8 se ističe boljim protokom uz sličan broj parametara, što ukazuje na efikasnije iskorišćenje hardverskih resursa, bolja konceptualna rešenja i pouzdanijim donošenjem zaključaka (izlazne vrednosti algoritma) u realnom vremenu. S obzirom na svoje osobine, ovaj algoritam je usmeren na implementaciju u uređajima direktno u pogonu kao što su merni uređaji i nadzorne kamere. U skladu sa prethodno rečenim, primena YOLO algoritma za procesiranje infracrvenih slika omogućava brzo prepoznavanje i lokalizaciju anomalija tj. zagrejenih/pregrejenih površina, što je posebno važno u aplikacijama gde su brzina i tačnost ključni, kao što su sigurnosne provere i monitoring opreme u realnom vremenu.

## 4 MODELOVANJE SCENARIJA DETEKCIJE PREGREJANOG POLA HIDROGENERATORA

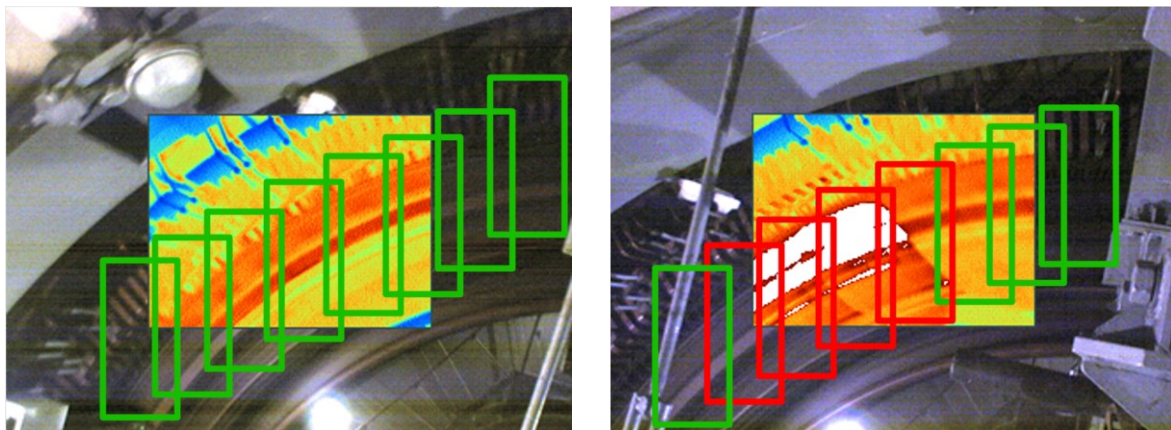
Modelovanje budućeg rešenja unapređenja postojećeg nadzornog sistema za mernje temperatura polova rotora hidrogeneratora i detekcije pregrejanih površina se sastoji od dva ključna koraka. Prvi se odnosi na izbor IC kamera, a drugi na programsko rešenje za obradu IC slika, selekciju klasa objekata i detekcije pregrejanih površina zahtevane klase prethodno detektovanih objekata.

### 4.1 Izbor infracrvenih kamera

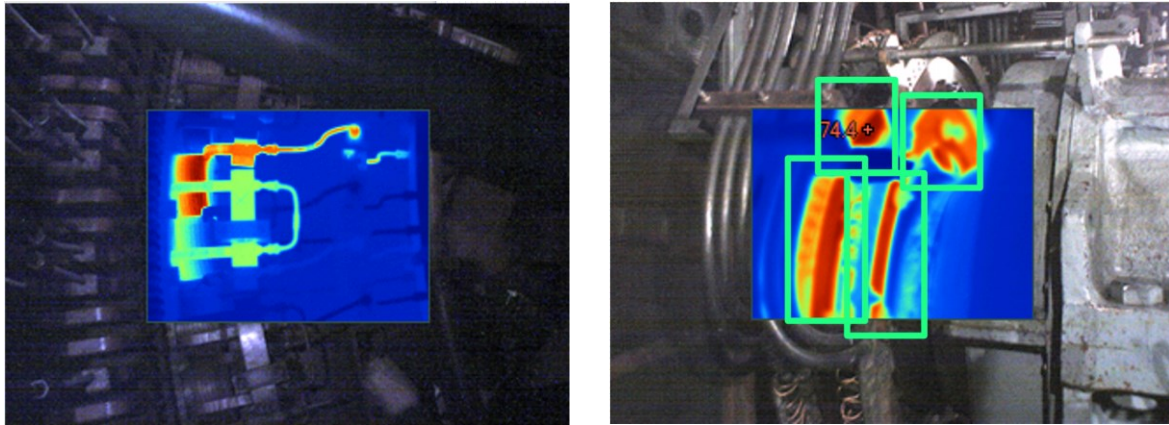
Postoji veći broj različitih komercijalnih vrsta termovizijskih kamera koje se koriste za različite primene u industriji, medicini, saobraćaju itd. Zajedničke osobine većine IC kamera se svode na snimanje objekata (stacionarnih i pokretnih) i automatski prikaz i izračunavanje površinskih temperatura tih objekata. Većina konstrukcija IC kamera se zasniva na dvodimenzionalnim FPA (Focal Plane Array) detektorima za snimanje i merenje IC zračenja i formiranje termalnih slika koristeći sofisticirane programske alate koji u sebi, manje ili više, koriste detekcione algoritme i modele za donošenje odluka na bazi veštačke inteligencije. Pri izboru IC kamera posebna pažnja mora biti posvećena kvalitetu kontrasta detalja s kojim objekat može biti predstavljen na slici, pošto je kod infracrvenih kamera, za razliku od kamera za „dnevno snimanje“, termalni kontrast od većeg značaja. Takođe je bitna veličina površine (broj piksela) detektora za „snimanje“ energija IC zračenja. Visokokvalitetni IC objektivni omogućavaju veće rastojanje kamere od merenog objekta, sa istim brojem piksela detektora, ili preciznije merenje temperature manjih struktura i objekata. Ukratko, odnos vidnog polja kamere (objektiva), rastojanja kamere od posmatranog objekta i broj aktivnih piksela detektora moraju biti u saglasju da bi se postigla žerljena rezolucija snimka i zahtevana tačnost merene temperature.

### 4.2 Primena YOLO algoritma za detekciju pregrejanih površina pokretnih objekata

Umesto postojećeg mernog algoritma koji podrazumeva primenu IC mernog sistema sa tačkastim detektorom, vidnim poljem od 5cm i 100 uzoraka (semplova) po jednom vidnom polju, jedno od mogućih rešenja za unapređenje je primena brze IC kamere (bar 30fps) sa implementiranim YOLO algoritmom (Sl.5) Uokvirene površine detekcije bi selektovale pregrejan pol kao jednu od klasa objekata koje bi kamera posmatrala. Moguća je primena kamera i za druge klase objekata (Sl.6) kao što su stacionarno merenje pregrejanog pola [4-6] dok je agregat zaustavljen ili detekcija temperatura kliznih prstenova i četkica dok je agregat u radu.



Slika 5. Princip detekcije objekata YOLO algoritam



Slika 6. Princip višeklasne detekcije YOLO algoritma: leva slika - pregrejan pol kada je generator zaustavljen, desna slika: - klizni kontakti i četkice generatora u radu

YOLO algoritam ima mogućnost istovremene višeklasne detekcije čime se otvaraju velike mogućnosti primene samo jedne kamere za više objekata u pogonu. Glavna ograničenja su IC objektiv kamere, odnosno vidno polje kamere i brzina snimanja.

## 5 ZAKLJUČAK

Primena industrijskih infracrvenih kamera u hidroelektranama ima ključan značaj za praćenje temperature i detekciju pregrejanih objekata, posebno kritičnih komponenta poput rotora hidrogenatora. Ove kamere omogućavaju beskontaktno i precizno merenje temperature u realnom vremenu, što je od koristi u ranom otkrivanju anomalija i pregrevavanja. Pravovremena detekcija pregrejanih površina sprečava ozbiljne kvarove, produžava radni vek opreme i smanjuje neplanirane zastoje. Infracrvene kamere predstavljaju važan alat u preventivnom održavanju i povećanju efikasnosti rada hidroenergetskih postrojenja.

Primena naprednih algoritama mašinskog učenja i dubokog učenja pokazala je značajan potencijal u obradi i analizi infracrvenih slika. U ovom radu je istražena mogućnost primene veštačke inteligencije (VI) u obradi infracrvenih slika u daljinskom nadzoru temperatura polova rotora hidrogenatora. Cilj istraživanja je bio da se napravi uži izbor adekvatnih metoda mašinskog učenja koje mogu pouzdano i efikasno analizirati infracrvene slike kako bi se omogućilo rano otkrivanje potencijalnih kvarova i nepravilnosti u radu hidrogenatora.

Prikazana analiza konvolucijskih neuronskih mreža, dva tipa autoenkoderskih mreža i YOLO algoritma za detekciju i klasifikaciju objekata na slikama i video zapisima, jasno opravdava primenu veštačke inteligencije u merenju temperature i detekciji pregrejanih polova rotora hidrogenatora. Ovi modeli pokazali su visoku preciznost i efikasnost u analizi infracrvenih slika, omogućavajući pravovremeno prepoznavanje potencijalno kritičnih zona pregrevavanja. Primenom CNN-a za ekstrakciju karakteristika, autoenkodera za detekciju anomalija, i YOLO algoritma za lokalizaciju u realnom vremenu, moguće je značajno unaprediti održavanje i sigurnost hidrogenatora. Ovi alati doprinose produženju radnog veka opreme i smanjenju nivoa operativnih rizika. Dalje istraživanje u ovoj oblasti bi trebalo da se fokusira na unapređenje algoritama kako bi se postigla još veća preciznost u detekciji i smanjenje grešaka usled šuma u infracrvenim slikama. Takođe, primena ovih tehnologija mogla bi se proširiti na druge industrijske oblasti gde je praćenje temperature ključno za sigurnost i pouzdanost opreme. Kroz optimizaciju i adaptaciju ovih modela, moguće je ostvariti značajne uštede u održavanju i povećati sigurnost rada u energetskom sektoru.

## 6 REFERENCE

- [1] S. Milić, N. Miladinović, “**Daljinski monitoring temperature u elektroenergetskim sistemima**”, Zbornik radova: Međunarodni naučno-stručni simpozijum Informacione tehnologije - Infotech 2009, Vol. 8, Ref. D-11, strane: 333-336, Jahorina, Republika Srpska, mart 2009.
- [2] S. Milić, M. Kožicić, “**AI-Based Temperature Monitoring System for Hydro Generators**”, In Proceedings of the 23rd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 20-22 March 2024. DOI: 10.1109/INFOTEH60418.2024.10496027.
- [3] A. Betti, E. Crisostomi, G. Paolinelli, A. Piazzini, F. Ruffini, M. Tucci, “**Condition monitoring and predictive maintenance methodologies for hydropower plants equipment**”, *Renewable Energy*, Vol. 171, 2021, pp. 246–253.
- [4] S. Milić, A. Žigić, M. Ponjavić, “**On-line Temperature Monitoring, Fault Detection and a Novel Heat Run Test of Water-Cooled Rotor of Hydrogenerator**”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 28, 2013, pp. 698–706. DOI: 10.1109/TEC.2013.2265262,
- [5] S. Milić, D. Kovačević, N. Karanović, Z. Kršenković, M. Kožicić, “**Sistem za temperaturni monitoring namotaja rotora hidrogeneratora**”, *Elektroprivreda*, Vol. 2, April-Jun 2009, UDK: 621.31, strane: 29-37.
- [6] S. Milić, “**Daljinski temperaturni nadzor polova rotora hidrogeneratora**”, *Zbornik radova instituta “Nikola Tesla”*, knjiga 19, strane: 271-283, Beograd, 2008-2009.
- [7] S. Milić, M. Srećković, N. Karanović, Z. Kršenković, J. Marković-Petrović, “**On-line Remote Monitoring of Generators and Transformers in Energy Power Systems**”, Zbornik radova: Elektrane 2010, međunarodna konferencija, Vrnjačka Banja, Srbija, 26–29. oktobar 2010.
- [8] J. Redmon; S. Divvala, R. Girshick A. Farhadi, “**You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection**”, In Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 27-30 June 2016. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [9] M. Safaldin, N. Zaghden, M. Mejdoub, “**An Improved YOLOv8 to Detect Moving Objects**”, *IEEE Access*, Vol. 12, 2024, pp. 59782 –59806. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3393835.
- [10] H. Muhammad, “**YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature Toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection**”, *Machines*, Vol. 11, 2023, 677. DOI: 10.3390/machines11070677.
- [11] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi, “**You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection**”, In Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016; pp. 779–788.
- [12] A. Vidyavani, K. Dheeraj, M. R. M. Reddy, K. N. Kumar, “**Object Detection Method Based on YOLOv3 using Deep Learning Networks**”, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, Vol. 9, 2019, pp. 1414–1417.
- [13] M. Vajgl, P. Hurtik, T. Nejezchleba, “**Dist-YOLO: Fast Object Detection with Distance Estimation**”, *Applied Sciences*, Vol. 12, 2022, 1354. DOI: 10.3390/app12031354.
- [14] J. Terven J, D-M Córdova-Esparza, J-A Romero-González, “**A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS**”, *Machine Learning and Knowledge Extraction*. Vol. 5, 2023; pp. 1680–1716. DOI: 10.3390/make5040083.



# APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR IR IMAGE PROCESSING IN REMOTE TEMPERATURE MONITORING

SAŠA D. MILIĆ\*

ELECTRICAL ENGINEERING INSTITUTE NIKOLA TESLA, UNIVERSITY OF  
BELGRADE, SERBIA

MIŠA KOŽIČIĆ

EPS JSC BELGRADE, HPPS ĐERDAP, KLADOVO, SERBIA

BELGRADE

SERBIA

*Abstract*— Today's technological advancements offer a range of industrial applications for infrared (IR) cameras to quickly capture moving industrial objects, providing information about the temperature distributions of these objects. The IR cameras can detect heated and/or overheated surfaces in real time, enabling rapid fault detection and the potential monitoring of its gradient for future predictions. The paper describes the methodology for the application of artificial intelligence in the analysis of infrared images for remote temperature monitoring. The proposed methodology should improve the existing measurement system. The improvement would be based on replacing the current optical measurement assembly with an infrared industrial camera and a real-time image analysis measurement algorithm for detecting overheated rotor poles of the hydro generator. A basic presentation of several approaches in the application of machine learning models for image and video processing is given. Two fundamental concepts and one detection algorithm are presented in detail: a concept based on convolutional neural networks, a concept based on two types of autoencoder networks, and the YOLO algorithm for the classification and detection of complex objects. The advantages and disadvantages of the proposed concepts and detection algorithm are analyzed in detail to practically improve the existing monitoring system and take into account the key requirements: improving the functionality while ensuring the required reliability and ease of maintenance.

*Key words* — Infrared temperature measurement, hydrogenerator, artificial intelligence, convolutional neural networks, convolutional autoencoder, variational autoencoder, YOLO algorithm.

---

\* Koste Glavinića 8a, 11000 Belgrade, Serbia  
[s-milic@ieent.org](mailto:s-milic@ieent.org)



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.287R](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.287R)

**D2 02**

**STANDARDI SERIJE ISO 22300 I OBEZBEĐENJE  
KONTINUITETA POSLOVANJA U ELEKTROPRIVEDNIM SISTEMIMA**

**Dr RADOSLAV RAKOVIĆ\***  
**ENERGOPROJEKT ENTEL A.D.**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

***Kratak sadržaj*** — Elektroprivredni sistemi predstavljaju infrastrukturne sisteme koji su od ogromnog značaja za kvalitet života stanovništva. U skladu sa tim, svaki oblik poremećaja, a posebno katastrofični događaji poput zemljotresa, požara, poplava, ratnih sukoba, terorističkih napada, cyber napada i slično može da izazve nesagledive posledice kako za bezbednost opreme i sistema, tako i za bezbednost ljudi. Da bi se obezbedio kontinuitet poslovanja elektroprivrednih organizacija i nakon ovakvih događaja, neophodno je primeniti čitav niz mera organizaciono - tehničke prirode. U tom smislu, dragocen okvir predstavljaju standardi serije ISO 22300 za menadžment kontinuitetom poslovanja. U radu je dat kratak pregled navedene familije standarda a zatim su razmotreni aspekti njihove primene u elektroprivrednim organizacijama.

***Ključne reči*** — Elektroprivredni sistemi, Poremećaji, Katastrofe, Kontinuitet poslovanja, Disaster Recovery sistemi

**„Kad plane požar, nema vremena za obučavanje vatrogasaca, treba gasiti vatru!”**

---

\* Bulevar Mihaila Pupina 12, 11070 N.Beograd, tel:3101-216, e-mail:rrakovic@ep-entel.com

## 1. UVOD

Elektroprivredni sistemi (engl. *Electric Power Utilities* – EPU) kao infrastrukturni sistemi u značajnoj meri utiču na kvalitet života stanovništva. U skladu sa tim, svaki poremećaj u ovim sistemima, koji dovodi do dužeg ili kraćeg prekida u radu, može imati nesagledive posledice po bezbednost sistema, opreme i ljudi. To se posebno odnosi na poremećaje katastrofičnog tipa kao što su zemljotresi, požari, poplave, ratni sukobi, teroristički napadi, sajber napadi i slično. Da bi se obezbedio kontinuitet poslovanja elektroprivrednih organizacija i nakon ovakvih događaja neophodno je primeniti čitav niz mera organizaciono-tehničke prirode. U tom smislu, dragocen okvir predstavljaju standardi serije ISO 22300 za menadžment kontinuitetom poslovanja.

Suštinu ovih standarda slikovito predstavlja izreka koja je odabrana za moto ovoga rada – organizacije moraju da budu pripremljene na to kako će reagovati u slučaju nastupanja vanrednih događaja, kada nastupi događaj nema vremena za dogovore, planove i obuke, jer tada mora da se reaguje brzo kako bi se posledice svele na što je moguće manju meru. U poslednjih desetak godina imali smo bar tri veoma ozbiljna poremećaja u našem neposrednom okruženju, velike poplave 2014. i 2016. godine i period pandemije, a u novije vreme sve češće se suočavamo sa ekstremnim vremenskim (ne)prilikama. Sve te okolnosti nas upućuju na zaključak da rezultat koji postizemo neretko ne zavisi od toga kako radimo kada je sve u redu, već kako reagujemo onda kada nije!

U radu je dat kratak pregled familije ISO standarda koja se odnosi na obezbeđenje kontinuiteta poslovanja, a zatim su razmotreni aspekti njihove primene u elektroprivrednim organizacijama.

## 2. STANDARDI ZA OBEZBEĐENJE KONTINUITETA POSLOVANJA

Koncept kontinuiteta poslovanja (engl. *Business Continuity*) predmet je posebnih standarda serije ISO 22300 ([1]-[3]). Kao i kod ostalih menadžment standarda, jedan od standarda odnosi se na terminologiju [1], jedan na zahteve [2], jedan na smernice za implementaciju zahteva [3], a ostali standardi serije obično su orijentisani na neke specifične oblasti primene standarda, slika 1.



Slika 1: Standardi serije ISO 22300 (Izvor: Autor)

U suštini, ovi standardi orijentisani su na prilagodljivost organizacije (engl. *Resilience*) kako bi se pripremila da reaguje na katastrofe (engl. *Disaster*), a posebno da obezbedi oporavak organizacije i nastavak rada i nakon ovih događaja (engl. *Disaster Recovery* – DR). Osnovni pojam – kontinuitet poslovanja – definisan je kao „sposobnost organizacije da



nastavi da isporučuje proizvode ili usluge na prihvatljivom, prethodno definisanom, nivou i nakon remetilačkog incidenta ([1], definicija 3.1.19)“.

Jasno je da obezbeđenje kontinuiteta poslovanja ne može biti samo jedna aktivnost, s obzirom da je reč o kompleksnom problemu koji obuhvata čitav niz pitanja koje treba razrešiti. Zato je to predmet jedne posebne oblasti koja je poznata kao upravljanje kontinuitetom poslovanja (engl. *Business Continuity Management* – BCM), koja je definisana kao „proces implementacije i održavanja kontinuiteta poslovanja“ ([1], definicija 3.1.20). To praktično znači da je u pitanju sveukupni menadžment proces koji identifikuje potencijalne pretnje organizaciji i uticaje na poslovne aktivnosti koje te pretnje mogu prouzrokovati ako se ostvare i koji stvara okvir za prilagodljivost organizacije sa sposobnošću adekvatnog reagovanja na ove pretnje i za zaštitu interesa svih zainteresovanih strana, reputacije, brenda i aktivnosti koje stvaraju vrednost.

Već je ukazano da su najkritičniji događaji katastrofičnog karaktera. Katastrofa je definisana kao „situacija sa ogromnim ljudskim, materijalnim, ekonomskim ili gubicima vezanim za okruženje koja prevazilazi sposobnosti organizacije, zajednice ili društva da na njih reaguje i da se oporavi korišćenjem sopstvenih resursa ([1], definicija 3.1.73)“. Da bi organizacija mogla da se oporavi od ovakvih događaja, ona mora unapred da pripremi određene strategije i operativne planove koje će aktivirati kada događaj nastupi.

Sve ostale definicije navedene su u standardu [1] – ima ih ukupno 360, svrstanih u četiri celine. Najviše definicija odnosi se na bezbednost i prilagodljivost (297), zatim na akcizne markice protiv falsifikovanja robe (engl. *Counterfeiting*) (44), na lanac snabdevanja (13) i televiziju zatvorenog kruga (CCTV) (6).

Standard sa zahtevima za kontinuitet poslovanja ISO 22301 [2] ima strukturu koja je standardizovana na nivou svih menadžment standarda koje objavljuje Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) u skladu sa Aneksom SL [4]. Naime, reč je o jedinstvenoj strukturi standarda sa ukupno 10 glava, od kojih prve tri ne sadrže zahteve, Tabela 1.

Tabela 1: Struktura i sadržaj standarda ISO 22301 (Izvor: Autor)

Gl.	Naslov	Okvirni sadržaj
1	Obuhvat	
2	Normativne reference	
3	Termini i definicije	31 opšti termin + referenca na ISO/IEC 22300
4	Kontekst organizacije	Eksterna i interna pitanja, zainteresovane strane i obim sistema za menadžment kontinuitetom poslovanja
5	Liderstvo	Liderstvo i posvećenost, politika, uloge, odgovornosti i ovlašćenja
6	Planiranje	Rizici i prilike, ciljevi kontinuiteta poslovanja i planovi za ostvarenje, planiranje izmena
7	Podrška	Resursi, kompetentnost, svest, komuniciranje, dokumentovane informacije
8	Operacije	Operativno planiranje i upravljanje, analiza uticaja i ocenjivanje rizika, strategije, rešenja, planovi i procedure kontinuiteta poslovanja, program vežbi i vrednovanje dokumentacije
9	Vrednovanje performansi	Praćenje, merenje, analiza i vrednovanje, interne provere, preispitivanje od strane rukovodstva
10	Poboljšanje	Neusaglašenosti i korektivne mere, poboljšanja

Glava 8 je segment po kome se menadžment standardi najviše razlikuju, s obzirom da se u toj glavi najviše iskazuju specifičnosti oblasti na koju se menadžment sistem odnosi. Tako je i u slučaju kontinuiteta poslovanja, gde ova glava sadrži 6 poglavlja, slika 2.



Slika 2: Struktura glave 8: Operacije u okviru standarda ISO 22301 (Izvor: Autor)

U poglavlju 8.1 Operativno planiranje i upravljanje utvrđuju se opšti okviri za planiranje, primenu i upravljanje procesima kako bi se ostvarile planske postavke, predviđene u glavi 6, sa posebnim akcentom na uspostavljanju kriterijuma za procese i čuvanje dokumentovanih informacija.

Poglavlje 8.2 Analiza uticaja i ocenjivanje rizika tretira veoma značajan element BCM – Analizu uticaja na poslovanje (engl. *Business Impact Analysis – BIA*) i ocenjivanje rizika (engl. *Risk Assessment*). Analiza uticaja predstavlja „proces analize poslovnih funkcija i efekata koje poremećaj poslovanja može da ima na njih ([1], definicija 3.1.24)“ a veličina tog uticaja iskazuje se kroz nivo rizika. U okviru ovih analiza organizacija mora da definiše maksimalno podnošljivo vreme prekida ključnih funkcija (engl. *Maximum Tolerable Period of Disruption - MTPD*) kako bi kroz mere obezbeđenja kontinuiteta poslovanja mogla da obezbedi da ciljno vreme oporavka (engl. *Recovery Time Objective - RTO*) bude kraće od maksimalno podnošljivog intervala prekida ( $RTO < MTPD$ ).

Na osnovu rezultata analize uticaja i ocenjivanja rizika, u poglavlju 8.3 Strategije i rešenja za kontinuitet poslovanja predviđeno je da se identifikuju i odaberu strategije za obezbeđenje kontinuiteta poslovanja kojima se razmatraju opcije koje se koriste pre, tokom i posle poremećaja. Te strategije moraju da se sastoje od jednog ili više rešenja (pristupi, aranžmani, metode, procedure, postupanje i aktivnosti za implementaciju startegija), a rešenja se mogu primenjivati u jednoj ili više strategija.

Strategije i rešenja definisana u okviru poglavlja 8.3 konkretizuju se u okviru poglavlja 8.4 u planove i procedure kontinuiteta poslovanja. Tim planovima definišu se scenarija koja predstavljaju „prethodno planirani mogući tok događaja koji pokreće pripreme aktivnosti i podstiče organizacije za dostizanje ciljane performanse ([1], definicija 3.1.234)“. Kao i u svim planovima, definišu se procedure postupanja u slučajevima nastanka tih scenarija, uz definisanje onih koji su za to zaduženi i sredstava koje za to treba obezbediti. Ključni rezultat predstavlja Plan kontinuiteta poslovanja – PKP (engl. *Business Continuity Plan – BCP*) koji

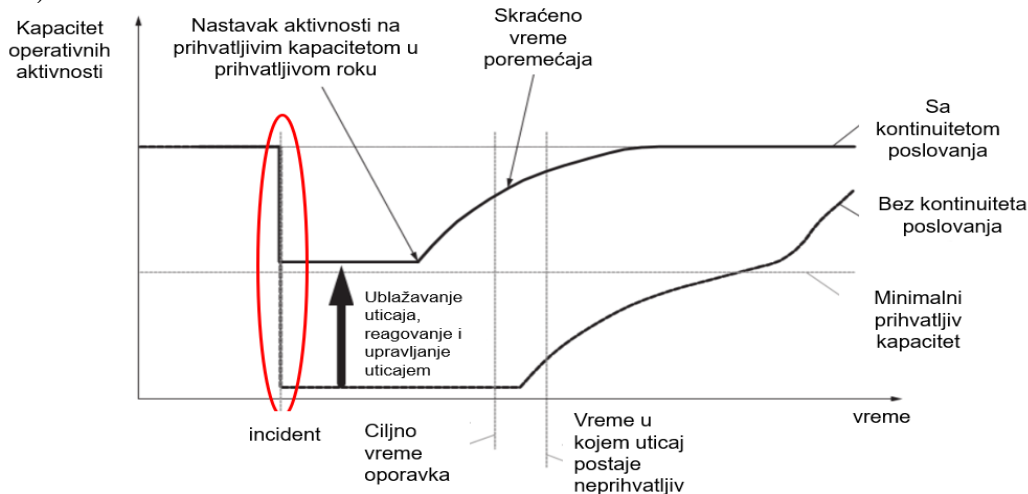
se definiše kao “dokumentovani postupci koje usmeravaju organizaciju da bude pripremljena da reaguje, oporavi, obnovi i rekonstruiše svoje aktivnosti na prethodno definisan nivo i nakon remetilačkog poremećaja ([1], definicija 3.1.22)”

Da bi strategije, rešenja, planovi i procedure mogle uspešno da budu sprovedeni, standard u okviru poglavlja 8.5 Program vežbi utvrđuje obavezu organizacije da kroz program uvežbavanja i testiranja utvrdi da li su predviđene mere i sredstva adekvatni i da li svi akteri znaju šta je njihov zadatak. Nakon sprovedenih vežbi analiziraju se rezultati i, ako se pokaže potrebnim, unose izmene u sistemu.

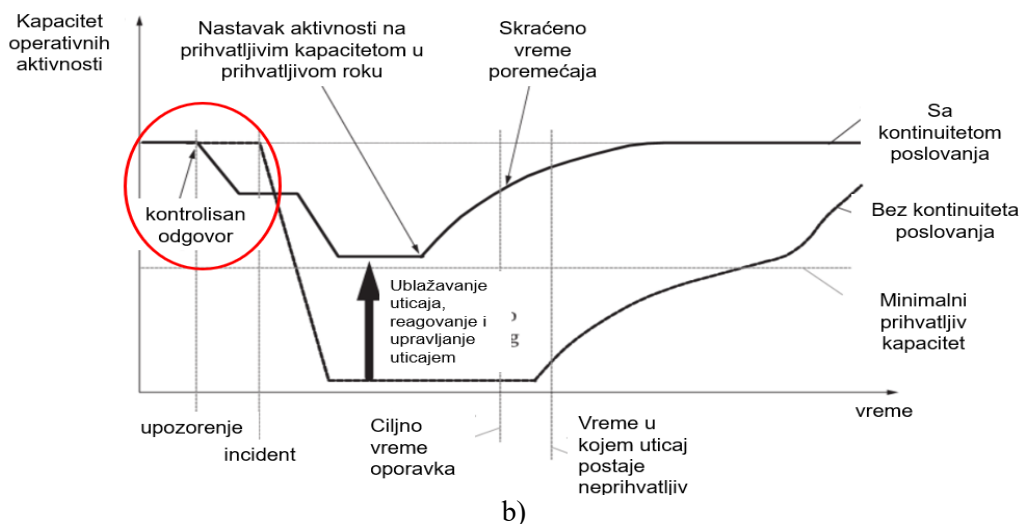
U poglavlju standarda 8.6 Vrednovanje dokumentacije utvrđena je obaveza organizacije da svu dokumentaciju povezanu sa obezbeđenjem kontinuiteta poslovanja periodično preispituje, u redovnim intervalima, a obavezno nakon nekog od remetilačkih događaja. Suština ovog poglavlja je u konceptu koji je poznat kao „naučene lekcije“ (engl. *Lessons learned*) kako bi se sistem poboljšavao i unapređivao.

Standard ISO 22313:2020 [3] detaljnije razrađuje zahteve iz standarda ISO 22301 kroz smernice kako ih implementirati. Standard prepoznaje dva globalna scenarija u kojima se primenjuju BCM sistemi – jedan, kada nastupa iznenadan događaj, koji se nije mogao predvideti i drugi, kada postoji nagoveštaj neželjenog događaja kroz upozorenje koji nam daje određeno vreme da se za njega bolje pripremimo. Ova dva scenarija prikazana su na slici 3a, odnosno 3b ([3],[5]).

U oba slučaja postoji jedan određeni nivo operacija, karakterističan za regularne uslove, i minimalno prihvatljiv nivo operacija. Isprekidana linija prikazuje tok događaja ukoliko ne bi imali uspostavljene BCM sisteme. Razlika između ovih scenarija je u toku procesa u odnosu na trenutak nastupanja incidenta. U slučaju iznenadnog događaja, slika 3a, dolazi do naglog pada nivoa operacija, koje zahvaljujući BCM sistemima održavamo iznad minimalno prihvatljivog nivoa, a zatim postepeno krećemo prema oporavku i ponovnom uspostavljanju regularnog nivoa. U slučaju postepenog nastajanja događaja kome prethodi neka vrsta upozorenja, slika 3b, nivo operacija ne opada naglo već postepeno, elementi BCM sistema reaguju već pri prvim nagoveštajima, pa se kroz "kontrolisani odgovor" (engl. *Controlled Response*) nivo karakteristika kraće zadržava na minimalnom nivou.



a)



Slika 3: Efektivnost BCM sistema – dva scenarija (Izvor: Autor, na bazi [3])

Preostali standardi iz serije ISO 22300 bave se specifičnim aspektima obezbeđenja kontinuiteta poslovanja. Na ovom mestu pomenućemo dokument ISO/TS 22317:2021 [6] koji predstavlja smernice za izradu analize uticaja na poslovanje. Ovaj dokument nema status odobrenog standarda već nosi oznaku „TS“ (engl. *Technical Specification*) što je deo prakse ISO-a da objavi dokumente čak i ukoliko nije postignuta puna saglasnost da se oni odobre kao standardi, kako bi se omogućila njegova praktična primena u svim situacijama u kojima organizacije procene da im je to korisno.

### 3. KONTINUITET POSLOVANJA U ELEKTROPRIVREDNIM SISTEMIMA

Kada je reč o elektroprivrednim sistemima, jasno je da postoji široka lepeza uticaja koji mogu dovesti do poremećaja u radu jednog tako složenog sistema. Jedna od klasifikacija koja na pregledan način ukazuje da moguće uticaje preuzeta je iz literature [7] u kojoj se uticaji grupišu u četiri oblasti:

- Uticaji iz prirodnog okruženja koji obuhvataju ciklone, oluje, poplave, suše, zemljotrese, klizišta, požare, toplotne talase itd.
- Uticaji tehnologija koji uključuju prekid snabdevanja električnom energijom usled prekida digitalne infrastrukture i poremećaja bezbednosti, raspad sistema usled prevelikog opterećenja i neadekvatne procene potrošnje, smanjena robustnost sistema po objektima, klaustru strukture i sl.
- Uticaji na bezbednost i sigurnost koji obuhvataju sajber napade na digitalnu infrastrukturu sistema, fizičke sabotaze i oštećenja kritičnih delova infrastrukture, operativnu bezbednost kritične imovine (daljinsko praćenje i održavanje opreme i sistema).
- Poremećaji u poslovanju usled narastajućih izmena u poslovnim modelima (mikromreže, raspodeljeni energetske resursi, energetske zajednice, sistemi za skladištenje energije, zeleni vodonik itd), spremnost digitalne infrastrukture za prihvataje obnovljivih izvora energije, nedostatak obučanih specijalista i iskusnog osoblja, poremećaj u kritičnim lancima snabdevanja itd.

U skladu sa onim što je navedeno u pregledu standarda koji se odnose na obezbeđenje kontinuiteta poslovanja ključna stavka je svakako sprovođenje analize uticaja na poslovanje i

ocenjivanje rizika koji gore navedeni uticaji mogu prouzrokovati, a zatim uspostavljanje odgovarajućih strategija i rešenja, planova kontinuiteta poslovanja, procedura i njihova implementacija u praksi. U tom segmentu veoma je važno da osoblje bude na odgovarajući način obučeno, da zna kako treba da postupi u pojedinim situacijama pri čemu ne treba zanemariti ni potrebu da u tom smislu bude opremljeno adekvatnim sredstvima koja se održavaju u ispravnom stanju kako bi mogla da budu upotrebljena kada to bude bilo neophodno.

S obzirom da informacione tehnologije sve više prodiru u elektroenergetski sektor, svakako je uloga telekomunikacionih i informacionih sistema značajna u obezbeđenju kontinuiteta poslovanja i oporavku elektroprivrednih organizacija nakon poremećaja, kao i osiguranju bezbednosti informacija u ovim organizacijama, pa su u tom smislu posebno naglašene Tehnička brošura TB668 i uloga DR lokacija u obezbeđenju kontinuiteta poslovanja.

### **3.1 Tehnička brošura TB668**

Brošura CIGRE TB668 [8] odnosi se na doprinos koji telekomunikacioni i informacioni sistemi daju obezbeđenju kontinuiteta poslovanja i oporavku organizacije nakon katastrofa. Generalno gledano, informaciono komunikacione tehnologije (IKT) igraju veoma značajnu ulogu u operativnom funkcionisanju EPU – proizvodnji (bez obzira da li je teritorijalno koncentrisana ili distribuirana), prenosu, distribuciji i potrošnji, uključujući i bezbednost sistema. Pored toga, IKT su značajne u procesu oporavka u slučaju katastrofa, u procesu postepenog uspostavljanja funkcija sistema. Istovremeno, problemi u IKT u regularnom radu mogu da izazovu veoma velike posledice po sistem.

Ovom brošuroum razmatraju se sledeći aspekti ([5],[8]):

- Uticaj povećane inteligencije u mreži i oslanjanje na tu inteligenciju u procesu oporavka tj. kako sistem učiniti otpornim na katastrofe i oporaviti ga ako one nastupe, kroz razmatranje vrsta i nivoa tih događaja, njihovog uticaja na sistem i oporavka od njih, uključujući i događaje koji se odnose na sam IKT deo sistema.
- Komunikacija sa rezervnim upravljačkim centrom u sistemu.
- Rezerva za sistem upravljanja telekomunikacionom mrežom i sistem za operativnu podršku.
- Resursi koji se koriste u slučaju katastrofa (satelitski kanali i telefoni, privatni mobilni radio sistemi, podeljena infrastruktura sa drugim kompanijama, brzi raspored mobilnih telekomunikacionih jedinica itd).
- Alati za ocenjivanje sistema – informacioni sistemi sa „šta-ako“ scenarijima.
- Napajanje električnom energijom (dizel generatori, baterijski sistemi, solarne ćelije, pitanja autonomije sistema).
- Planirana testiranja rezervnih sistema.
- Oporavak iz rezervnih sistema, plan odbrane i obnove sistema.

Uloga komunikacionih servisa u EPU zasniva se na politici bezbednosti, organizaciji rada EPU kompanije, njenoj strategiji i na regulatornim pitanjima koje mora da ispuni. Ključna stvar je da se najkritičnije funkcije EPU uspostave što pre u minimalnom obimu, a da se zatim sistem postepeno vraća u normalno stanje, po dinamici koja je realno moguća u konkretnoj situaciji.

### 3.2 Disaster Recovery Lokacija

Jedan od najznačajnijih segmenata vezan za obezbeđenje kontinuiteta poslovanja predstavlja uspostavljanje rezervne lokacije na kojoj se čuvaju neophodne informacije koje omogućava oporavak sistema u slučaju katastrofa koje su na neki način onesposobile glavnu lokaciju. Kada je reč o EPU to se po pravilu odnosi na centar upravljanja odgovarajućeg nivoa. Uspostavljanje ove Disaster Recovery (DR) lokacije zasniva se na pretpostavkama da organizacija bazira svoje aktivnosti na određenom skupu informacija bez kojih bi funkcionisanje organizacije bilo onemogućeno, da ovaj skup informacija može biti ugrožen katastrofičnim događajem koji bi pogodio lokaciju na kojoj se te informacije nalaze i sa koje organizacija obavlja svoju delatnost, da obnavljanje aktivnosti organizacije nakon katastrofičnog događaja zahteva neki minimalni skup informacija koje omogućavaju uspostavljanje elementarnih funkcija u prvom momentu i da oporavak organizacije od katastrofa zahteva skup informacija koje omogućavaju postepeno obnavljanje aktivnosti do potpune normalizacije (ako je ona moguća).

Da bi ova rezervna lokacija odigrala svoju ulogu potrebno je da bude prostorno dovoljno daleko od primarne lokacije, van dometa katastrofičnog događaja koji je uslovio probleme na primarnoj lokaciji (npr. bar 10 km u vazdušnoj liniji od primarne lokacije), da se na rezervnoj lokaciji čuva pažljivo odabran skup informacija koje omogućavaju uspostavljanje najznačajnijih funkcija organizacije i da je obezbeđen mehanizam koji usklađuje te informacije na rezervnoj lokaciji sa informacijama na primarnoj lokaciji. Ovo usklađivanje obavlja se, po pravilu, na dnevnom nivou, uz razmenu informacija u noćnim satima, kada je opterećenje komunikacionih mreža najmanje.

U literaturi [5] navedeno je nekoliko primera implementacije DR lokacija koje su zasnovani na literaturi [9]-[12], što ukazuje da se i u našim elektroprivrednim organizacijama ovaj problem ozbiljno razmatra.

### ZAKLJUČAK

U radu je razmotren okvir vezan za sisteme za obezbeđenje kontinuiteta poslovanja koji je uspostavljen serijom standarda ISO 22300. Nakon sažetog prikaza ovih standarda, ukazano je na ključne poremećaje koji mogu nastati u elektroprivrednim sistemima i istaknuta je značajna uloga koju u aktivnostima pripreme za reagovanje i oporavka sistema nakon katastrofa imaju telekomunikacioni i informacioni sistemi kao i obezbeđenje seta neophodnih informacija za nastavak rada organizacije kroz uspostavljanje DR lokacije. Događaji u poslednjoj deceniji idu u prilog ozbiljnijem razmatranju ove teme – poplave, pandemija, ratno žarište u Evropi i na Bliskom istoku, sve češće situacije vezane za ekstremne vremenske (ne) prilike predstavljaju ozbiljna upozorenja. Naravno, organizacije u najvećem broju slučajeva ne mogu sprečiti nastajanje tih događaja, ali se mogu ozbiljno pozabaviti preventivnim aktivnostima, pripremi strategija i planova kako bi ublažile posledice tih događaja, u slučaju da oni nastupe.

### LITERATURA

- [1] ISO 22300: Security and resilience – Vocabulary (ISO 2021)
- [2] ISO 22301: Security and resilience – Business security management systems – Requirements (ISO/IEC, 2019)

- [3] ISO 22313: Security and resilience – Business security management systems – Guidance on the use of ISO 22301 (ISO 2020)
- [4] ISO / IEC Directives, Part 1 - Consolidated ISO Supplement - Procedures specific to ISO, Annex SL: Proposals for Management System Standards (ISO/IEC, 2012)
- [5] Raković R, Čukić N, Kuč Krulj A: „Sistemi za oporavak od katastrofa i obezbeđenje kontinuiteta poslovanja u elektroprivrednim sistemima” (20. Simpozijum CIGRE Srbija, STK D2, Bajina Bašta, 10-13. oktobar 2022, R D2 08, str. 78-87)
- [6] ISO/TS 22317: Security and resilience – Business security management systems – Guidelines for business impact analysis (ISO 2021)
- [7] Sethi R, Banga A: „Threats to resilience in utilities” (pristupljeno 4/07/2024 <https://www.nagarro.com/en/blog/resilient-power-utilities-navigate-threats>)
- [8] Telecommunication and Information Systems for assuring business continuity and disaster recovery (TB668, CIGRE, WG D2.34, November 2016)
- [9] Ivanović Ž, Popović A, Andrejić B, Ilić N, Kržić M: “Automatski oporavak informacione infrastrukture u slučaju katastrofe”, 17. Simpozijum CIGRE Srbija, 2016, R D2 15
- [10] Kovačević S, Borovina Dž: “Implementacija jedinstvenog Disaster Recovery sistema u JP Elektroprivreda BiH kao osnov za osiguranje kontinuiteta poslovanja”, 32. Savetovanje CIGRE Srbija, 2015, R D2 10,
- [11] Raković R, Mandić Lukić J, Čukić N: “Information Security in Electric Power Utilities’ Environment” (First South East Regional CIGRE Conference – SEERC, Portorož 2016, Paper P07, pp 1-8
- [12] Babić M, Gačić V: “Iskustva u radu informaciono komunikacionog sistema PD TENT u uslovima vanredne situacije izazvane poplavama u maju 2014”, 32. Savetovanje CIGRE Srbija, 2015, R D2 09

**ISO 22300 SERIES STANDARDS AND BUSINESS CONTINUITY ASSURANCE  
IN ELECTRIC POWER UTILITIES**

**Dr RADOSLAV RAKOVIĆ  
ENERGOPROJEKT ENTEL p.l.c**

**BELGRADE**

**SERBIA**

*Abstract* — Electric Power Utility systems represent infrastructure systems that are of great importance for the quality of life of the population. Accordingly, any form of disruption, especially catastrophic events such as earthquakes, fires, floods, war conflicts, terrorist attacks, cyber-attacks, etc. can cause unfathomable consequences for the safety of equipment and systems, as well as for the safety of people. In order to ensure the continuity of the business of electric power utility organizations even after such events, it is necessary to apply a whole series of actions of an organizational and technical nature. In this sense, the ISO 22300 series standards for business continuity management represent a valuable framework. The paper gives a brief overview of the mentioned family of standards and then discusses the aspects of their application in electrical power utility organizations.

*Keywords* — Electric Power Utility Systems, Disruptions, Disasters, Business Continuity, Disaster Recovery systems



D2 02

**STANDARDI SERIJE ISO 22300 I OBEZBEĐENJE  
KONTINUITETA POSLOVANJA U ELEKTROPRIVEDNIM SISTEMIMA**

**ISO 22300 SERIES OF STANDARDS AND BUSINESS CONTINUITY ASSURANCE  
IN ELECTRIC POWER UTILITIES**

**Dr RADOSLAV RAKOVIĆ  
ENERGOPROJEKT ENTEL A.D.**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj - Elektroprivredni sistemi predstavljaju infrastrukturne sisteme koji su od ogromnog značaja za normalan život stanovništva. U skladu sa tim, svaki oblik poremećaja, a posebno katastrofični događaji poput zemljotresa, požara, poplava, ratnih sukoba, terorističkih napada, cyber napada i slično može izazvati nesagledive posledice kako za bezbednost opreme i sistema, tako i za bezbednost ljudi. Da bi se obezbedio kontinuitet poslovanja elektro-privrednih organizacija i nakon ovakvih događaja, neophodno je primeniti čitav niz mera organizaciono - tehničke prirode. U tom smislu, dragocen okvir predstavljaju standardi serije ISO 22300 za menadžment kontinuitetom poslovanja. U radu je dat kratak pregled navedene familije standarda a zatim su razmotreni aspekti njihove primene u elektroprivrednim organizacijama.*

**Ključne reči - Elektroprivredni sistemi, Poremećaji, Katastrofe, Kontinuitet poslovanja, Sistemi za oporavak od katastrofa**



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.298PR](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.298PR)

D2 03

## **ZAŠTITA LIČNIH PODATAKA KROZ IMPLEMENTACIJU POLITIKE O BEZBEDNOSTI I ORGANIZACIJU IKT SISTEMA NA HARDVERSKOM I SOFTVERSKOM NIVOU**

**MILKICA PETROVIĆ RIKIĆ, ODS “ELEKTRO-BIJELJINA” A.D. BIJELJINA,  
REPUBLIKA SRPSKA, BOSNA I HERCEGOVINA  
DRAGAN RIKIĆ, ODS “ELEKTRO-BIJELJINA” A.D. BIJELJINA, REPUBLIKA  
SRPSKA, BOSNA I HERCEGOVINA  
TIHOMIR DABOVIĆ, MH “ELEKTROPRIVREDA REPUBLIKE SRPSKE” A.D.  
TREBINJE  
ŽELJKO MARKOVIĆ, UNIVERZITET U BEOGRADU – ELEKTROTEHNIČKI  
FAKULTET, SCITECH D.O.O. BEOGRAD, SRBIJA**

*Kratak sadržaj* — Zaštita ličnih podataka je tekovina Evropske Unije proklamovana kroz pravo na privatnost koje je univerzalnog karaktera, ustanovljeno u Univerzalnoj deklaraciji o ljudskim pravima usvojenoj 1948.godine, a postoji i u članu 8. Konvencije o ljudskim pravima iz 1950.godine. Tehničko-tehnološki razvoj je stvorio uslove da ovo bude jedna od ključnih oblasti koja spaja prvo i informatiku. Pravno zaštita ličnih podataka je zajemčena preko prava na privatnost u Ustavu BiH, kao i oba entiteta, stim što je u Ustavu Republike Srpske više pažnje posvećeno navedenom. Materija je uređena Zakonom o zaštiti ličnih podataka BiH, a intencija je prilagodavanja Evropskom zakonodavstvu, Generalnom propisu o zaštiti podataka Evropske Unije, što se očekuje u ovoj godini, a Republika Srbija je uradila 2021.godine. Zaštita ličnih podataka se izučava na master studijima, a slutimo da će uskoro biti i premet osnovnih studija, pravo na zaštitu ličnih podataka, gdje teorija sustiže praksu, iako je život mnogo brži od pravne norme. Povezanost prava i informatike je neophodna pojavom vještačke inteligencije, uvođenjem detacentara, kao i potrebe za regulaciju bezbednosti na svim nivoima. Saradnja je neophodna u cilju zajednička izrada politika bezbednosti, kao i velikog broja pravilnika, npr.pravilnik o videonadzoru, gdje se obrađuje posebno osjetljiva grupa podataka, biometrijski, a neophodno je da te tehnički uslovi poznaju. Praktično gledano do implementacije se dolazi kroz standardizaciju rada, uvođenje standarda za bezbednost ISO 27001, imenovanje DPO-a, imenovanje službenika za usklađenost, kao i povjerenika za zaštitu ličnih podataka. Zatim neophodno je da firme koje potpadaju pod kritičnu infrastrukturu investiraju u IKT, za kupovinu komercijalnih sistemskih softvera vezanih za bezbednost npr.Firewall, SIEM sa

**modulom digitalna forenzika, kao i u firmiranu opremu. Sve navedeno treba ugovorno regulisati (SLA, OLA, NDA, EULA, SMART CONTRACT) gdje će se eksplicitno definisati prava i obaveze.**

***Ključne reči* — Zaštita ličnih podataka, DPO, BEZBIJEDNOST IKT, POLITIKA BEZBIJEDNOSTI, Povjerenik za zaštitu ličnih podataka, Službenik za usklađenost**

## UVOD

Pravo na privatnost je univerzalnog karaktera, proklamovano je u Univerzalnoj deklaraciji o ljudskim pravima, usvojenoj 1948.godine, a postoji i u Evropskoj Konvenciji o ljudskim pravima i osnovnim slobodama, proklamovanoj 1950. godine, gdje je u članu 8. navedeno da svako ima pravo na poštovanje svog ličnog života, doma i prepiske, te da se javna vlast ne miješa u vršenje ovoga prava, osim ako je takvo miješanje predviđeno zakonom i ako je to neophodna mjera u demokratskom društvu u interesu nacionalne sigurnosti, javne sigurnosti, ekonomske dobrobiti zemlje, sprečavanje nereda ili sprečavanje zločina, zaštite zdravlja ili morala ili zaštite prava i sloboda drugih.. Razvoj tehnike i tehnologije stvorio je uslove za elektronski nadzor, kontrole kretanja, te sakupljanje podataka o licima, njihovu evidenciju kroz zbirke, te obradu ličnih podataka i to je samo jedan od aspekata gdje može doći da kršenja ovog ljudskog prava, odnosno ovo je jedan dio opsežne oblasti koji treba urediti na način da se pruži zaštita, a u pitanju su posebno osjetljivi podaci-biometrijski.

Zaštita ličnih podataka kroz parvo na privatnost zajemčena je u Ustavu BiH, kao i u oba entiteta, stim što je u Ustavu Republike Srpske u članu 23.<sup>1</sup> više pažnje posvećeno, navedenom, nego u prethodna dva. Navedena materija je uređena Zakonom o zaštiti ličnih podataka BiH, a intencija je ka prilagođavanju Evropskom zakonodavstvu<sup>2</sup>, Generalnom propisu o zaštiti ličnih podataka Evropske unije (GDPR), što je Republika Srbija uradila 2021.godine.

Pravo da budemo ostavljeni na miru kako su ga nazivali Samuel Voren I Luis Brande ili parvo na lični život sa minimumom ometanja, kako je navedeno u Deklaraciji o sredstvima masovnih komunikacija i ljudskim pravima je korijen prava na zaštitu ličnih podataka, jedne relativno mlade grane.

## 1. ŠTA SU TO LIČNI PODACI/PODACI O LIČNOSTI?

Lični podaci podrazumijevaju bilo koju informaciju koja se odnosi na fizičko lice koje je identifikovano ili se može utvrditi identitet (ZZLP). Postoje različite kategorije ličnih podataka neke od njih su lični podaci koji se odnose na lični život pojedinca(visina, težina, godine života, uvjerenja i drugo), podaci koji se odnose na javni život pojedinca (npr. socijalno okruženje), te podaci koji se odnose na profesionalnu oblast života(podaci o obrazovanju, finansijski podaci), te druge vrste podataka. Nasilac podatka je fizičko lice čiji identitet može da se ustanovi ili identifikuje, neposredno ili posredno, naročito na osnovu jedinstvenog matičnog broja te jednog ili više faktora karakterističnih za fizički, fiziološki,

---

<sup>1</sup> Zajemčena je zaštita tajnosti podataka o ličnosti. Prikupljanje, obrada i svrha korišćenja ličnih podataka uređuje se zakonom. Zabranjeno je korišćenje podataka o ličnosti koje je suprotno svrsi njihovog prikupljanja. Gradjani imaju parvo da traže i dobijaju sve podatke o sebi, sadržane u aktima državnih organa i u drugim službenim evidencijama.

<sup>2</sup> BiH je potpisala sporazum o stabilizaciji i pridruživanju kojim je preuzela obavezu harmonizacije, uskladjivanja domaćeg zakonodavstva sa pravom Evropske unije, a jedan dio toga je i zaštita ličnih podataka.

mentalni, ekonomski, kulturni ili socijalni identitet tog lica (ZZLP). Posebne kategorije podataka podrazumijevaju sve lične podatke koji otkrivaju rasno porijeklo, nacionalno ili etničko porijeklo, političko mišljenje ili stranačku pripadnost ili članstvo u sindikatima, religiozno ili drugo uvjerenje, zdravstveno stanje., genetski kod i seksualni život, zatim krivične presude, te biometrijske podatke.

Lični podaci se mogu naći na svim mjestima, jer gdje god se krećemo i komuniciramo ostavljamo neke podatke o ličnosti, ali najviše na radnom mjestu. Poslodavci prikupljaju najviše podataka o svojim zaposlenim, kontinuirano, tokom trajanja radnog odnosa. Podaci se prikupljaju u različite svrhe, diktirane pravnom normom. Lični podaci su neophodni za osiguranje bezbednosti i zdravlja na radu, radi zaštite imovine poslodavca, radi kontrole rada zaposlenog, kao i za ispunjenje drugih zakonskih obaveza. Poslodavac je limitiran zakonskim ovlašćenjima u prikupljanju ličnih podataka na one koji su neophodni za realizaciju radnih zadataka, a radnicima je zagarantovana zaštita privatnosti, te time je ispunjena korelacija u ovom obligacionom odnosu.

## **2. ŠTA SVE USLOVLJAVA IZRADU POLITIKE PRIVATNOSTI ?**

Shodno načelu transparentnosti, koje je samo jedno od načela na kojima počiva zaštita podataka o ličnosti, a koje je u datom momentu temeljno poslodavci u svom radu treba da implementiraju politike privatnosti kako bi postojala zakonita i pravična obrada ličnih podataka i kako se ne bi narušavalo pravo garantovano Ustavom. Prema Opštoj uredbi o zaštiti ličnih podataka pojedinac treba biti informisan kako voditelji obrade podataka prikupljaju i koriste njegove lične podatke. Poštujući navedeno načelo rukovalac pruža sve adekvatne mjere da bi se licima na koje se podaci odnose pružile pravovremene i tačne informacije o navedenom. Implementacija politike o bezbednosti/privatnosti je ključna odrednica koja nas vodi ostvarivanju cilja. Politika privatnosti mora da se sastoji od elemenata koji su navedeni u članu 13. Opšte uredbe Evropskog parlamenta i Savjeta Evrope, te je neophodno da postoji identitet i kontakt podacima voditelja obrade, kontakt podatak o službeniku za zaštitu ličnih podataka, svrha radi koje se obrađuju lični podaci i pravni osnov za obradu podataka, ako se obrada temelji na legitimnom interesu neophodno je navesti informacije o legitimnom interesu voditelja postupka ili trećeg lica, potrebno je navesti primatelje ili kategorije primatelja ličnih podataka. U slučajevima kada postoji mogućnost za prenos podataka u treću zemlju ili međunarodnu organizaciju potrebno je uputiti na zaštitne mjere i načine pribavljanja njihove kopije ili mjesta na koje su stavljene na raspolaganje. Dalje, istoimeni član navodi da je potrebno navesti razdoblje u kome će lični podaci biti pohranjeni ili ako je to moguće i kriterijumi po kojima je utvrđeno to razdoblje, zatim postojanje prava da se od voditelja zatraži pristup ličnim podacima, ispravljanje ili brisanje ličnih podataka ili ograničavanje obrade koje se odnosi na ispitanika ili prava na ulaganje prigovora na obradu, te prava na prenosivost podataka. Kada se obrada podataka temelji na pristanku, postojanje prava da se u bilo kom trenutku povuče pristanak, a da to ne utiče na zakonitost obrade koja se temelji na pristanku, prije nego što je navedeni povučen je takodje garantovano Uredbom. Pored navedenog, postoji i pravo na podnošenje prigovora nadzornom tijelu, kao i informacije o tome da li je pružanje ličnih podataka zakonska ili ugovorna obaveza ili nužni uslov za sklapanje ugovora, te ima li ispitanik obavezu pružanja ličnih podataka i koje su moguće posledice ako se takvi podaci ne pruže i u stavu 12. je navedeno postojanje automatizovanog donošenja odluka, što uključuje izradu profila, da se daju smislene informacije o tome o kojoj logici obrade je riječ, kao i o tome kolika je važnost, kao i kakve su predviđene posledice takve obrade za ispitanika. Navedeno predstavlja *condictio sine qua non* svake politike privatnosti.

### 3. NAČINI IZRADE POLITIKE PRIVATNOSTI ?

Pravna teorija nam je stavljala na raspolaganje dva načina za vođenje politike privatnosti, jedan je jednostrana izjava volje, gdje se prihvatanje smatra samo čitanje na stranici, dok drugi vid je ugovor, gdje imamo saglasnost druge strane. Navedeni ugovor je adhezioni, nije potrebna pisana forma, te za obradu ličnih podataka je potrebna posebna saglasnost. Ovdje imamo dvije ugovorne strane, rukovaoca podacima, a to može biti fizičko ili pravno lice koje upravlja procesom obrade podataka, određuje svrhu obrade, kao i pravni osnov radi koga se prikupljaju navedeni podaci i drugu stranu, lice čiji se podaci obrađuju, a to je lice koje je pristupilo sajtu ili aplikaciji radi korišćenja određenog dijela sajta ili informacija i koje je donijelo odluku da rukovaocu prepusti svoje lične podatke na obradu. Obaveza rukovaoca je da se podaci koriste u određene svrhe, u tačno određenom obimu, u roku koji je eksplicitno naveden i na način koji je predviđen. Obaveza lica čiji se podaci obrađuju se sastoji u radnji predaje podataka na obradu i podvrgavanju podataka procesu obrade kod rukovaoca. Politiku privatnosti treba prihvatiti u momentu profilisanja<sup>3</sup>, prije predaje bilo kog ličnog podatka. Najpraktičnije je politiku privatnosti označiti vidno, ali staviti na dnu stranice kako bi se sa sigurnošću utvrdilo da se lice upoznao sa kompletnim tekstom navedene, te postaviti tako da je za prihvatanje potrebna aktivna radnja, radnja činjenja. Preduslov navedenog je ispitati funkcije sajta koje mogu biti statičke i dinamičke, te funkcije web sajtova gdje postoje informativne, koje su jedine statičke funkcije, komunikacijsku ili interakcijsku funkciju, funkciju predstavljanja, funkciju postavljanja fajlova, prikupljanja kontakata, kao i prodajnu funkciju, koja u sebi apsorbuje funkciju nuđenja, narudžbe, rezervacije i funkciju naplate, te u zavisnosti od toga napisati politiku privatnosti.<sup>4</sup>

Politika bezbednosti treba sadržati u sebi dio o sigurnosti podataka, odnosno kratak opis o načinu na koji će se ostvariti sigurnost i povjerljivost obrade podataka. Potrebno je opisati tehničke i organizacijske mjere zaštite koje će se koristiti kako bi se spriječila povreda bezbednosti podataka o ličnosti<sup>5</sup>, analogno planu sigurnosti koji se donosi uz svaki pravilnik o zaštiti ličnih podataka, samo u skraćenoj verziji. Mjere sigurnosti se aktiviraju prema potrebi, a mogu biti: pseudomizacija ličnih podataka<sup>6</sup>, sposobnost osiguranja stalne dostupnosti, povjerljivosti i cjelovitosti obrade<sup>7</sup>, pristup podacima u slučaju fizičkog ili tehničkog incidenta, kao i proces za redovno testiranje tehničkih i organizacionih mjera kako bi se osigurala bezbednost obrade.

---

<sup>3</sup> Profilisanje je svaki oblik automatizovane obrade podataka o ličnosti koji se sastoji od korišćenje podataka o ličnosti za procjenu određenih ličnih aspekata u vezi sa fizičkim licem, posebno za analizu i predviđanje aspekata u vezi sa radnim učinkom, materijalnim stanjem, zdravljem, ličnim sklonostima, interesima, pouzdanošću, ponašanjem, lokacijom ili kretanjem fizičkog lica(ZZLP).

<sup>4</sup> Politika privatnosti je sporazum, pa shodno tome neophodno je koncipirati odredbe za navedenu. Konstrukciju postaviti na sledećim elementima: uvodne napomene-istaći vlasnika sajta, internet domen i prirodu djelatnosti, zatim odrediti predmet, podatke koji se prikupljaju(vrste podataka), svrhu prikupljanja, pravni osnov za prikupljanje, zaštitu podataka, rok čuvanja podataka i veze(becklinkovi).

<sup>5</sup> Povreda bezbednosti podataka o ličnosti je kršenje bezbednosti koje dovodi do slučajnog ili nezakonitog uništenja, gubitka ili izmjenem neovlašćenog otkrivanja ili pristupa podacima o ličnosti koji su prenijeti, uskladišteni ili na drugi način obrađivani.(ZZLP)

<sup>6</sup> Pseudomizacija je obrada podataka o ličnosti na takav način da lični podaci vise ne mogu da se povežu s konkretnim licem na koje se podaci odnose, bez korišćenja dodatnih informacija, pod uslovom da se takve informacije čuvaju odvojeno i da se na njih primjenjuju tehničke i organizacione mjere da bi se obezbedilo da podaci o ličnosti ne mogu da se povežu sa fizičkim licem čiji je identitet određen ili se može odrediti. (ZZLP)

<sup>7</sup> Sistem pohranjivanja ili zbirka ličnih podataka je svaki strukturirani skup podataka o ličnosti koji su dostupni u skladu sa posebnim kriterijumima, bez obzira na to da li su centralizovani, decentralizovani ili razvrstani na funkcionalnoj ili geografskoj osnovi.(ZZLP)

#### 4. PRAKTIČNA PRIMJENA KOD OPERATERA DISTRIBUTIVNIH SISTEMA (ODS-A)

Shodno gore navedenom, Elektroprivreda Republike Srpske je naložila donošenje Programa usklađenosti. Navedeni je donesen od strane nadzornog odbora Operatera distributivnog sistema Elektro Bijeljina akcionarsko društvo Bijeljina. Jedan od predmeta (ukupno ih je 10) navedenog programa usklađenosti je i zaštita povjerljivih i komercijalno osjetljivih podataka u posjedu Operatera distributivnog sistema, jer funkcionalno razdvajanje operatera distributivnog sistema u odnosu na vertikalno integrisanu komisiju (VIK) podrazumijeva (od ukupno 4 stavke) uspostavljanje mehanizama čuvanja povjerljivih, komercijalno osjetljivih podataka, u funkciji jednakog, nediskriminatornog odnosa prema svim korisnicima usluga. Povjerljivim informacijama se smatraju podaci o korisnicima distributivne mreže i tržišnim učesnicima, koji su u posjedu operatera distributivnog sistema, kao što su:

- Pojedinačni ugovori korisnika mreže, podaci o obračunu i naplati po ovim ugovorima,
- Podaci o mjernim mjestima korisnika mreže,
- Kontakt podaci kupaca, energetske i finansijske kartice, podaci o bankama,
- Komercijalni uslovi, načini plaćanja i ostali uslovi snadbijevanja krajnjih kupaca,
- Mjerni podaci, profili potrošnje pojedinačnih kupaca,
- Istorijat prigovora i žalbi pojedinačnih korisnika mreže,
- Neaktivni i novi priključci korisnika na mrežu,
- Ostali podaci koji od tržišnog učesnika budu označeni povjerljivim (npr. poslovni i investicioni planovi, tehnički podaci itd).<sup>8</sup>

U okviru povjerljivih informacija subsumirani su lični podaci. Predviđeno je imenovanje službenika za usklađenost, te određen broj savjetnika, gdje bi jedno mjesto zauzeo povjerenik/službenik za zaštitu ličnih podataka, što je u skladu sa svim gore navedenim.

Operater distributivnog sistema može dostaviti povjerljive informacije trećim licima isključivo po dobijanju saglasnosti subjekta na koga se tražene informacije odnose, osim u slučajevima dostave podataka u skladu sa pravilima izvještavanja Regulatorne komisije za energetiku Republike Srpske ili po traženju drugog organa prema zakonima definisanim ovlašćenjima.<sup>9</sup> Uporednopravnom analizom vidimo da je primijenjeno pravilo kao u GDPR-u, prilikom donošenja Programa usklađenosti, a navedena saglasnost se dobija na eksplicitno predviđenim obrascima, kada je u pitanju lični podatak, primjeri su analogni navedenim na sajtu Agencije za zaštitu ličnih podataka Republike Srpske.

Komercijalno osjetljivim informacijama smatraju se i podaci koji se odnose na opšte (među kojima su i lični podaci) i operativne podatke o distributivnom sistemu i koji ukoliko su dostupni pojedinim tržišnim učesnicima, mogu stvoriti konkurentsku prednost na tržištu električne energije. Informacije o distributivnom sistemu se čine dostupnim javnosti izuzev u slučajevima postojanja opravdanih interesa protiv njihovog javnog objavljivanja koji se odnose na legitiman komercijalni interes ili pitanje sigurnosti sistema, te Operater distributivnog sistema primjenjuje određene mjere sa ciljem nediskriminatornog pristupa.

Navedene mjere su navedene u Programu usklađenosti, a odnose se na objavu svih relevantnih informacija u vezi sa distributivnim sistemom putem internet stranica Operatera distributivnog sistema, uspostavljanje sistema za upravljanje podacima od njihovog kreiranja, procesuiranja, ažuriranja, pravila pristupa i korišćenja formata, dostava podataka, protokoli, nadzor, izvještavanje i obuka, propisivanje obaveza ugovornih partnera sa Operaterom

---

<sup>8</sup> Program usklađenosti

<sup>9</sup> Isto.

distributivnog sistema u pogledu zaštite povjerljivih podataka do kojih se dolazi kroz realizaciju ugovora, definisanje pravnih posledica za narušavanje obaveza povjerljivosti, zabrana izrade dodatnih kopija povjerljivih informacija u čvrstoj ili elektronskoj formi, osim ovlašćenim licima Operatera distributivnog sistema, obuka zaposlenih o postupanju sa informacijama koje se odnose na treće lice, jasne procedure u pogledu fizičkog i elektronskog pristupa ključnim IT sistemima Operatera distributivnog sistema.

Obaveze zaposlenih u pogledu postupanja sa povjerljivim informacijama, način prijave sumnje na kršenja pravila povjerljivosti, kao i sankcije u slučaju kršenja pravila povjerljivosti podataka, bliže se uređuju Kodeksom ponašanja.

## **5. TEHNIČKE I ORGANIZACIONE MJERE ZA ZAŠTITU LIČNIH I KOMERCIJALNO OSJETLJIVIH PODATAKA**

### Tehničke mjere:

- Fizička zaštita
  - Ograda
  - Portir
  - Kontrola ulaza
  - Pametna kartica sa pin kodom
  - Videonadzor
  - Protivprovalna vrata
  
- IKT zaštita kritične infrastrukture podrazumijeva:
  - Firewall (odvojeno za komercijalni deo mreže u odnosu na industrijski)
  - Antivirusni program na svakoj radnoj stanici, server, službenom telefonu ili bilo kom drugom uređaju koji ima operativni sistem.
  - Softver za prikupljanje i analizu logova sa svih uređaja koje korisnici koriste,
  - Softver za digitalnu forenziku kako bi se u slučajevima sajber napada mogao detektovati izvor napada, odakle je krenulo uz dokazivanje svih propusta,
  - Centralizovan softver za nadzor instalisanih aplikacija na svim radnim stanicama i serverima sa mogućnošću ograničavanja,
  - Redovne nadogradnje operativnih sistema na najnoviju verziju ili verziju za koju postoji podrška, a po isteku perioda podrške od proizvođača trenutne verzije,
  - Redovan upgrade verzije svakog operativnog sistema sa dostupnim zakrpama od strane proizvođača,
  - Obavezna redovna zamjena svih lozinki i edukacija svih zaposlenih o ovoj potrebi,
  - Korišćenje Active Directory-a i domenskih imena, kao username,
  - Nadzor nad mrežnom infrastrukturom i svim portovima na radnim stanicama i serverima,
  - Redovno sprovođenje penetracionih testova uz obavezu vodjenja evidencije o sporovđenju istih (minimalno provjera fizičke zaštite, e-mail komunikacije, web servise i mrežnog prometa),
  - Maksimalno ograničavanje/ukidanje korištenja interneta na kritičnoj infrastrukturi,
  - Softver za elektronski tiketing kako bi svaki korisnik u firmi mogao da se obrati IKT-u sa navodjenjem problema ili bilo kakvog zahtjeva za tehničku pomoć,

- Skeniranje i štampa uz pomoć korisničkih kartica kako bi se osigurala bezbjednost informacija,
- Mašine za seckanje dokumentacije kojoj je vijek upotrebe istekao,
- Softver za centralizovan WIFI sa opremom koja je potpuno odvojena od komercijalne i industrijske mreže i
- Softver i hardver za bekap.

### **Organizacione mjere:**

- Planiranje/Implementacija ISO standarda 27001 vezanog za bezbjednost uz sertifikaciju,
- Uvodjenje ISO procedure vezano za IKT koja treba da obradi postupak obraćanja svakog radnika ka IKT-u i način postupanja samog IKT-a,
- Imenovanje službenika za uskladjenost,
- Imenovanje povjerenika za zaštitu ličnih podataka,
- Opis IKT sistema, uz navođenje komponenti, logičkih shema, opis datacentra i cloud-a,
- Redovno planiranje i zamjena hardvera kome je resurs istekao i nadogradnja softvera, a ako nije moguća nadogradnja planiranje bezbjednog gašenja softvera kroz zamjenu nekom novom verzijom,
- Pravila kod korištenja VPN kanala za pristup izvana IKT infrastrukturi,
- Elaborat svih softvera koji se koriste sa navođenjem njihove svrhe,
- Elaborat za postupak obrade, procedure testiranja i puštanja u produkciju određenog rešenja,
- Pravila kod korišćenja svih prenosivih diskova i laptopova,
- Redovna godišnja edukacija IKT radnika,
- Redovno minimalno obavještanje/edukacija svih korisnika radnih stanica na mreži o stanju, opasnostima,
- Izmjena ugovora o radu u dijelu prava i obaveza vezano za korištenje softvera, baza podataka, štampača, skenera itd .

Što je IKT sistem veći odnosno, da ima veći broj korisnika, a posebno ako pripada kritičnoj infrastrukturi neophodno je više pažnje posvetiti praćenju aktivnosti korisnika, nadzoru mreže, analizi logova, pravovremenim preduzimanjem mjera, redovnoj nadogradnji sistema. Sistem treba da bude dizajniran da pravovremeno prepozna prijetnju i adekvatno predefinisanim postupcima reaguje, zaštiti obradu, lične i komercijalne podatke.

Primjer:

Lice koje radi obradu koristi SIEM (Security Information and Event Management) to lice može da traži podešenje kroz alarme da bude obaviješteno putem mejla ako se dešavaju neke anomalije ili nedefinisane aktivnosti korisnika. Ako dođe do nekog sajber napada onda se uparivanjem sa softverom za digitalnu forenziku može doći do izvora problema .

Integrirani sistem zaštite IKT sistema vezano za servere. radne stanice I upravljačku infrastrukturu treba da:

- Postojanje centralizovane platforme za upravljanje sajber bezbjednošću koja omogućava administriranje, nadgledanje I kontrolu bezbjednosti mreže i sistema iz jedinstvenog i intuitivnog korisničkog interfejsa.
- Postojanje modula Managed Detection and Response ( MDM rešenje) što podrazumijeva:



- Brza detekcija i reakcija na napredne i softicirane prijetnje koje tradicionalni sistemi mogu propustiti
- Analiza i tumačenje podataka uz pomoć vještačke inteligencije I mašinskog učenja, kako bi se identifikovali oblici I obrasci sajber napada
- 24/7 nadgledanje
- Redovni izvještaji o stanju bezbjednosti
- Centralizovana obuka svih korisnika radnih stanica kroz lekcije, testove i sertifikaciju
- Prepoznavanje digitalnog otiska organizacije (zbir svih informacija I tragova koji su dostupni, a koji se odnose na organizaciju) što podrazumijeva:
  - Nadgledanje i analizu digitalnog otiska organizacije kako bi se otkrile potencijalne ranjivosti I prijetnje.
  - Praćenje prisustva organizacije na internetu, uključujući I web stranice, društvene mreže, forume I javne baze podataka
  - Reagovanje na potencijalne prijetnje i zaštita organizacije od zlonamjernih aktivnosti koje se odnose na njen digitalni otisak.
- Modul za industrijski sajber security rešenje za praćenje industrijskog saobraćaja, otkrivanje upada i proboja kako bi se zaštili krajnji uređaji, mrežna oprema i vrata i koncentratori podataka različitih vrsta od mrežnih pretnji
- Machine Learning for Anomaly Detection, ovaj modul koristi neuronsku mrežu da istovremeno nadgleda veliki broj telemetrijskih pokazatelja i detektuje anomalije u radu kibernetičko-fizičkih sistema koji čine najsavremenije industrijske objekte
- Modul Anti Target Attack Platform koji treba da da najkompletniji pogled na security pretnje i u mogućnosti je da analizira kompletan saobraćaj na nivou mreže, da analizira podatke sa email komunikacije i internet gateway-a, da analizira telemetriju sa endpoint uređaja.

## ZAKLJUČAK

Integracija prava i IKT oblasti je neminovnost u sferi zaštite ličnih i komercijalnih podataka. Dobra implementacija u radnim sredinama determinisana je dobrom uređenošću pravnih propisa, od vrha hijerarhijske lestvice, pa do usaglašavanja internih akata, te uskladjenost sa bezbedonosnim sistemima i mjerama koje su primjenjive i efikasne u navedenim slučajevima. IKT zaštita podrazumijeva prevashodno dobro planiranje nabavke hardvera i softvera, zatim, izmjenu svih sistema kojima je istekao resurs, bez obzira što su i dalje upotrebljivi. Sve navedeno iziskuje sprovođenje obimnih organizacionih i tehničkih mjera koje doprinose zaštiti gore navedenih podataka. Mimo svega navedenog, kod kritične infrastrukture je neophodno probuditi svijest o potrebi uvođenja standarda vezanih za bezbjednost ISO 27001.

## LITERATURA

1. Zakon o zaštiti ličnih podataka BiH (“*Sl.glasnik BiH*”, br. 49/06),
2. Zakon o bezbednosti kritičnih infrastruktura u Republici Srpskoj (“*Sl.glasnik RS*”, br. 58/19),
3. Uredba evropskog parlamenta i Savjeta od 27.aprila 2016.godine o zaštiti fizičkih lica u odnosu na obradu podataka o ličnosti I o slobodnom kretanju takvih podataka i o stavljanju directive 95/46 van snage,
4. D. Radonjić, M. Gljiva, *Primjena propisa o zaštiti ličnih podataka*, Sarajevo, 2016.godina,
5. Bosanskohercegovački standard BAS EN ISO/IEC 27001, drugo izdanje, decembar 2023.godina.

## **PROTECTION OF PERSONAL DATA THROUGH THE IMPLEMENTATION OF THE SECURITY POLICY AND THE ORGANIZATION OF ICT SYSTEMS AT THE HARDWARE AND APPLICATION LEVEL**

**MILKICA PETROVIĆ RIKIĆ, ODS “ELEKTRO-BIJELJINA” A.D. BIJELJINA,  
REPUBLIKA SRPSKA, BOSNA I HERCEGOVINA**

**DRAGAN RIKIĆ, ODS “ELEKTRO-BIJELJINA” A.D. BIJELJINA, REPUBLIKA  
SRPSKA, BOSNA I HERCEGOVINA**

**TIHOMIR DABOVIĆ, MH “ELEKTROPRIVREDA REPUBLIKE SRPSKE” A.D.  
TREBINJE**

**ŽELJKO MARKOVIĆ, UNIVERZITET U BEOGRADU – ELEKTROTEHNIČKI  
FAKULTET, SCITECH D.O.O, BEOGRAD, SRBIJA**

*Abstract*— The protection of personal data is an asset of the European Union proclaimed through the right to privacy, which is of a universal nature, established in the Universal Declaration of Human Rights adopted in 1948, and it also exists in Article 8 of the Convention on Human Rights from 1950. Technical-technological development has created the conditions for this to be one of the key areas that combines the first and informatics. The legal protection of personal data is guaranteed through the right to privacy in the Constitution of Bosnia and Herzegovina, as well as in both entities, as more attention is paid to the aforementioned in the Constitution of the Republic of Srpska. The matter is regulated by the Law on the Protection of Personal Data of Bosnia and Herzegovina, and the intention is to adapt it to European legislation, the General Data Protection Regulation of the European Union, which is expected this year, and the Republic of Serbia has done so in 2021. The protection of personal data is studied at master's studies, and we suspect that it will soon be a subject of basic studies, the right to protect personal data, where theory catches up with practice, even though life is much faster than the legal norm. The connection between law and informatics is necessary due to the emergence of artificial intelligence, the introduction of detachment centers, as well as the need for security regulation at all levels. Cooperation is necessary for the purpose of joint development of security policies, as well as a large number of regulations, for example, regulations on video surveillance, where a particularly sensitive group of data, biometrics, is processed, and it is necessary that these technical conditions are known. Practically speaking, implementation is achieved through the standardization of work, the introduction of the ISO 27001 security standard, the appointment of a DPO, the appointment of a compliance officer, as well as a personal data protection commissioner. Then it is necessary for companies that fall under critical infrastructure to invest in ICT, for the purchase of commercial system software related to security, for example Firewall, SIEM with a digital forensics module, as well as in branded equipment. All of the above should be contractually regulated (SLA, OLA, NDA, EULA, SMART CONTRACT) where rights and obligations will be explicitly defined.

**Key words - Personal Data Protection, DPO, ICT SECURITY, SECURITY POLICY, Personal Data Protection Commissioner, Compliance Officer**



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.307I](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.307I)

D2 04

## IMPLEMENTACIJA UNUTRAŠNJEG I SPOLJNOG PARA FAJERVOLA ZA POVEĆANJE SIGURNOSTI SCADA SISTEMA

PREDRAG ILIĆ, DIPL. INŽ, RADOMIR STAMATOVIĆ, DIPL. INŽ,  
GORDAN KONEČNI, DIPL. INŽ, IVAN GOJKOVIĆ, DIPL. INŽ  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN – AUTOMATIKA

BEOGRAD

SRBIJA

**Kratak sadržaj** — Sigurnost SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistema je kritična zbog njegove ključne uloge u upravljanju i kontroli industrijskih procesa. Ovaj rad istražuje sigurnosne aspekte SCADA sistema, sa posebnim fokusom na implementaciju unutrašnjeg i spoljnog para fajervola kao glavne mere zaštite. SCADA sistemi su često izloženi različitim vrstama pretnji, uključujući malver, neovlašćen pristup i ciljane napade, što može dovesti do ozbiljnih posledica po proizvodne procese i infrastrukturu.

Unutrašnji fajervoli služe kao prva linija odbrane unutar mreže, filtrirajući saobraćaj između različitih segmenata SCADA mreže i sprečavajući potencijalno maliciozne aktivnosti unutar same mreže. Spoljni fajervoli, s druge strane, obezbeđuju zaštitu na perimetru mreže, filtrirajući ulazni i izlazni saobraćaj i sprečavajući neovlašćen pristup spoljašnjih pretnji.

Kroz analizu različitih scenarija pretnji i ranjivosti, najbolje prakse za konfiguraciju i upravljanje fajervolskim sistemima, uključujući segmentaciju mreže, pravila saobraćaja i praćenje aktivnosti. Takođe se razmatra važnost redovnog ažuriranja i održavanja fajervolskih pravila kako bi se odgovorilo na nove pretnje.

Zaključak rada naglašava značaj integrisanog pristupa sigurnosti SCADA sistema, gde fajervoli predstavljaju ključnu, ali ne i jedinu komponentu sveobuhvatne strategije zaštite. Uspostavljanje slojevite sigurnosti kroz kombinaciju tehnoloških rešenja i operativnih procedura je neophodno za efikasno očuvanje integriteta, poverljivosti i dostupnosti SCADA sistema.

**Ključne reči** — SCADA, sigurnost, fajervoli, industrijski procesi, pretnje, ranjivosti, mrežna segmentacija.

# 1 UVOD

## 1.1 Kontekst i važnost teme

Industrijski sistemi, posebno SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemi, sve više zavise od sofisticirane mrežne infrastrukture kako bi obezbedili efikasno upravljanje i nadzor nad različitim industrijskim procesima. SCADA sistemi su postali ključni za funkcionisanje kritičnih sektora kao što su energetika, proizvodnja, transport i vodovod. Međutim, s obzirom na njihovu kritičnu ulogu i sve veću povezanost sa javnim i privatnim mrežama, ovi sistemi su postali primarne mete sajber napada. Ovi napadi mogu dovesti do ozbiljnih posledica, uključujući prekid rada, finansijske gubitke, i ugrožavanje sigurnosti ljudi. Zbog toga, sigurnost SCADA sistema nije samo tehnički izazov, već i pitanje od strateškog značaja za nacionalnu i globalnu bezbednost.

## 1.2 Ciljevi rada

Glavni cilj ovog rada je da pruži detaljan pregled sigurnosnih izazova sa kojima se SCADA sistemi suočavaju i da istraži kako se fajervoli mogu efikasno koristiti za zaštitu ovih sistema. Kroz analizu uloge unutrašnjih i spoljnih fajervola, rad će se fokusirati na njihovu implementaciju, konfiguraciju, i održavanje, sa ciljem da obezbedi maksimalan nivo zaštite. Pored toga, rad će razmotriti konkretne pretnje i ranjivosti koje mogu ugroziti SCADA sisteme, kao i ponuditi preporuke za poboljšanje sigurnosnih praksi.

## 1.3 Struktura rada

Rad je organizovan u nekoliko ključnih sekcija. Nakon uvoda, koji pruža osnovu i kontekst za temu, sledeće sekcije će se fokusirati na arhitekturu SCADA sistema, ulogu i implementaciju unutrašnjih i spoljnih fajervola, analizu pretnji, i preporuke za sigurnosne prakse. Svaka od ovih sekcija će detaljno obrađivati određeni aspekt sigurnosti SCADA sistema, pružajući teorijski i praktični uvid u temu. Rad se završava zaključkom koji sumira ključne nalaze i predlaže pravce za buduće istraživanje.

# 2 SCADA SISTEM

## 2.1 Pregled SCADA sistema

SCADA sistemi su dizajnirani za nadzor i kontrolu industrijskih procesa koji se odvijaju na različitim, udaljenim lokacija. Ovi sistemi prikupljaju podatke sa terena, obrađuju ih, i omogućavaju operaterima da donose odluke u realnom vremenu. SCADA sistemi uključuju različite komponente kao što su senzori, PLC-ovi, RTU-ovi, i centralni kontrolni sistemi, koji zajedno omogućavaju operaterima da prate stanje sistema i reaguju na eventualne probleme. Njihova sposobnost da prikupljaju i analiziraju podatke sa velikog broja udaljenih lokacija čini ih nezamenjivim u upravljanju kritičnim infrastrukturnim sistemima.

## 2.2 Arhitektura SCADA sistema

Arhitektura SCADA sistema je višeslojna i uključuje različite komponente koje su međusobno povezane putem specifičnih protokola. Prvi sloj, uključuje sve uređaje koji prikupljaju podatke sa terena, poput senzora i aktuatora. Ovi uređaji su obično povezani sa PLC-ovima i RTU-ovima, koji obrađuju podatke i šalju ih ka centralnom kontrolnom centru. Centralni kontrolni centar obrađuje te podatke i prikazuje ih preko HMI interfejsa, omogućavajući operaterima da donose odluke i kontrolišu procese. Komunikacija između

ovih slojeva može se odvijati putem različitih protokola, što može dodati složenost u pogledu sigurnosnih izazova.

### **2.3 Povezani sigurnosni rizici**

S obzirom na njihovu povezanost sa mrežom i ključnim infrastrukturnim sistemima, SCADA sistemi su podložni različitim vrstama sajber pretnji. Potencijalni napadi mogu uključivati neovlašćeni pristup, zlonamerni softver, DDoS napade, i napade insajdera. [1] Posledice ovih napada mogu biti katastrofalne, uključujući gubitak podataka, prekid kritičnih funkcija sistema, i fizičku štetu na infrastrukturi. Zbog toga je neophodno uspostaviti efikasne sigurnosne mere koje mogu smanjiti rizik i osigurati kontinuitet rada sistema.

## **3 UNUTRAŠNJI FAJERVOLI U SCADA SISTEMIMA**

### **3.1 Uloga unutrašnjih fajervola**

Unutrašnji fajervoli igraju ključnu ulogu u segmentaciji mreže unutar SCADA sistema, omogućavajući izolaciju različitih delova sistema i kontrolu nad protokom saobraćaja između njih. Na ovaj način, unutrašnji fajervoli pomažu u smanjenju rizika od širenja napada unutar mreže, čak i ako jedan deo sistema bude kompromitovan. Ovo je posebno važno u SCADA sistemima gde su različiti delovi mreže odgovorni za različite kritične funkcije, i gde je potrebno osigurati da kompromitovanje jednog segmenta ne dovede do ukupnog pada sistema.

### **3.2 Topologija unutrašnjih fajervola**

Postoje različiti pristupi konfiguraciji unutrašnjih fajervola, zavisno od specifičnih zahteva sistema. Jedan od ključnih koncepata je zoniranje, gde se mreža deli na različite zone sa različitim nivoima sigurnosti. Ove zone mogu uključivati terenske zone, demilitarizovane zone (DMZ), i centralne kontrolne zone. Unutrašnji fajervoli se koriste za regulisanje saobraćaja između ovih zona, omogućavajući strožu kontrolu nad pristupom i sprečavanje neovlašćenog prenosa podataka. Takođe, unutrašnji fajervoli mogu biti konfigurirani da prate saobraćaj u realnom vremenu i otkrivaju neobične aktivnosti koje mogu ukazivati na pokušaj napada.

### **3.3 Implementacija i održavanje**

Implementacija unutrašnjih fajervola zahteva pažljivo planiranje i konfiguraciju kako bi se osigurala njihova efikasnost. To uključuje definisanje politika pristupa, postavljanje pravila za filtriranje saobraćaja, i konfigurisanje pravila za otkrivanje i odgovor na pretnje. Pored toga, neophodno je redovno održavanje i ažuriranje fajervola kako bi se osiguralo da su u skladu sa najnovijim sigurnosnim standardima i da mogu odgovoriti na nove pretnje. Ovo takođe podrazumeva redovno praćenje performansi fajervola i njihovo prilagođavanje na osnovu promena u mrežnom saobraćaju ili pretnjama.

## 4 SPOLJNI FAJERVOLI U SCADA SISTEMIMA

### 4.1 Uloga spoljnih fajervola

Spoljni fajervoli predstavljaju prvu liniju odbrane za SCADA sisteme, osiguravajući da samo ovlašćeni saobraćaj može ući ili izaći iz mreže. Ovi fajervoli su ključni za zaštitu sistema od spoljnih napada, kao što su DDoS napadi, zlonamerni softver, i pokušaji neovlašćenog pristupa. Spoljni fajervoli omogućavaju filtriranje saobraćaja na osnovu različitih kriterijuma, uključujući IP adrese, protokole, i portove, čime se osigurava da samo dozvoljeni saobraćaj može proći kroz njih.

### 4.2 Topologija spoljnih fajervola

Konfiguracija spoljnih fajervola može varirati zavisno od specifičnih potreba sistema. Najčešći pristup uključuje postavljanje fajervola između SCADA sistema i spoljne mreže, kao što je internet ili korporativna mreža. U nekim slučajevima, spoljni fajervoli mogu biti postavljeni u DMZ, čime se omogućava dodatni sloj sigurnosti između SCADA sistema i spoljne mreže. Ova konfiguracija omogućava praćenje i kontrolu saobraćaja između različitih zona, smanjujući rizik od kompromitovanja sistema.

### 4.3 Implementacija i održavanje

Implementacija spoljnih fajervola zahteva detaljno planiranje i analizu potencijalnih pretnji. Ovo uključuje definisanje politika sigurnosti, postavljanje pravila za filtriranje saobraćaja, i konfigurisanje pravila za detekciju i odgovor na pretnje. Pored toga, neophodno je redovno ažuriranje fajervola kako bi se osiguralo da su u skladu sa najnovijim sigurnosnim standardima. Redovno održavanje uključuje praćenje saobraćaja, otkrivanje i reagovanje na sigurnosne incidente, kao i prilagođavanje pravila u skladu sa promenama u pretnjama i saobraćaju.

## 5 ANALIZA PRETNJI U SCADA SISTEMIMA

### 5.1 Vrste pretnji

SCADA sistemi se suočavaju sa različitim vrstama pretnji koje mogu imati ozbiljne posledice po njihov rad i funkcionalnost. Ove pretnje uključuju:

- **Zlonamerni softver:** Virusi, trojanci, crvi i ransomware su među najčešćim oblicima zlonamernog softvera koji mogu kompromitovati SCADA sisteme. Zlonamerni softver može ugroziti integritet podataka, ometati funkcionisanje sistema i izazvati prekid u radu sistema. [1]
- **Napadi neovlašćenog pristupa:** Napadači mogu koristiti različite tehnike, uključujući brute force napade, phishing, ili iskorišćavanje ranjivosti softvera kako bi dobili pristup SCADA sistemima. Neovlašćen pristup može omogućiti napadačima da manipulišu kontrolnim procesima ili krađu osetljive informacije.
- **DDoS napadi:** Distributed Denial of Service (DDoS) napadi ciljaju na preopterećenje mreže ili servera velikim količinama saobraćaja, što može izazvati usporavanje ili čak potpuni prekid rada SCADA sistema.
- **Insajderske pretnje:** Insajderi, kao što su nezadovoljni zaposleni ili osobe sa unutrašnjim pristupom sistemu, mogu namerno ili nenamerno izazvati sigurnosne incidente. Ove pretnje su posebno opasne jer insajderi često imaju pristup kritičnim delovima sistema.

## 5.2 Analiza incidenata u realnim scenarijima

Analiza stvarnih incidenata može pružiti vredne uvide u vrste pretnji sa kojima se SCADA sistemi suočavaju i kako se one mogu prevazići. Na primer:

- **Stuxnet:** Jedan od najpoznatijih sajber napada na SCADA sisteme, Stuxnet, bio je sofisticirani zlonamerni softver dizajniran za sabotazu iranskih nuklearnih postrojenja. Ovaj napad je pokazao kako zlonamerni softver može ciljano napadati specifične industrijske procese, izazivajući ozbiljne štete. [2]
- **Industroyer/CrashOverride:** Ovaj zlonamerni softver je bio odgovoran za napad na ukrajinsku energetska mrežu, izazivajući prekid u snabdevanju električnom energijom. Napad je pokazao ranjivost energetskih sistema na sofisticirane sajber pretnje.
- **Dragonfly:** Ova kampanja sajber špijunaže ciljala je na industrijske sisteme, uključujući SCADA sisteme, u cilju krađe osetljivih informacija i potencijalnog ometanja u radu. Ovi incidenti naglašavaju važnost usvajanja sveobuhvatnih sigurnosnih mera za zaštitu SCADA sistema. [3]

## 5.3 Uticaj pretnji na SCADA sisteme

Posledice uspešnog sajber napada na SCADA sisteme mogu biti dalekosežne, uključujući:

- **Prekid rada:** Napadi mogu izazvati zaustavljanje industrijskih procesa, što može rezultirati gubicima u proizvodnji i finansijskim gubicima.
- **Fizička šteta:** U nekim slučajevima, napadi mogu izazvati fizičku štetu na opremi ili infrastrukturi, što može dovesti do opasnosti po sigurnost ljudi.
- **Krada podataka:** Osetljivi podaci o industrijskim procesima ili vlasničke informacije mogu biti ukradeni, što može imati dugoročne posledice po kompaniju.
- **Gubitak poverenja:** Uspešan napad može narušiti poverenje klijenata i partnera u sigurnost sistema, što može uticati na reputaciju kompanije. [4]

Dugoročne posledice ovakvih napada mogu uključivati reputacione štete koje ugrožavaju poslovanje kompanije, kao i regulatorne kazne zbog nepoštovanja sigurnosnih standarda. Ove posledice mogu zahtevati značajna ulaganja u obnovu sistema i povratak izgubljenog poverenja, što može imati trajan uticaj na organizaciju.

## 6 SMERNICE ZA IMPLEMENTACIJU I ODRŽAVANJE SIGURNOSNIH REŠENJA U SCADA SISTEMIMA

Fajervoli su od suštinskog značaja za segmentaciju i zaštitu mreže unutar SCADA sistema. Sledeće najbolje prakse mogu pomoći u njihovoj implementaciji:

- **Zoniranje mreže:** Mreža SCADA sistema treba biti podeljena na različite zone sa specifičnim nivoima sigurnosti. Ove zone mogu biti implementirane koristeći VLAN-ove (Virtual Local Area Networks), što omogućava logičku segmentaciju mreže unutar iste fizičke infrastrukture. Na primer, terenski uređaji, kao što su senzori i RTU-ovi, mogu biti grupisani u jedan VLAN, dok se centralni kontrolni centar može nalaziti u drugom VLAN-u sa strožim pravilima pristupa. Fajervoli igraju ključnu ulogu u kontroli saobraćaja između ovih zona, osiguravajući da samo ovlašćeni saobraćaj može prelaziti iz jedne zone u drugu. [5]
- **Definisanje pravila pristupa:** Pravila fajervola treba da budu jasno definisana i restriktivna, omogućavajući samo saobraćaj koji je neophodan za rad sistema. Na primer, saobraćaj između različitih zona treba biti dozvoljen samo ako je apsolutno

neophodan za obavljanje kritičnih funkcija sistema. Pravila treba da budu dovoljno restriktivna da smanje rizik od neovlašćenog pristupa, ali i dovoljno fleksibilna da ne ometaju normalne operacije. Na primer, pravila mogu ograničiti pristup određenim protokolima ili portovima u zavisnosti od specifičnih potreba svake zone.

- **Praćenje i analiza saobraćaja:** Fajervoli treba da budu konfigurisani za praćenje i analizu saobraćaja u realnom vremenu, kako bi mogli da otkriju i odgovore na eventualne pretnje. Alati za otkrivanje upada (IDS) i sistemi za prevenciju upada (IPS) mogu biti integrisani sa fajervalom kako bi se povećala efikasnost. Redovno pregledanje logova generisanih od strane fajervola i drugih sigurnosnih uređaja omogućava identifikaciju neobičnih obrazaca saobraćaja koji mogu ukazivati na napade. [6]
- **Redovno ažuriranje i održavanje:** Fajervoli treba da budu redovno ažurirani kako bi ostali otporni na najnovije pretnje. Takođe, neophodno je redovno pregledati i ažurirati pravila fajervola u skladu sa promenama u mrežnoj arhitekturi ili pretnjama.
- **Redovno testiranje sigurnosti:** uključujući pen-testove (penetration testing) i druge oblike procene rizika, omogućava identifikaciju slabih tačaka i njihovu eliminaciju pre nego što postanu ozbiljni problemi. Redovno izvođenje pen-testova pomaže u otkrivanju ranjivosti koje bi mogle biti iskorišćene od strane napadača. Simulacije napada mogu pomoći osoblju da se pripremi za stvarne incidentne situacije i da poboljša svoje veštine u odgovoru na pretnje.
- **Upravljanje propusnim kapacitetom:** Fajervoli mogu postati usko grlo u mreži ako nisu pravilno konfigurisani ili ako ne mogu da podnesu očekivani nivo saobraćaja. Važno je izabrati fajervole koji mogu skalirati sa rastom mreže, kako bi se izbeglo smanjenje performansi. Pravila fajervola treba optimizovati da bi se minimizirao uticaj na mrežnu propusnost.
- **Ljudski faktor i obuka:** Efikasno upravljanje fajervola zavisi od znanja i veština osoblja koje ih konfigurise i održava. Nedostatak obuke može dovesti do grešaka koje kompromituju sigurnost sistema. Redovna obuka i ažuriranje znanja osoblja koje radi sa fajervolima je od ključnog značaja za održavanje sigurnosti. Sva pravila i promene na fajervolu moraju biti pažljivo dokumentovana kako bi se omogućilo lakše održavanje i pregled u budućnosti.

## 7 ZAKLJUČAK

Sigurnost SCADA sistema predstavlja ključni aspekt zaštite kritične infrastrukture. Kroz analizu implementacije unutrašnjih i spoljašnjih fajervola, jasno je da se bezbednost ne može garantovati samo hardverskim ili softverskim rešenjima. Potrebno je sagledati sigurnost sistema kao celinu koja uključuje i fizičku zaštitu, kontrolu pristupa, segmentaciju mreže, redovno ažuriranje i monitoring sistema. Implementacija unutrašnjih i spoljašnjih fajervola je od suštinskog značaja za zaštitu od pretnji kako sa unutrašnje tako i sa spoljne mreže. Uspešna primena ovih sigurnosnih rešenja zavisi od pravilnog dizajna, konfiguracije i održavanja, kao i od kontinuirane edukacije osoblja. Kroz ovaj rad, analizirali smo ključne aspekte sigurnosti SCADA sistema, ukazali na potencijalne izazove i predložili konkretne smernice za unapređenje sigurnosne infrastrukture. Na kraju, sigurna SCADA mreža je rezultat dobro koordinisanih aktivnosti koje uključuju tehnička, organizaciona i ljudska rešenja. Samo integrisanim pristupom možemo osigurati stabilan i siguran rad ovih kritičnih sistema, čime se direktno štiti nacionalna bezbednost i ekonomija.



## 8 LITERATURA

- [1] Weiss, J. (2010). Protecting Industrial Control Systems from Electronic Threats. New York: Momentum Press.
- [2] Stouffer, K., Falco, J., & Scarfone, K. (2011). ICS-CERT Recommended Practice: Improving Industrial Control System Cybersecurity with Defense-In-Depth Strategies.
- [3] Chandia, R., Gonzalez, J. A., Kilpatrick, T., & Papa, M. (2007). Security Strategies for SCADA Networks. Security & Privacy, IEEE, 5(6), 74-77.
- [4] Wright, J., & Win, T. (2007). SCADA Security: What's Broken and How to Fix It. 25th International Symposium on Reliable Distributed Systems. Beijing, China: IEEE
- [5] NIST. (2015). Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security. Special Publication 800-82. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- [6] Čičin-Šain, M. (2019). Sigurnost industrijskih kontrolnih sistema. Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu.

# ENHANCING SCADA SYSTEM SECURITY THROUGH THE IMPLEMENTATION OF PAIRED INTERNAL AND EXTERNAL FIREWALLS

PREDRAG ILIĆ, DIPL. ENG, RADOMIR STAMATOVIĆ, DIPL. ENG,  
GORDAN KONEČNI, DIPL. ENG, IVAN GOJKOVIĆ, DIPL. ENG  
INSTITUTE “MIHAJLO PUPIN”– AUTOMATIKA

BELGRADE

SERBIA

*Abstract* — The security of SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems is critical due to their key role in managing and controlling industrial processes. This paper explores the security aspects of SCADA systems, with a particular focus on the implementation of paired internal and external firewalls as a primary protective measure. SCADA systems are often exposed to various types of threats, including malware, unauthorized access, and targeted attacks, which can lead to serious consequences for production processes and infrastructure.

Internal firewalls serve as the first line of defense within the network, filtering traffic between different segments of the SCADA network and preventing potentially malicious activities within the network itself. External firewalls, on the other hand, provide protection at the network perimeter, filtering incoming and outgoing traffic and preventing unauthorized access from external threats.

The paper analyzes different threat scenarios and vulnerabilities, best practices for firewall system configuration and management, including network segmentation, traffic rules, and activity monitoring. It also considers the importance of regular updates and maintenance of firewall rules to respond to new threats.

The conclusion emphasizes the importance of an integrated approach to SCADA system security, where firewalls represent a critical, but not the only, component of a comprehensive protection strategy. Establishing layered security through a combination of technological solutions and operational procedures is essential for effectively maintaining the integrity, confidentiality, and availability of SCADA systems.

*Key Words* — SCADA, Security, firewalls, industrial processes, threats, vulnerabilities, network segmentation

D2 04

**IMPLEMENTACIJA UNUTRAŠNJEG I SPOLJNOG PARA FAJERVOLA ZA  
POVEĆANJE SIGURNOSTI SCADA SISTEMA**

**ENHANCING SCADA SYSTEM SECURITY THROUGH THE IMPLEMENTATION  
OF PAIRED INTERNAL AND EXTERNAL FIREWALLS**

**PREDRAG ILIĆ, DIPL. INŽ, RADOMIR STAMATOVIĆ, DIPL. INŽ,  
GORDAN KONEČNI, DIPL. INŽ, IVAN GOJKOVIĆ, DIPL. INŽ  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN – AUTOMATIKA**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* - Sigurnost SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistema je od kritičnog značaja, s obzirom na njihovu centralnu ulogu u upravljanju i kontroli industrijskih procesa. SCADA sistemi omogućavaju nadzor i kontrolu nad različitim industrijskim operacijama, uključujući energetiku, proizvodnju, transport i vodovod, što ih čini neophodnim za funkcionisanje modernih društava. Međutim, kako se ovi sistemi sve više povezuju sa mrežama i internetom, postaju izloženi različitim sajber pretnjama koje mogu imati ozbiljne posledice po njihovu funkcionalnost i bezbednost. Zbog toga, bezbednost SCADA sistema postaje prioritet za organizacije koje se oslanjaju na ove tehnologije.

Ovaj rad istražuje ključne sigurnosne aspekte SCADA sistema, sa posebnim fokusom na implementaciju unutrašnjeg i spoljnog para fajervola kao glavnih mera zaštite. SCADA sistemi su često izloženi pretnjama kao što su malver, neovlašćen pristup, ciljni napadi i DDoS napadi, što može ugroziti ne samo proizvodne procese, već i širu infrastrukturu na koju se oslanjaju. Unutrašnji fajervoli igraju vitalnu ulogu u segmentaciji mreže, omogućavajući kontrolu i izolaciju ključnih komponenti SCADA sistema. Ovi fajervoli pomažu u sprečavanju širenja pretnji unutar mreže, čak i ako jedan deo sistema bude kompromitovan.

S druge strane, spoljni fajervoli obezbeđuju zaštitu na perimetru mreže, filtrirajući ulazni i izlazni saobraćaj. Oni su prva linija odbrane protiv pretnji koje dolaze spolja, sprečavajući neovlašćen pristup i osiguravajući da samo legitiman saobraćaj može ući ili izaći iz SCADA sistema. Efikasna implementacija ovih fajervolskih rešenja uključuje segmentaciju mreže, pravilno definisanje i primenu pravila saobraćaja, kao i kontinuirano praćenje aktivnosti u mreži.

Rad takođe razmatra važnost redovnog ažuriranja i održavanja fajervolskih pravila kako bi se efikasno odgovorilo na nove pretnje koje se stalno pojavljuju u sajber

prostoru. Redovno testiranje sigurnosnih sistema i obuka osoblja su neophodni za održavanje visokog nivoa sigurnosti.

Zaključak ovog rada naglašava potrebu za sveobuhvatnim, slojevitim pristupom sigurnosti SCADA sistema, gde fajervoli predstavljaju ključnu, ali ne i jedinu komponentu. Kombinacija tehnoloških rešenja, operativnih procedura i stalnog nadzora ključna je za dugoročnu zaštitu integriteta, poverljivosti i dostupnosti SCADA sistema u sve složenijem sajber okruženju.

*Ključne reči* — SCADA, sigurnost, fajervoli, industrijski procesi, pretnje, ranjivosti, mrežna segmentacija.



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.317M](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.317M)

**D2 05**

## **DIGITALIZACIJA VN POSTROJENJA – KONCEPTI VIRTUELIZACIJE**

**SRĐAN MIJUŠKOVIĆ, WSP UK\***  
**ADIS LOVIĆ, ACINEL d.o.o.**

**BEOGRAD**  
**LJUBLJANA**

**SRBIJA**  
**SLOVENIJA**

*Kratak sadržaj* — Koncept virtuelizacije predstavlja same osnove standarda IEC 61850, definisan pre više od dve decenije i ozvaničen objavljivanjem prve edicije Standarda 2003. godine. Modularnost logičkih funkcija, mogućnost alokacije zaštitno-upravljačkih funkcionalnosti i odgovarajući prikaz samih elemenata VN postrojenja u digitalizovanom okruženju jeste primarna ideja pojma virtuelizacije. Razmatranjem mogućnosti srodnih rešenja industrijskih sistema i uvidom u potencijale adekvatnih modela informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT), dolazimo do novih opcija koje povezujemo s terminom virtuelizacije. Opcija s potencijalom usmeravanja protoka velike količine mrežnih podataka u digitalizovanim VN postrojenjima, čije je karakteristike neophodno sagledati, jeste virtuelna lokalna računarska mreža - VLAN (*Virtual Local Area Network*). Pored navedenog, termin virtuelizacije dobija posebnu težinu veoma aktuelnim i intrigantnim modelom centralizovanja i virtuelizacije zaštitno-upravljačkih aplikacija. Cilj rada je da približi navedene raznolike koncepte prevashodno definisane identičnim terminom - virtuelizacija.

*Ključne reči* — Digitalizacija, Virtuelizacija, VLAN, IEC 61850

---

\* Makedonska 12, Beograd [srdjan.mijuskovic@wsp.com](mailto:srdjan.mijuskovic@wsp.com)

## 1 UVOD

Teško je istaći termin koji je više povezan sa procesom digitalizacije VN postrojenja od virtuelizacije. Od samih početaka ideja je prisutna i na svoj način oslikava kontinualnost, složenost i sveobuhvatnost opisanog procesa, budući da su u proces uključene i druge discipline koje imaju svoje principe virtuelizacije, značajno drugačije od inicijalnog ključnog koncepta shodno IEC 61850. Izazovi sagledavanja procesa digitalizacije često se najbolje vide kroz izazov terminologije i teškoće u pravilnom definisanju i prezentaciji određenih procesa. Složenost prevazilazi striktno tehničke aspekte, budući da negativna iskustva u realizaciji ovakvih struktura imaju izuzetno štetan uticaj, kako na kompanije direktno finansijski oštećene, tako i na celokupan proces i progres uspostavljanja *Smart Grid* i *Zero Net* ciljeva, sagledanih kao globalne tendencije i inicijative [1].

## 2 IEC 61850

Proteklo je 20 godina od objavljivanja i početaka praktične upotrebe IEC 61850, Standarda koji u 40-ak različitih dokumenata na već sada više od 8000 strana daje jasne smernice za digitalizaciju EE objekata, inicijalno i prevashodno VN objekata. Možemo reći da govorimo zapravo o grupi standarda na čijem razvoju tokom perioda od preko 25 godina radi više stotina stručnjaka iz celog sveta sa brojnim predstavnicima, kako iz redova proizvođača, tako i krajnjih korisnika. Vredi napomenuti da se TC (*Technical Committee*) 57 WG (*Working Group*) 10, zadužen za kreiranje Standarda sastoji od stručnjaka mnogobrojnih elektroinženjerskih profila i srodnih disciplina.

Interoperabilnost kao zaštitni znak ove kontinuirane saradnje veoma je uspešno demonstrirana i ključ je popularnosti koju navedeni Standard zaslužio ima. Pored mnogih drugih funkcionalnosti, svakako treba napomenuti uniformnost razmene informacija koja se postiže usklađivanjem SCL (*System Configuration Language*) u delu 6 [2], kao i precizno definisanje Testova usklađenosti u delu 10 (*Conformance Test*) [3].

Međutim, IEC 61850 vremenom prevazilazi okvire VN postrojenja i u svojim brojnim setovima bavi se i ostalim delovima energetskog sistema. Uticaj prisustva obnovljivih izvora osvedočen je radom na IEC 61850-7-420/520 dela Standarda [4][5].

Već u samoj razlici u nazivima izdanja Standarda oslikava se navedeno proširenje domena:

*Edition 1 (2003): Communication Networks and Systems in Substations*

*Edition 2 (2007): Communication Networks and Systems for Power Utility Automation*

Kontinuirano ažuriranje Standarda i planska spremnost na prihvatanje novih tehnologija i komunikacionih medijuma, ukazuje nam na postulat o dugoročnoj održivosti i shodno stabilnosti, potvrđujući se kao sistemsko rešenje za automatizaciju energetskih sistema [6][7]. Navedena sveobuhvatnost nam ukazuje da se IEC 61850 Standard može sa pravom nazvati platforma za digitalizaciju energetskih sistema, ključna komponenta *Smart Grid*-a.

### 2.1 Sampled Values

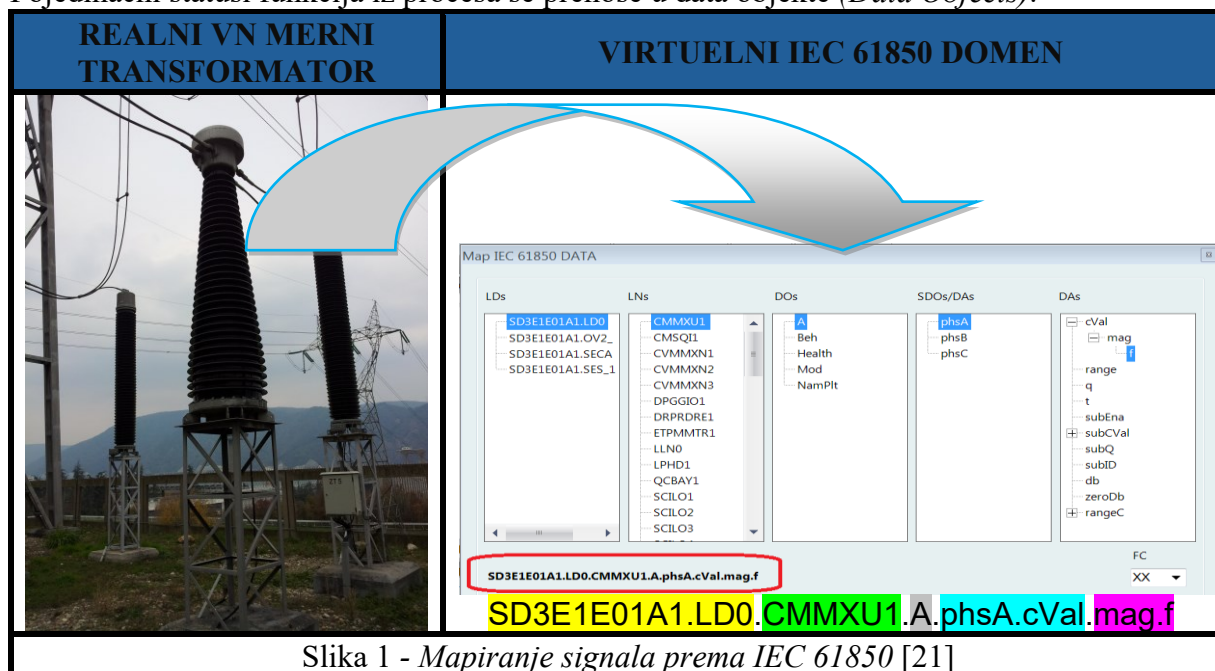
Digitalizovani signali (MMS, GOOSE) su i te kako prisutni u praksi na procesnom nivou, međutim, shodno definicijama IEC 61850 proces digitalizacije zaštitno-upravljačkih sistema bi morao biti zaokružen korišćenjem *Sampled Values* – digitalizovanih merenja ili prema SRPS EN 61850-9-2:2013 vrednosti uzoraka. Navedeni deo Standarda namenjen slanju merenja iz mernih transformatora preko digitalizovane mreže prvobitno je definisan 2004. godine *Communication Networks and systems in substations – Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled Values over ISO/IEC 8802-3* [8]. Na

samom početku ovog dela Standarda se naglašava zasnovanost na apstraktnom modelu iz [IEC 61850 Part 7-2: Basic information and communication structure – Abstract communication service interface (ACSI)][9]. Standard definiše IEC 61850-9-2 kao vid komunikacije između emitera i primalaca poruka (*publisher/subscriber*) i njegov predmet je opis mapiranja. Vrednosti uzoraka (SV) predstavljaju kontrast u odnosu na konvencionalne implementacije, gde se skalirana analogna merenja šalju direktno na zaštitno-upravljačke uređaje (IED). Glavna karakteristika SV jeste izuzetna brzina, frekvencija slanja od uobičajeno 4000Hz i 4800Hz za zaštitno-upravljačke sisteme i 14400Hz za kvalitet EE, shodno [10]. Integracija sve većeg broja proizvodnih sistema obnovljive energije značajnih instalisanih snaga nepredvidivih i nestalnih izvora, naglašava potrebu za digitalizovanim SV merenjima u VN postrojenjima [11].

Digitalizacija Procesnog nivoa (*Process Bus*) kao jedan od zahteva za ispravan rad postavlja usklađenost vremena podataka – vremenskih znački (*timestamp*), shodno IEC 61850-5 (Table 3) u klasi T5 (ispod 1 $\mu$ s) [12]. Prema praktičnim iskustvima, nivo reda veličine potreban za ispravno funkcionisanje je i do 50ns (10<sup>-7</sup>s/10<sup>-8</sup>s) [13][14]. *Timestamp* je i jedan od ključnih *Data attribute*-a koje možemo pronaći u *Data Object*-u prema IEC 61850-7-3 [15]. Navedenu tačnost nudi *IEEE Std 1588 Precision Time Protocol* (PTP) [16] uz prednost mogućnosti korišćenja postojeće ethernet infrastrukture digitalizovanih VN postrojenja, uz obaveznu kompatibilnost svih *switch*-eva u mreži sa protokolom [17]. U protokolu su definisani „profili“ koji se odnose na pojedinačne industrijske segmente i daju jasne metode podešavanja i rada, a za energetske sisteme je to IEC 61850-9-3 PUP (*Power Utility Profile*) [18]. Neophodna unapređenja u 9-2 dela Standardu uključena su u ediciju 2.1, pogotovu sa aspekta vremenske sinhronizacije [19].

## 2.2 Virtuelizacija u IEC 61850

Modelovanje podataka (*Data model - 7-3 Common Data Classes / 7-4 Compatible Logical Node Classes and Data Classes*) [15][20] prenosi informacije iz realnog procesa konceptom virtuelizacije u digitalne attribute. Uprošćeno prikazano, svaka funkcija, element ili aplikacija se virtuelizuje u *Data Model* podatak na IED-u koji postaje logički čvor (*Logical Node*). Pojedinačni statusi funkcija iz procesa se prenose u data objekte (*Data Objects*).



Slika 1 - Mapiranje signala prema IEC 61850 [21]

Na slici 1 može se videti kako se realni VN merni transformator modeluje kao logički čvor LN klase CMMXU1 u data modelu. Data objekt DO u opisanom slučaju je amplituda (A) uz preciznije definisanje podatka u DA (*data attribute*) ukazujući da se radi o vrednosti merenja frekvencije u fazi A. Na početku se ostavlja prostor za naziv IED-a i njegovu instancu.

### 3 VLAN (VIRTUAL LOCAL AREA NETWORK)

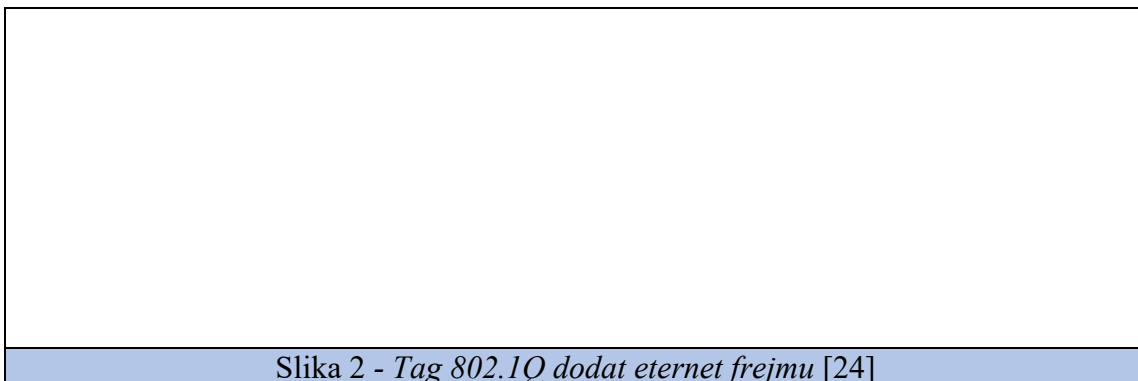
Virtuelna lokalna računarska mreža VLAN – predstavlja svaki domen emitovanja (*broadcast domain*) koji je segmentiran i izolovan u računarskoj mreži na nivou 2 OSI modela – sloj veze (*Data Link Layer*) ili MAC (*Medium Access Control*) mrežni nivo. Domen emitovanja je grupa uređaja koja će primiti *frame* emitovanja poslat sa bilo kog uređaja u toj mreži, s destinacijom *broadcast* MAC adrese FFFF.FFFF.FFFF. Mrežni saobraćaj se fizički nalazi na jednoj mreži, ali je funkcionalno i logički izdvojen na posebne mreže [22].

Koncept VLAN se ostvaruje omogućavanjem pojedinih ili grupe VLAN-ova na portu *switch*-a i dodavanjem VLAN taga.

#### 3.1 IEEE 802.1Q

IEEE 802.1Q (Dot1q) [22] jeste protokol pomoću koga se ostvaruje željena VLAN komunikacija preko IEEE 802.3 ethernet mreže [23]. U ethernet frejmu, preciznije u delu koji pripada zaglavlju (*Ethernet header*) se dodaje tag 802.1Q od 32 bita (enkapsulacija). Navedeni tag se sastoji iz dva dela TPID i TCI (slika 2, tabela 1). Novodobijeni frejm se tada naziva IEEE 802.1Q frejm.

U IT domenu za ovaj proces su zaduženi ethernet *switch*-evi koji zato moraju biti vrlo precizno podešeni u odgovarajućim softverskim programima, kako bi ispravno izvršavali adekvatnu obradu pridošlih frejmova i njihovo dalje prosleđivanje [24].



Slika 2 - Tag 802.1Q dodat ethernet frejmu [24]

U operacionim OT tehnologijama, frejm u samom IED uređaju dobija i Dot1q zaglavlje [25]. Pojedinačni portovi na *switch*-evima mogu pripadati u više VLAN-ova.

16 bits	3 bits	1 bit	12 bits
TPID	TCI		
	PCP	DEI	VID

Tabela 1 - 802.1Q tag format [26]

Tag Protocol Identifier - TPID - 16 bita za VLAN uvek je podešen na 0x8100

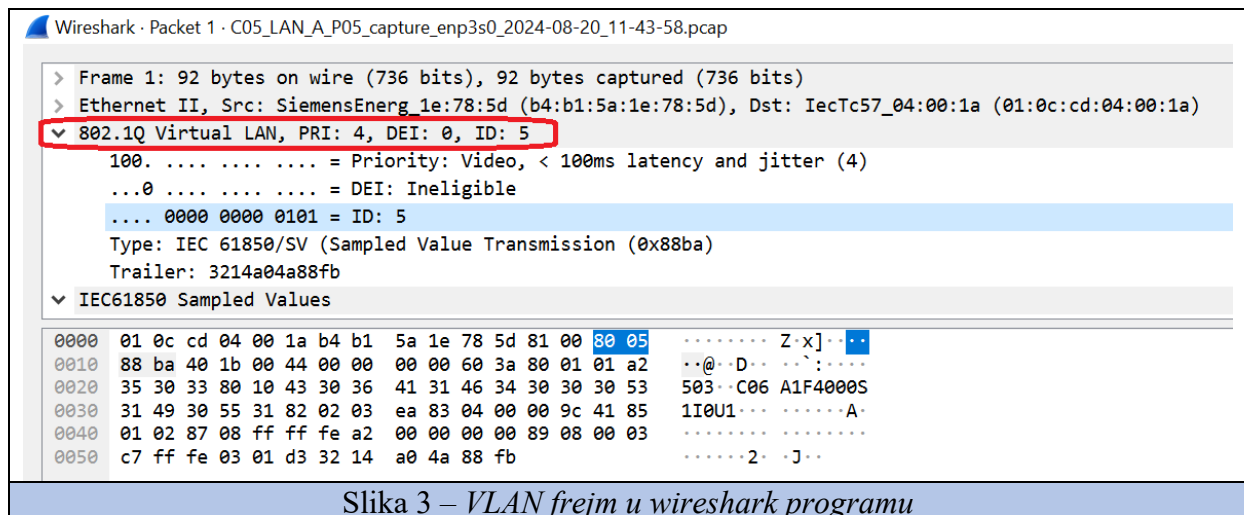
Tag Control Information – TCI - sastoji se iz tri dela:

*Priority Code Point* – PCP – 3 bita – koristi se za CoS – *Class of Service* – označava prioritetan mrežni saobraćaj u slučaju zagušenja mreže [27]



*Drop Eligible Indicator* – DEI – 1 bit – označava paket koji može biti odbačen, ukoliko je mreža zagušena

VID – VLAN ID – 12 bita – identifikuje VLAN kojem pripada frejm, raspon je  $2^{12} = 4096$ . VLAN 0 i 4095 su rezervisani, a u zavisnosti od proizvođača mogu biti rezervisane i druge pozicije. VLAN 0 nema ID, ali je prisutan PCP – prioritet i IEC 61850 propisuje da inicijalno SV i GOOSE budu na taj način konfigurisani. Možemo primetiti da IEC 61850 uglavnom daje prednost takozvanoj *priority tag* – prioritizaciji mrežnog saobraćaja u odnosu na VLAN i da se zadavanjem adekvatne vrednosti od 0 do 7, budući da PCP sadrži 3 bita, može uticati na brži prenos važnih podataka [25].



Slika 3 – VLAN frejm u wireshark programu

### 3.2 Nativni VLAN [22][24]

Nativni (*Native*) ili originalni VLAN je specifična karakteristika, omogućena u cilju kompatibilnosti sa *switch*-evima starije generacije koji ne podržavaju IEEE 802.1Q. U ovom slučaju, *switch*-evi ne dodaju tag 802.1Q i kada na *trunk* port stigne neobeleženi (*untagged*) frejm, smatra se da on pripada nativnom VLAN-u.

Potrebno je naglasiti da se podešavanje nativnog VLAN-a vrši na nivou porta, ali je često u praksi zadati VLAN ID isti za sve portove. Mora se voditi računa da nepoklapanjem VLAN ID-a nativnih VLAN-ova između povezanih *switch*-eva u mreži, može doći do grešaka ili zagušenja komunikacije.

Koncept koji se često povezuje sa nativnim jeste *default*-ni VLAN. Važno je istaći da je on uvek u poziciji VLAN ID 1 i za razliku od nativnog, nikada se ne može obrisati u podešavanjima. Inicijalno, i nativni i *default*-ni VLAN su u poziciji VLAN ID 1.

U praksi se često iz bezbednosnih razloga (*Cyber security*), nativni VLAN pomera iz inicijalne, uvek prisutne pozicije VLAN ID 1 na neku drugu, proizvoljnu poziciju. *Cyber* napadom VLAN *hopping* se narušava ključna karakteristika VLAN-a – kanalisanje mrežnog saobraćaja. U ovu svrhu koristi se takozvano IEEE 802.1ad QinQ, dvostruko obeležavanje (*double tagging*) frejmova, od kojih je prvi tag obavezno nativni. *Switch* prihvata frejm preko pristupnog porta budući da sadrži nativni VLAN u prvom tagu, a nadalje prosleđuje isti frejm po drugom VLAN tagu. Na taj način ostvaruje se nedozvoljena komunikacija između dva VLAN-a (*hopping*). Višestrukim ponavljanjem ostvaruje se DoS (*Denial of Service*) napad uređaja koji se nalaze u VLAN mreži sa navedenim drugim tagom. Napad je znatno olakšan, ako je nativni VLAN ostavljen u inicijalnoj i očekivanoj poziciji VID 1. *Update*-om *firmware*-a na modernijim *switch*-evima, problem dvostrukog obeležavanja je rešen.

Stručnjaci su, međutim, idalje skeptični po ovom pitanju i nije retkost u praksi videti ideju da se *default*-ni VLAN ID 1 izbegava za svako korišćenje, a svi portovi koji se ne koriste, postavljaju u proizvoljnu VID poziciju. Nakon toga se navedeni proizvoljni VID proglašava za nativni na svim portovima i oni se tada stavljaju izvan funkcije. Korisna funkcija tada je mogućnost korišćenja *forbidden* (onemogućen) za ostale portove, kako bi se na svaki način isključilo funkcionisanje određenog VID.

### 3.3 Potencijali nativnog VLAN-a

Digitalizovana VN postrojenja do Procesnog nivoa (*Process Bus*) shodno Standardu, koriste u 2.1 delu opisane *Sampled Values* – digitalizovana merenja. Razmatranjem njihovih funkcionalnih karakteristika sagledava se izuzetna frekventnost, tako da je uspostavljanje opisane arhitekture sistema procesnog nivoa uključivanjem SV, očigledno predstavlja izuzetno složen zadatak, kako sa aspekta vremenske sinhronizacije, tako i količine podataka na lokalnoj mreži [28].

Koristeći standardni ethernet frejm, dakle bez taga 802.1Q od 32 bita, nativni VLAN manje opterećuje mrežu. Takođe, shodno mogućnosti da bude opšteprisutan u mreži, bez posebnih podešavanja, može biti povoljan za razmenu interne komunikacije o funkcionalnostima mreže i kontroli stanja *switch*-eva.

Upravo navedene karakteristike čine opisani format nativnog VLAN-a teoretski idealnim mehanizmom za prenos signala vremenske sinhronizacije uređaja u potpuno digitalizovanim sistemima.

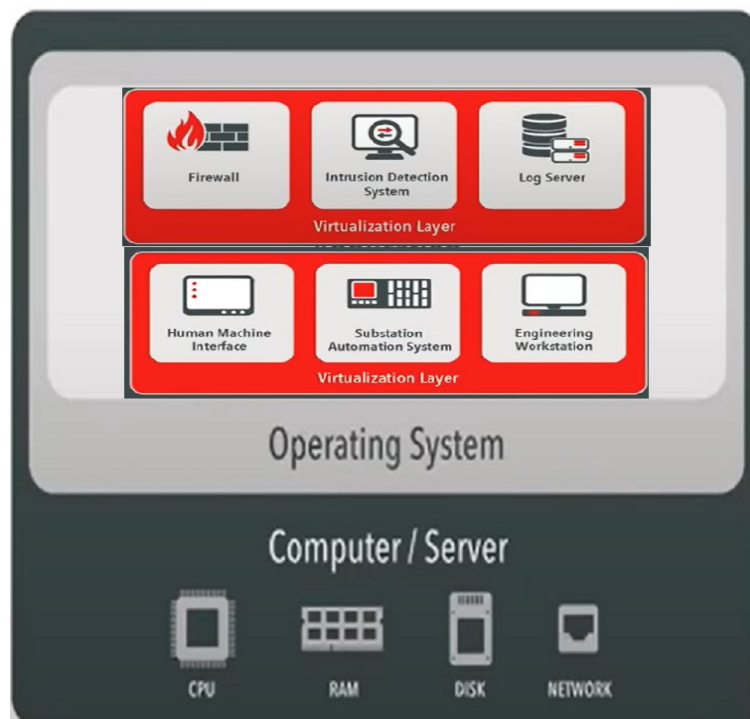
## 4 VIRTUELIZACIJA ZAŠTITNO-UPRAVLJAČKIH FUNKCIJA

Koncept koji u poslednje vreme po svojim mogućnostima nalazi namenu u svim brojnim komunikacionim, pre svega lokalnim SCADA sistemima, jeste virtuelizacija procesnih sistema. Navedeni koncept potencijalno može olakšati brojne do sada primećene izazove digitalizacije, naročito po pitanju integracije zahteva računarske bezbednosti [29].

Definicija po kojoj možemo da usvojimo proces virtuelizacije zaštitno-upravljačkih funkcija jeste da je to grupacija virtuelnih instanci na platformama, izdvojenim od samog računarskog hardvera. Izdvojene ili dodatne platforme *hypervisor*, predstavljaju virtuelne nivoe koji mogu da sprovode više traženih funkcija istovremeno, korišćenjem zajedničkih hardverskih resursa. *Hypervisor* mogu biti Tip 1 – *Bare Metal*, direktno instalirani na hardver, tako da su u hijerarhijskom nivou operativnih sistema (*VMware ESXi*) ili Tip 2 – *Hosted*, indirektno povezani na hardverske resurse preko specijalne aplikacije (*VMware Workstation Player*). Drugonavedeni sistemi su inženjerima sekundarnih sistema dobro poznati, budući da su izuzetno popularni u cilju prevazilaženja problema potrebe za velikim brojem softverskih paketa različitih generacija, često i od istog proizvođača. Pristupačnost i ušteda resursa dosta olakšavaju ovu, u praksi vrlo nezgodnu, okolnost s kojom se susreću implementatori računarskih programa na elektroenergetskim objektima. Ključna prednost za rad brojnih virtuelnih aplikacija jeste mogućnost centralizovanog upravljanja i zato se za simulirane sisteme na serverima kao bolje rešenje nameće Tip 1. Direktni pristup računarskim resursima postavlja *hypervisor* u samo središte funkcionisanja sistema, što omogućava potpunu kontrolu i upravljanje procesima, aspekt izuzetno važan za koordinisanje računarske bezbednosti. Opisano centralizovanje aplikacija, po principima virtuelnih *switch*-eva, smanjuje i mrežno opterećenje i izoluje ga od spoljašnjih uticaja. Konfigurisanjem virtuelnih *firewall*-ova ka lokalnoj mrežnoj infrastrukturi, ali i prema spoljnim konekcijama, značajno se smanjuje izazov računarske zaštite i centralizuje status svih procesa. Uz dodatne benefite prikazanih rešenja treba istaći mogućnost jednostavnog proširenja automatskih sistema – dodavanjem

novih platformi pored već postojećih. U poslednje vreme pogotovo je zanimljiva ideja IDS (*Intrusion Detection System*), poslednjeg nivoa odbrane (*Defence-in-Depth*) u slučaju proboja računarske zaštite [30]. Grupisanjem i uobličavanjem svih komponenti tercijarnog sistema na jednom redundantnom sistemu (slika 4), znatno se olakšava ključan problem održavanja ovakvih sistema, njihovo redovno ažuriranje (*update*) [31]. Kreiranjem *back-up* (potpune rezerve aktivnog stanja) ili *snapshota* (zatečenog stanja konfiguracije) znatno se osigurava uvek nezahvalan postupak promene statusa sistema, koji neometano obavlja svoju izuzetno važnu funkciju, a sve zarad potencijalnih softverskih problema. Dodatni izazov predstavlja i povremeno zahtevano *patch*-ovanje, često i samog *firmware*, tako da korišćenjem objedinjene celine pomenuti procesi su ipak virtuelizacijom zaštitno-upravljačkih funkcija znatno olakšani. Često se u primerima kao potencijalno najopasniji element u arhitekturi SCADA sistema, navodi inženjerska konfiguraciona jedinica, budući da predstavlja most između više mreža *dual homming*, pogotovu kada se poput USB uređaja uključuje direktno iz spoljnog sveta i premošćuje OT i IT komunikacionu mrežu [32]. Izolovanjem virtuelizacijom, navedena pretnja po sigurnost sistema se znatno limitira.

Na nivou virtuelizacije IED-ova i povezanog koncepta centralizovane zaštite, progres je takođe učinjen, međutim, prepuštanje ključnih komponenti zaštitnog sistema izuzetno osetljivim tehnologijama, kao i kod *Sampled Values* merenja, zahteva veliku dozu obazrivosti. Značajan napredak tehničkih kapaciteta i sposobnost računarskih hardvera da održe funkcionalnost velikog broja paralelnih procesa je omogućio razmatranje, ali i konkretan razvoj navedenog metoda. Dostupnost brojnim informacijama radi boljeg razumevanja stanja u sistemu i predikcije kvarova, ostavlja mogućnost brzog analitičkog proračuna i odgovarajuće reakcije kada je deo opreme u kvaru, poput konkretno strujnog transformatora, budući da su ostale struje u drugim delovima sistema dostupne [33].



Slika 4: Primer virtuelizacije tercijarne opreme [31]

Zbog jednostavne modularnosti, opisani sistem ne treba posmatrati samo kao niz objedinjenih funkcija zaštitnih uređaja, već kao instancu koja ima za cilj potpuno redefinisane rada zaštitno-upravljačkog sistema, jednu od modernih tehnologija nesagledanih u planiranju primene IEC 61850 Standarda, ali sa jasnim potencijalom.

## 5 ZAKLJUČAK

U radu su prikazane već duže vreme prisutne logike hardverske virtuelizacije shodno konceptima IEC 61850. Nastavkom procesa digitalizacije elegantna logika i rešenja koje nudi koncept nativnog VLAN-a pronalaze svoja mesta u energetici, dokazujući da je multidisciplinarni pristup ključan za prevazilaženje tehnoloških zastoja. Prikazane karakteristike čine opisani format nativnog VLAN-a teoretski idealnim mehanizmom za prenos signala vremenske sinhronizacije uređaja u potpuno digitalizovanim sistemima.

Razumevanje navedenih najnaprednijih svetskih tehnologija u oblasti mrežne komunikacije, u koje svakako i virtuelizacija mreža spada, predstavlja izuzetan izazov za tehnička lica specijalizovana za automatizaciju VN postrojenja širom sveta.

Softverskom virtuelizacijom ili grupisanjem i uobličavanjem svih komponenti tercijarnog sistema na jednom redundantnom sistemu, pruža se potencijal za olakšano upravljanje i održavanje osetljive računarske opreme.

## LITERATURA

- [1] Kanabar M., 2023, *Building the Grid of the Future through Innovations with Digital Transformation*, PAC World, 64, 20
- [2] IEC 61850-6:2009 – *Configuration language for communication in electrical substations related to IEDs*
- [3] IEC 61850-10:2012 – *Conformance testing*
- [4] IEC 61850-7-420:2021 – *Basic communication structure - Distributed energy resources and distribution automation logical nodes*
- [5] IEC 61850-7-520 *Guidelines for using LNs to model Distributed Energy Resources (DER) functions*
- [6] IEC TR 61850-1:2013 – *Introduction and overview*
- [7] IEC 61850-3:2013 – *General requirements*
- [8] IEC 61850-9-2:2004 - *Communication Networks and systems in substations – Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled Values over ISO/IEC 8802-3. – First Edition*
- [9] IEC 61850-7-2:2010 – *Basic information and communication structure – Abstract communication service interface (ACSI)*
- [10] IEC 61869-9:2016 - *Digital interface for instrument transformers, Table 902, 20*
- [11] A. Apostolov, 2023, *Global Experience with Digital Substations*, PAC World, 66, 4
- [12] *IEC 61850 - Communication networks and systems for power utility automation – Part 5: Communication requirements for functions and device models - Table 1 – Classes for transfer times*
- [13] F. Steinhauser, OMICRON, *Route to IEC 61850: Client/Server, GOOSE and Sampled Values*, Austria 2016
- [14] P.Mohapatra, *Application of Precision Time Protocol Standard with multi-vendor Relays over PRP and HSR Architectures: A Real Test of the PTP Standard in project FITNESS*, SP Energy Networks, UK, PAC World June 2020
- [15] IEC 61850-7-3:2010 - *Communication networks and systems for power utility automation: Basic communication structure – Common data classes*
- [16] IEEE 1588:2019 - *Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*
- [17] B. Baumgartner, IEEE1588/PTP : *The Future of Time Synchronization in the Electric Power Industry*, OMICRON 2018

- [18] IEC/IEEE 61850-9-3:2016 – *Precision Time Protocol profile for power utility automation*
- [19] IEC 61850-9-2:2020 *Edition 2.1 - Communication networks and systems for power utility automation: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3*
- [20] IEC 61850-7-4:2010 – *Basic communication structure – Compatible logical node classes and data classes*
- [21] Srđan Mijušković, EMS AD, Digitalizacija VN Postrojenja – Merni transformatori, CIGRE Srbija 2021
- [22] IEEE 802.1Q:2011 - *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks*
- [23] IEEE 802.3 - Ethernet working group, <https://www.ieee802.org/3/>
- [24] Jeremy McDowell, Jeremy's IT Lab, <https://www.jeremysitlab.com/>
- [25] IEC 61850-90-4:2020 - *Communication networks and systems for power utility automation: Network engineering guidelines*
- [26] [https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.1Q](https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q)
- [27] IEEE P802.1p
- [28] Srđan Mijušković, 2022, Digitalizacija VN Postrojenja – Sampled Values, CIGRE Srbija, 6
- [29] Srđan Mijušković, 2024, Pregled izazova integracije modernih komunikacionih sistema u elektroenergetskim mrežama, Cired, Crna Gora, 7
- [30] Andreas Klein, 2022, *Cyber aware Session 6: Digital Substations, White paper and Webinar - Smart Grid Forums*
- [31] Jos Zenner, 2023, *Virtualize applications in digital substations, Welotec: White paper and Webinar*
- [32] Andreas Klein, 2021, *Cyber secure web desing and network, White paper and Webinar – Omicron: Route to IEC 61850*
- [33] Jens Ljungberg, 2018, “*Evaluation of a Centralized Substation Protection and Control System for HV/MV Substation*”, Thesis, Uppsala universitet

## DIGITALIZATION OF HV SUBSTATIONS – VIRTUALIZATION CONCEPTS

SRĐAN MIJUŠKOVIĆ, WSP UK\*  
ADIS LOVIĆ, ACINEL d.o.o.

BELGRADE  
LJUBLJANA

SERBIA  
SLOVENIA

*Abstract* — The concept of virtualization represents the very basics of the IEC 61850 standard, defined more than two decades ago and made official with the publication of the first edition of the Standard in 2003. The modularity of logical functions, the possibility of allocating protection and control functionalities through the appropriate display of the elements of the HV substation in a digitized environment is the primary idea of the virtualization concept. Through considering the possibilities of related solutions in industrial systems and insight into the potential of adequate models of information and communication technologies (ICT), new possibilities appeared that we associate with the term virtualization. An option with the potential to direct the flow of a large amount of network data in digitized HV substations, the characteristics which shall be analyzed, is VLAN (Virtual Local Area Network). In addition to the above, the term virtualization gains special weight due to the very modern and intriguing model of centralization and virtualization of protection and control system applications. The idea of the paper is to bring the mentioned diverse concepts closer together, as they primarily defined by the identical term - virtualization.

*Key words* — Digitalization, Virtualization, VLAN, IEC 61850.

---

\* srdjan.mijuskovic@wsp.com

D2 05

**DIGITALIZACIJA VN POSTROJENJA – KONCEPTI VIRTUELIZACIJE**

**DIGITALIZATION OF HV SUBSTATIONS – VIRTUALIZATION CONCEPTS**

**SRĐAN MIJUŠKOVIĆ, WSP UK  
ADIS LOVIĆ, ACINEL d.o.o.**

**BEOGRAD  
LJUBLJANA**

**SRBIJA  
SLOVENIJA**

*Kratak sadržaj - Koncept virtuelizacije predstavlja same osnove standarda IEC 61850, definisan pre više od dve decenije i ozvaničen objavljivanjem prve edicije Standarda 2003. godine. U radu su prikazane već duže vreme prisutne logike hardverske virtuelizacije shodno konceptima IEC 61850. Modularnost logičkih funkcija, mogućnost alokacije zaštitno-upravljačkih funkcionalnosti i odgovarajući prikaz samih elemenata VN postrojenja u digitalizovanom okruženju jeste primarna ideja pojma virtuelizacije. Razmatranjem mogućnosti srodnih rešenja industrijskih sistema i uvidom u potencijale adekvatnih modela informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT), dolazimo do novih opcija koje povezujemo s terminom virtuelizacije. Opcija s potencijalom usmeravanja protoka velike količine mrežnih podataka u digitalizovanim VN postrojenjima, čije je karakteristike neophodno sagledati, jeste virtuelna lokalna računarska mreža - VLAN (Virtual Local Area Network). Nastavkom procesa digitalizacije elegantna logika i rešenja koje nudi koncept nativnog VLAN-a pronalaze svoja mesta u energetici, dokazujući da je multidisciplinarni pristup ključan za prevazilaženje tehnoloških zastoja. Prikazane karakteristike čine opisani format nativnog VLAN-a teoretski idealnim mehanizmom za prenos signala vremenske sinhronizacije uređaja u potpuno digitalizovanim sistemima. Pored navedenog, termin virtuelizacije dobija posebnu težinu veoma aktuelnim i intrigantnim modelom centralizovanja i virtuelizacije zaštitno-upravljačkih aplikacija. Softverskom virtuelizacijom ili grupisanjem i uobličavanjem svih komponenti tercijarnog sistema na jednom redundantnom sistemu, pruža se potencijal za olakšano upravljanje i održavanje osetljive računarske opreme. Cilj rada je da približi navedene raznolike koncepte prevashodno definisane identičnim terminom - virtuelizacija.*

**Ključne reči – Digitalizacija, Virtuelizacija, VLAN, IEC 61850**



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.328M](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.328M)

D2 06

## SOFTVERSKI MODUL ZA PRIKAZ I ANALIZU VIBRACIJA

BOJANA MILIĆ \*, DIPL.INŽ.  
RADOMIR STAMATOVIĆ, DIPL.INŽ.  
GORDAN KONEČNI, DIPL.INŽ.  
ŽELJKO AĆIMOVIĆ, DIPL.INŽ.  
GORAN STEFANOVIĆ, DIPL.INŽ.  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN-AUTOMATIKA

BEOGRAD

SRBIJA

*Kratak sadržaj* - U okviru SCADA sistema ostvaren je softverski modul za prikaz, analizu i predikciju karakterističnih elemenata kod monitoringa vibracija rotacionih mašina. Za merenje vibracija korišćen je brzi osmokanalni modul BVM8. Merenja su obavljena u dve ose rotacije. Mereni podaci se smeštaju u posebnu arhivsku relacionu bazu.

Korišćenjem brze Furijeove transformacije (FFT) u odabranim vremenskim intervalima, dobijaju se parametri za frekventnu analizu – spektar, Bodeov dijagram, Nikvistov dijagram, sa odgovarajućim prikazima u okviru aplikacije.

Takođe je omogućeno filtriranje spektra u zadatim opsezima, kao i prikaz izabranih harmonika u vremenskom domenu, tako da se primenom inverzne brze Furijeove transformacije (FFT<sup>-1</sup>) dobijaju orbitalni dijagrami, dijagrami prvog i drugog harmonika itd.

*Ključne reči* — vibromonitoring, SCADA sistem, Furijeova teorija, brza furijeova transformacija (FFT)

---

\* Beograd, Volgina15, bojana.milic@pupin.rs



## 1 UVOD

U kontekstu vibromonitoringa, brza Furijeova transformacija (FFT) omogućava konverziju vremenskih podataka o vibracijama u frekventni domen. To znači da se umesto analize signala u funkciji vremena, može analizirati signal u funkciji frekvencije. Ova promena perspektive omogućava inženjerima da identifikuju specifične frekventne komponente vibracija, kao što su prirodne frekvencije sistema, frekvencije usled disbalansa, nepravilnosti ili kvarova u rotacionim mašinama.

Na primer, kada se vibracije rotacionog uređaja mere tokom vremena, FFT omogućava identifikaciju dominantnih frekvencija u spektru vibracija. Na osnovu ovih frekvencija, moguće je dijagnostikovati specifične probleme kao što su istrošenost ležajeva, disbalans rotora, ili probleme sa poravnanjem. Spektralni prikazi kao što su Bodeov dijagram i Nikvistov dijagram, koji su generisani korišćenjem FFT-a, omogućavaju vizuelnu interpretaciju rezultata i lakše donošenje zaključaka.

Realizacija aplikacije za analizu vibracija kao zasebnog modula u okviru SCADA sistema otvara mogućnosti nadogradnje postojećih SCADA sistema u cilju postizanja sveobuhvatijeg nadzora opreme u postrojenjima.

## 2 FURIJEOV RED

Furijev red predstavlja način za prikazivanje periodičnih funkcija kao beskonačnog zbira sinusnih i kosinusnih funkcija različitih frekvencija. Za funkciju  $f(t)$  koja je periodična sa periodom  $T$ , Furijev red je definisan u trigonometrijskom obliku kao:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (2.1)$$

gde su koeficijenti  $a_0$ ,  $a_n$ , i  $b_n$  određeni formulama:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad (2.4)$$

Podesniji oblik za analizu je ako se primeni Ojlerova formula:

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi \quad (2.5)$$

kada se trigonometrijske funkcije izražavaju preko kompleksne eksponencijalne funkcije:

$$\cos \varphi = \frac{e^{i\varphi} + e^{-i\varphi}}{2} \quad (2.6)$$

$$\sin \varphi = \frac{e^{i\varphi} - e^{-i\varphi}}{2i} \quad (2.7)$$

tada se formula (2.1) može izraziti:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \frac{e^{i\frac{2\pi}{T}nt} + e^{-i\frac{2\pi}{T}nt}}{2} + b_n \frac{e^{i\frac{2\pi}{T}nt} - e^{-i\frac{2\pi}{T}nt}}{2i} \right) \quad (2.8)$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{a_n - ib_n}{2} e^{i\frac{2\pi}{T}nt} + \frac{a_n + ib_n}{2} e^{-i\frac{2\pi}{T}nt} \right) \quad (2.9)$$

Ako se kompleksni koeficijenti uz pozitivne i negativne eksponente označe kao:

$$c_n = \frac{a_n - ib_n}{2} \quad (2.10)$$

$$c_{-n} = \frac{a_n + ib_n}{2} \quad (2.11)$$

dobija se Furijeov red u kompleksnom obliku koji objedinjuje sve harmonike jednim izrazom:

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( c_n e^{i\frac{2\pi}{T}nt} + c_{-n} e^{-i\frac{2\pi}{T}nt} \right) \quad (2.12)$$

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{i\frac{2\pi}{T}nt} \quad (2.13)$$

gde je kompleksni koeficijent  $c_n$  određen formulom:

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-i\frac{2\pi}{T}nt} dt \quad (2.14)$$

### 3 ODNOS IZMEĐU DISKRETNE FURIJEOVE TRANSFORMACIJE (DFT-A) I FURIJEVOG REDA

Ako se periodična funkcija  $f(t)$  uzorkuje u tačkama  $t = n \Delta t$  (gde je  $\Delta t$  vremenski interval između uzoraka), i kada uzmemo ukupno  $N$  uzoraka, DFT nam daje niz koeficijenata koji predstavljaju amplitudu i fazu diskretnih frekvencijskih komponenti.

Vrednosti uzoraka u  $N$  tačaka su:

$$f_n = f(n\Delta t) , \quad n = 0, \dots, N - 1 , \quad (3.1)$$

a period je:

$$T = N\Delta t , \quad (3.2)$$

onda uzorci formiraju diskretni signal  $x_n = f_n$ . Diskretna Furijeova transformacija ovog niza  $x_n$  daje diskretnu prezentaciju Furijeovih koeficijenata funkcije  $f(t)$ .

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta t) e^{-i\frac{2\pi}{N}nk} , \quad n = 0, \dots, N - 1 \quad (3.3)$$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i\frac{2\pi}{N}nk} , \quad n = 0, \dots, N - 1 \quad (3.4)$$

U osnovi, DFT uzima niz vrednosti (poput vremenskih podataka o vibracijama) i izračunava njihove frekventne komponente. Međutim, direktno računanje DFT-a može biti veoma sporo, posebno za duge nizove podataka, jer zahteva kvadratni broj operacija u odnosu na broj tačaka u nizu. Algoritam koji rešava ovaj problem je brza Furijeova transformacija (FFT), smanjujući broj potrebnih operacija sa  $O(N^2)$  na  $O(N \log N)$ , gde je  $N$  broj tačaka u nizu. Ovo značajno ubrzanje čini FFT posebno pogodnim za analizu velikih skupova podataka u realnom vremenu, što je ključno u aplikacijama kao što je vibromonitoring.

#### 4 FFT ALGORITAM

Glavna ideja FFT algoritma je da koristi "divide et impera" pristup. Broj uzorkovanih vrednosti treba da bude  $N = 2^m$ . Prvi korak je da se ulazni niz od  $N$  elemenata deli na dva podniza, pa se jednačina (3.4) može napisati kao zbir parnih i neparnih uzoraka:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n} e^{-i\frac{2\pi}{N}2nk} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n+1} e^{-i\frac{2\pi}{N}(2n+1)k} \quad (4.1)$$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n} e^{-i\frac{2\pi}{N}2nk} + e^{-i\frac{2\pi}{N}k} \cdot \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n+1} e^{-i\frac{2\pi}{N}2nk} \quad (4.2)$$

$$X_k = E_k + e^{-i\frac{2\pi}{N}k} \cdot O_k \quad (4.3)$$

gde su:

$$E_k = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2n} e^{-i\frac{2\pi}{N}2nk} \quad (4.4)$$

$$O_k = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2n+1} e^{-i\frac{2\pi}{N}2nk} \quad (4.5)$$

DFT-ovi podnizovi parnih i neparnih indeksa, a faktor rotacije je

$$W_N^k = e^{-i\frac{2\pi}{N}k} \quad (4.6)$$

Jednačina (4.3) važi za  $k = 0, \dots, \frac{N}{2} - 1$ , tj.  $E_k$  i  $O_k$  se izračunavaju za polovinu harmonika.

Zahvaljujući ortogonalnosti eksponencijale funkcije, za  $(k + \frac{N}{2})$ -ti element imamo:

$$X_{k+\frac{N}{2}} = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n} e^{-i\frac{2\pi}{N}2n(k+\frac{N}{2})} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n+1} e^{-i\frac{2\pi}{N}(2n+1)(k+\frac{N}{2})} \quad (4.7)$$

$$X_{k+\frac{N}{2}} = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n} e^{-i\frac{2\pi}{N}2nk} \cdot e^{-i2\pi} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n+1} e^{-i\frac{2\pi}{N}2nk} \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N}k} \cdot e^{-i2n\pi} \cdot e^{-i\pi} \quad (4.8)$$

Kako je  $e^{-i2\pi} = e^{-i2n\pi} = 1$ , a  $e^{-i\pi} = -1$ , jednačina (4.5) postaje:

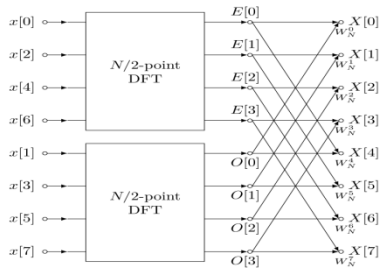
$$X_{k+\frac{N}{2}} = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n} e^{-i\frac{2\pi}{N}2nk} \cdot - e^{-i\frac{2\pi}{N}k} \cdot \sum_{n=0}^{N/2-1} x_{2n+1} e^{-i\frac{2\pi}{N}2nk} \quad (4.8)$$

$$X_{k+\frac{N}{2}} = E_k - e^{-i\frac{2\pi}{N}k} \cdot O_k \quad (4.9)$$

Jednačine (4.3) i (4.9) se kombinuju pomoću leptir operacija:

$$X_k = E_k + W_N^k \cdot O_k \quad (4.10)$$

$$X_{k+\frac{N}{2}} = E_k - W_N^k \cdot O_k \quad (4.11)$$



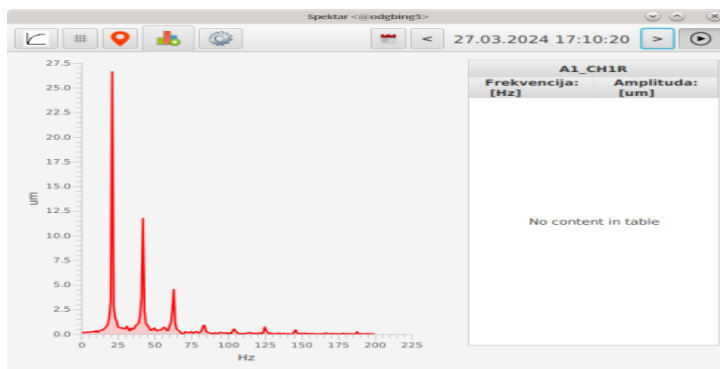
Slika 1 – Primer leptirastog dijagrama

Dalji postupak je rekurzivno računanje DFT-ova manjih podnizova, koji se ponovo deli, dok se ne dođe do osnovnog slučaja sa po 2 ili 1 elementom.

## 5 PRIMENA

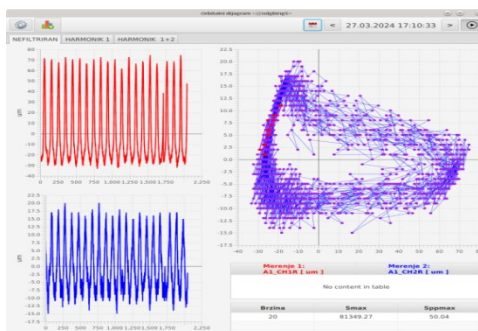
Za prikupljanje podataka o vibracijama korišćen je brzi osmokanalni modul BVM8, koji omogućava simultano merenje vibracija u dve ose rotacije. Ovaj modul omogućava prikupljanje 2000 podataka u sekundi, što je od ključnog značaja za pravovremeno otkrivanje anomalija u radu mašina. Prikupljeni podaci se čuvaju u posebno razvijenoj arhivskoj relacionoj bazi podataka, koja je optimizovana za brzo pretraživanje i analizu velikih količina podataka.

Okosnicu softverskog modula čini algoritam za brzu Furijeovu transformaciju (FFT), koji se koristi za frekventnu analizu merenih podataka. FFT omogućava dekompoziciju kompleksnih

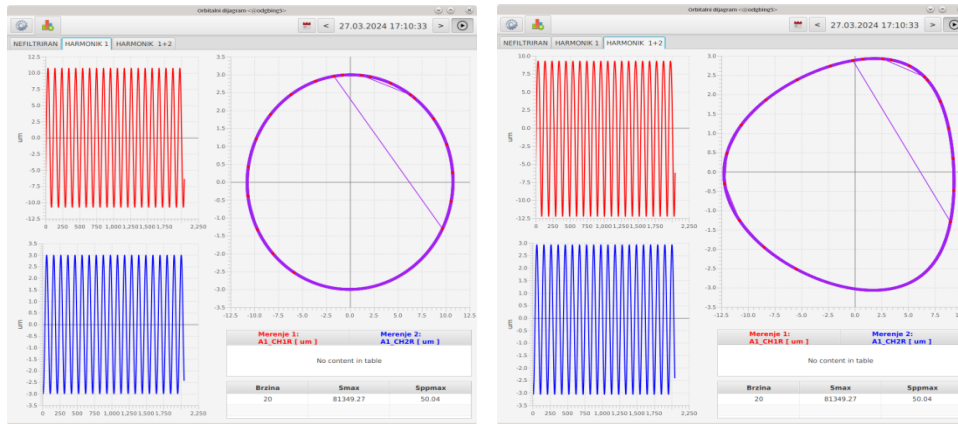


Slika 2 – Spektralni dijagram

signalnih podataka u njihove frekventne komponente, što dalje omogućava detaljnu analizu vibracija. U okviru aplikacije, korisnici imaju pristup različitim grafičkim prikazima, uključujući spektar, Bodeov dijagram, i Nikvistov dijagram. Ovi prikazi omogućavaju inženjerima da identifikuju dominantne frekvencije i potencijalne probleme u radu mašina.



Slika 3 – Prikaz merenih, nefiltriranih, podataka u dve ose u vremenskom domenu

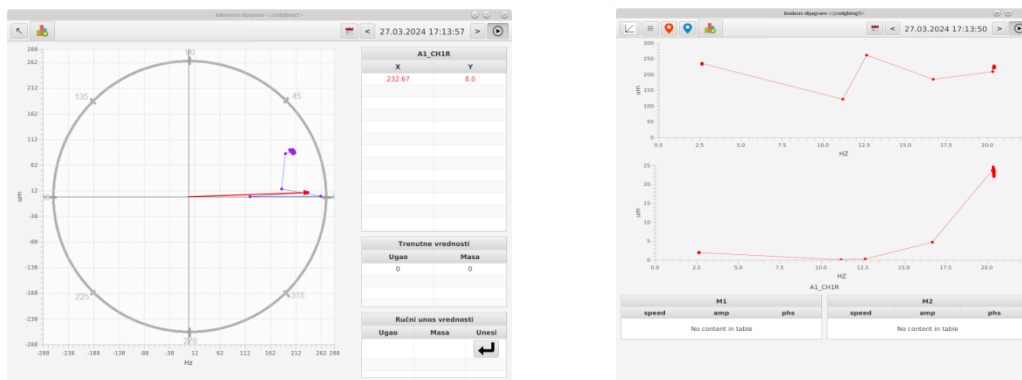


Slika 2 – Primeri orbitalnih dijagrama osnovnog i prvog i drugog harmonika u dve ose

Pored toga, softverski modul omogućava filtriranje frekventnog spektra u zadatim opsezima, što dodatno pomaže u fokusiranju na relevantne vibracione frekvencije. Takođe, modul podržava prikaz specifičnih harmonika u vremenskom domenu, što je posebno korisno za identifikaciju određenih vrsta mehaničkih kvarova.

Jedna od naprednih funkcionalnosti softverskog modula je mogućnost generisanja orbitalnih dijagrama i dijagrama harmonika koristeći inverznu brzu Furijeovu transformaciju ( $FFT^{-1}$ ). Ovi dijagrami pružaju dodatni uvid u dinamiku vibracija, omogućavajući detaljniju analizu i bolju dijagnostiku potencijalnih problema.

Primena ovog softverskog rešenja omogućava smanjenje troškova održavanja i povećanje pouzdanosti mašina kroz pravovremeno otkrivanje nepravilnosti u radu. Modul je prilagodljiv različitim industrijskim potrebama, što ga čini univerzalnim alatom za različite vrste mašina i postrojenja.



Slika 3 – Primer Nyquist-ovog i Bode-ovog dijagrama

## 6 ZAKLJUČAK

Ovaj softverski modul pruža precizne i pouzdane alate za analizu vibracija. Njegova integracija u SCADA sistem omogućava sveobuhvatan pristup monitoringu, analizi i predikciji kvarova, čime se poboljšava efikasnost i sigurnost industrijskih postrojenja. U budućnosti, dalji razvoj modula mogao bi uključivati dodatne algoritme za prediktivnu analitiku i automatsko prepoznavanje obrazaca vibracija, što bi dodatno unapredilo mogućnosti za prevenciju kvarova.

## 7 LITERATURA

1. Cooley James W., Tukey John W, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", *Math. Comput.* *19 (90): 297–301*, doi:10.2307/2003354, JSTOR 2003354, 1965
2. Anders E. Zonst, **Understanding the FFT**, Citrus Press, Titusville, Florida, USA, September 1, 1995
3. Prof. John A. Peacock, **Fourier Analysis**, School of Physics and Astronomy, University of Edinburgh, UK, 2014.

## SOFTWARE MODULE FOR DISPLAYING AND ANALYZING VIBRATIONS

BOJANA MILIĆ\*, DIPL.INŽ.  
RADOMIR STAMATOVIĆ, DIPL.INŽ.  
GORDAN KONEČNI, DIPL.INŽ.  
ŽELJKO AĆIMOVIĆ, DIPL.INŽ.  
GORAN STEFANOVIĆ, DIPL.INŽ.  
INSTITUTE MIHAJLO PUPIN-AUTOMATIKA

BELGRADE

SERBIA

**Abstract** - A software module for display, analysis and prediction of characteristic elements in vibromonitoring was created within the SCADA system. A fast eight-channel module BVM8 was used for vibration measurement. Measurements were made in two axes of rotation. Measured data are stored in a special archival relational database. By using the fast Fourier transform (FFT) in selected time intervals, parameters for frequency analysis are obtained - spectrum, Bode diagram, Nyquist diagram, with appropriate displays within the application. It is also possible to filter the spectrum in the given ranges, as well as display the selected harmonics in the time domain, so that by applying the inverse fast Fourier transformation (FFT<sup>-1</sup>) orbital diagrams, diagrams of the first and second harmonics, etc. are obtained.

**Key words** — vibromonitoring, SCADA system, Fourier theory, fast Fourier transform (FFT)

---

\* Beograd, Volgina15, bojana.milic@pupin.rs

D2 06

**SOFTVERSKI MODUL ZA PRIKAZ I ANALIZU VIBRACIJA**

**SOFTWARE MODULE FOR DISPLAYING AND ANALYZING VIBRATIONS**

**BOJANA MILIĆ \*, DIPL.INŽ.  
RADOMIR STAMATOVIĆ, DIPL.INŽ.  
GORDAN KONEČNI, DIPL.INŽ.  
ŽELJKO AĆIMOVIĆ, DIPL.INŽ.  
GORAN STEFANOVIĆ, DIPL.INŽ.  
INSTITUT MIHAJLO PUPIN-AUTOMATIKA**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj - U okviru SCADA sistema ostvaren je softverski modul za prikaz, analizu i predikciju karakterističnih elemenata kod vibromonitoringa. Za merenje vibracija korišćen je brzi osmokanalni modul BVM8. Merenja su obavljena u dve ose rotacije. Mereni podaci se smeštaju u posebnu arhivsku relacionu bazu.*

*U kontekstu vibromonitoringa, brza Furijeova transformacija (FFT) omogućava konverziju vremenskih podataka o vibracijama u frekventni domen. To znači da se umesto analize signala u funkciji vremena, može analizirati signal u funkciji frekvencije. Korišćenjem brze Furijeove transformacije (FFT) u odabranim vremenskim intervalima, dobijaju se parametri za frekventnu analizu.*

*U okviru aplikacije, korisnici imaju pristup različitim grafičkim prikazima, uključujući spektar, Bodeov dijagram, i Nikvistov dijagram. Ovi prikazi omogućavaju inženjerima da identifikuju dominantne frekvencije i potencijalne probleme u radu mašina.*

*Takođe je omogućeno filtriranje spektra u zadatim opsezima, kao i prikaz izabranih harmonika u vremenskom domenu, tako da se primenom inverzne brze Furijeove transformacije (FFT<sup>-1</sup>) dobijaju orbitalni dijagrami, dijagrami prvog i drugog harmonika itd.*

*Ovaj softverski modul pruža precizne i pouzdane alate za analizu vibracija. Njegova integracija u SCADA sistem omogućava sveobuhvatan pristup monitoringu, analizi i predikciji kvarova, čime se poboljšava efikasnost i sigurnost industrijskih postrojenja.*

**Ključne reči — vibromonitoring, SCADA sistem, Furijeova teorija, brza furijeova transformacija (FFT)**

---

\* Beograd, Volgina15, bojana.milic@pupin.rs





DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.337C](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.337C)

D2 07

## **PRIMJER UVOĐENJA SOLARNIH ELEKTRANA U SISTEM DALJINSKOG NADZORA I UPRAVLJANJA**

**ELVEDIN CERNICA, DŽEMO BOROVIĆ, ENSAR PAŠIĆ  
ELEKTROPRIVREDA BIH D.D. SARAJEVO**

**SARAJEVO**

**BOSNA I HERCEGOVINA**

***Kratak sadržaj*** — Rad opisuje specifične načine uvođenja solarnih elektrana u sistem daljinskog nadzora i upravljanja na primjeru dvije lokacije na području grada Mostara. Na jednoj lokaciji imamo skup od tri susjedne elektrane nazivne snage po 149kW sa kojih je objedinjeno prikupljanje informacija i funkcija upravljanja. Na drugoj lokaciji postoji elektrana nazivne snage 735 kW koja ima nešto drugačiju opremu u funkciji sistema daljinskog nadzora i upravljanja. U cilju povezivanja sa centrom upravljanja koristi se mreža digitalnih radio modema kao i spojni putevi na bazi optičkih vlakana. Rad će obuhvatiti opis odabrane opreme unutar samih objekata solarnih elektrana, opis spojnog puta te aplikacije u centru upravljanja.

***Ključne reči*** —Solarna elektrana, SCADA

## 1 UVOD

Bosna i Hercegovina, zbog svoje klime, ima veliki potencijal za solarnu energiju sa oko 2.000 h godišnje sunčeve svjetlosti, a regije u južnom dijelu zemlje (Hercegovina) imaju oko 2.400 h godišnje sunčeve svjetlosti i količinom zračenja od 1.500 kWh/m<sup>2</sup> godišnje. Fotonaponski energetska potencijal BiH iznosi  $70.5 \times 10^6$  GWh ozračene energije godišnje [1]. Za primjenu fotonaponske tehnologije od velike je važnosti da je kontinuirana sunčeva svjetlost dostupna tokom cijele godine od 9 do 15 sati, zbog 80% energije zračenja od sunca koju Zemlja u tom periodu prima. BiH ima oko 30% veći godišnji kapacitet sunčevog zračenja od nekih zemalja u srednjoj i sjevernoj Evropi (Njemačka, Švedska, Poljska).

### 1.1 Zakonska regulativa vezano za obnovljive izvore na području Federacije BiH

Uredba za korištenje obnovljivih izvora energije donesena je sredinom 2010. godine kojim je federalna vlada ovlastila javna preduzeća Elektroprivredu BiH u Sarajevu i Elektroprivredu HZ HB u Mostaru da potpisuju ugovore sa vlasnicima solarnih elektrana o garantovanom otkupu struje na 12 godina. U nastavku su dati izvodi iz važnijih zakonskih akata sa akcentom na problematiku priključenja na distributivnu mrežu.

#### ➤ **Zakon o električnoj energiji Federacije Bosne i Hercegovine 01-02-1-360-01/23.**

*\*1) Operator distributivnog sistema ne može biti vlasnik, razvijati, voditi ili upravljati postrojenjem za skladištenje energije, osim vlasništva nad postrojenjima za skladištenje namijenjenih isključivo za potrebe distribucije električne energije. (Član 117 Zakon o EE)*

*d) "Dispečiranje" znači upravljanje tokovima električne energije (snage) i regulacija napona u elektroenergetskom sistemu; (Član 6 Zakon o EE)*

*gg) "Operator skladišta energije" znači fizičko ili pravno lice koje obavlja djelatnost skladištenja i odgovorna je za upravljanje postrojenjem za skladištenje; (Član 6 Zakon o EE)*

*Član 52.*

*(Obaveze operatora distributivnog sistema)*

*aa) obezbijedi prioritete u pristupu mreži i dispečiranju proizvođačima koji proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora i u efikasnoj kogeneraciji, u skladu sa propisima, uvažavajući tehnička ograničenja elektroenergetskog sistema,*

*ee) poduzima mjere za upravljanje zagušenjima u distributivnoj mreži*

#### ➤ **Mrežna pravila distribucije 01-07-467-02/18**

*Članak 24.*

*(Zadatci DCU)*

*b) prati i upravlja naponskim prilikama dajući naloge za promjenu položaja regulacijskih preklopki na transformatorima,*

*c) prati i upravlja tokovima snaga,*

*l) definira i provodi optimalni režim rada proizvodnih jedinica priključenih na distribucijski sustavu nadležnosti DCU, u kontekstu optimalne proizvodnje/potrošnje jalove energije i održavanja naponskih prilika u mreži,*

*Članak 27.*

*(Upravljanje postrojenjima krajnjih kupaca/proizvođača)*

(1) Kroz ugovore o korištenju distribucijske mreže, ODS i krajnji kupci/proizvođači koji su SN postrojenja zadržali u svom vlasništvu, definiraju način upravljanja ovim postrojenjima u sljedećim slučajevima:

b) ako ODS procijeni da manipulacije u postrojenju krajnjeg kupca/proizvođača mogu utjecati na pouzdan rad distribucijske mreže u nadležnosti ODS-a.

(2) Nadzor nad upravljanjem proizvodnog objekta uređuje se odgovarajućom pogonskom uputom, koju sačinjava proizvođač i usuglašava s ODS-om.

Članak 30.

(Upravljanje sustavom pri preopterećenju elemenata mreže)

(6) U slučaju da je zbog nastalih okolnosti nemoguće preuzeti proizvedenu električnu energiju iz svih proizvodnih jedinica priključenih na distribucijski sustav, DCU pri dispečiranju daje prednost proizvodnim jedinicama koje koriste obnovljive izvore energije ili otpad i kogeneracijskim postrojenjima, a sukladno Zakonu o korištenju obnovljivih izvora energije i učinkovite kogeneracije i Općim uvjetima.

Članak 52.

(Održavanje napona u distribucijskoj mreži)

(5) Po nalogu ODS-a, u održavanju napona u distribucijskoj mreži sudjeluju i proizvođači električne energije priključeni na ovu mrežu.

Članak 53.

(Utvrdjivanje potrebe za kompenzacijom jalove energije)

(1) ODS utvrđuje potrebu za kompenzacijom jalove energije kod krajnjih kupaca i proizvođača priključenih na distribucijsku mrežu, a s ciljem osiguranja napona u propisanim granicama.

### ➤ **Zakon o korištenju obnovljivih izvora energije i efikasne kogeneracije 01-02-1-462-01/23.**

pp) Prosumer označava krajnjeg kupca električne energije koji proizvodi električnu energiju iz OIEiEK za dio svojih potreba iz sopstvenog energetskeg postrojenja s mogućnošću predaje više proizvedene električne energije u mrežu u vidu energetskeg ili monetarnog kredita, (Član 3 Zakon o korištenju OIEiEK)

## **1.2 Tehnička preporuka TP-17**

Javno preduzeće Elektroprivreda BiH donijelo je Tehničku preporuku (TP-17) za priključenje i pogon distribuirane proizvodnje.

Pod distribuiranom proizvodnjom u smislu ove tehničke preporuke smatraju se elektrane na bazi obnovljivih izvora energije (OIE) ili kogeneracije i odnose se na sljedeće elektrane priključene na elektrodistributivni sistem (EDS):

- Hidroelektrane
- Vjetroelektrane
- Solarne elektrane
- Kogeneracijska postrojenja (kombinovani ciklus proizvodnje toplotne i električne energije);
- Ostale elektrane na bazi obnovljivih izvora energije (npr. elektrane na biomasu, elektrane na geotermalne izvore, hibridne elektrane i sl.)

U smislu ove Tehničke preporuke podjela distribuirane proizvodnje je također izvršena prema instaliranoj aktivnoj snazi elektrane i prema nazivnom naponu na mjestu priključenja elektrane na EDS.

Osnovni kriteriji koji trebaju biti zadovoljeni za priključenje elektrane na distributivnu mrežu su:

- kriterij dozvoljene snage s obzirom na brzu promjenu napona
- kriterij snage kratkog spoja
- kriterij flikera
- kriterij dozvoljenih viših harmonika struja.

Ukoliko nije zadovoljen neki od osnovnih kriterija priključenja elektrane ili neki od energetskih kriterija mreže, potrebno je predvidjeti određena pojačanja mreže. Stvaranje uslova za priključenje elektrane najčešće se odnosi na sljedeće postupke:

- Promjena položaja regulacionih preklopki transformatora.
- Izgradnja novih dijelova mreže (npr. novog 10(20) kV ili 0,4 kV izlaza), zamjena postojećih vodiča sa vodičima većeg presjeka, prelazak postojeće 10 kV mreže na 20 kV naponski nivo, izgradnja nove primarne TS 110/x kV i dr.

IKT rješenje obuhvata rješenje povezivanja telekomunikacionim vezama (TK) operatora distributivnog sistema (ODS) i objekata elektrane za potrebe manualnog, automatiziranog i daljinskog upravljanja, nadzora, kontrole i očitavanja parametara uređaja i brojila. Osnovna, ručna (manuelna) manipulacija, očitavanje brojila i parametara elektrane mora biti podržana govornom porukom (depešom) s lokacije elektrane od i ka dispečerskog centra upravljanja (DCU) nadležnog ODS-a. Isto se odnosi na automatiziranu manipulaciju putem tastera, motornih pogona i lokalne automatike.

Daljinsko upravljanje i nadzor obavljaju se isključivo iz regionalno nadležnog DCU-a putem TK sistema, SCADA programskog paketa i izvršnih telemetrijskih uređaja i senzora na lokaciji elektrane. Sve ovo čini cjelovit sistem daljinskog nadzora i upravljanja (SDNIU)

Preporuka klasificira sve elektrane po nazivnoj aktivnoj snazi kako slijedi:

Elektrana Tip A,  $P < 150 \text{ kW}$

Elektrana Tip B\*,  $P < 150 \text{ kW}$  (ali zbog značajne pozicije na mreži potrebno je uvesti SDNIU)

Elektrana Tip B,  $1000 \text{ kW} > P \geq 150 \text{ kW}$

Elektrana Tip C,  $P \geq 1000 \text{ kW}$

U zavisnosti od tipa elektrane predviđena je obaveza razmjene podataka sa dispečerskim centrom upravljanja što je predstavljeno tabelama ispod. Za tip A ne postoji obaveza uvođenja u SDNIU.

Tabela 1. Informacije koje se od SE prenose ka DCU

Procesna veličina	Podatak	Informacija	Tip elektrane		
			B*	B	C
Signalizacija	Status preklopke lokalno / daljinski	L / D	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Signalizacija	Status prekidača za odvajanje	Uključen/Isključen (ON / OFF)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mjerenja	Napon na prekidaču za odvajanje U1, U2, U3	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mjerenja	Napon pomoćnog napajanja IED-a	V	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Signalizacija	Kvar IED	-	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Signalizacija	Signali djelovanja zaštite $I>$ , $I>>$ , $U<$ , $U>$ , $f<$ , $f>$	-	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Signalizacija	Ispad komunikacije od PM do IKT ormara	ON / OFF	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Signalizacija	Pristup ormaru sa TK opremom	ON / OFF	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Signalizacija	Status prekidača proizvodne naprave (npr Generatorski prekidač)	Uključen/Isključen (ON / OFF)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mjerenja	Struja I1, I2, I3	A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Signalizacija	Setovana snaga elektrane	MW	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mjerenja	Trenutna aktivna snaga (P)	W / kW	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mjerenja	Trenutna reaktivna snaga (Q)	Var / kVAr	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mjerenja	Frekvencija (f)	Hz	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mjerenja	$\cos \varphi$	-	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mjerenja	Podaci sa PQ monitora		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabela 2. Informacije koje se od DCU prenose ka SE

Procesna veličina	Podatak	Informacija	Tip elektrane		
			B*	B	C
Komanda	Komanda prekidačem za odvajanje	ON / OFF	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Komanda	Setovanje aktivne snage	Limit: (W, kW)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Komanda	Definisanje $\cos \varphi$	Set-point: -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Komanda	Radna tačka napona	Set-point: (V)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Komanda	Radna tačka reaktivne snage	Set-point: (VAr, kVAr)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Signalizacija	Ispad komunikacije od DCU ka PM	ON / OFF	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

## 2 IZGRADNJA SOLARNIH ELEKTRANA

Prilikom organizacije upravljanja obnovljivim izvorima (dispečiranje), korisno je analizirati geografskoj rasprostranjenosti distribuiranih izvora. U to smislu dobar pokazatelj može biti broj zahtjeva (podnesenih do maja 202 godine) za izdavanje tehničkih uslova za uvođenje u SDNiU kako je dato tabelom u nastavku po pojedinim elektrodistributivnim podružnicama EP BiH.

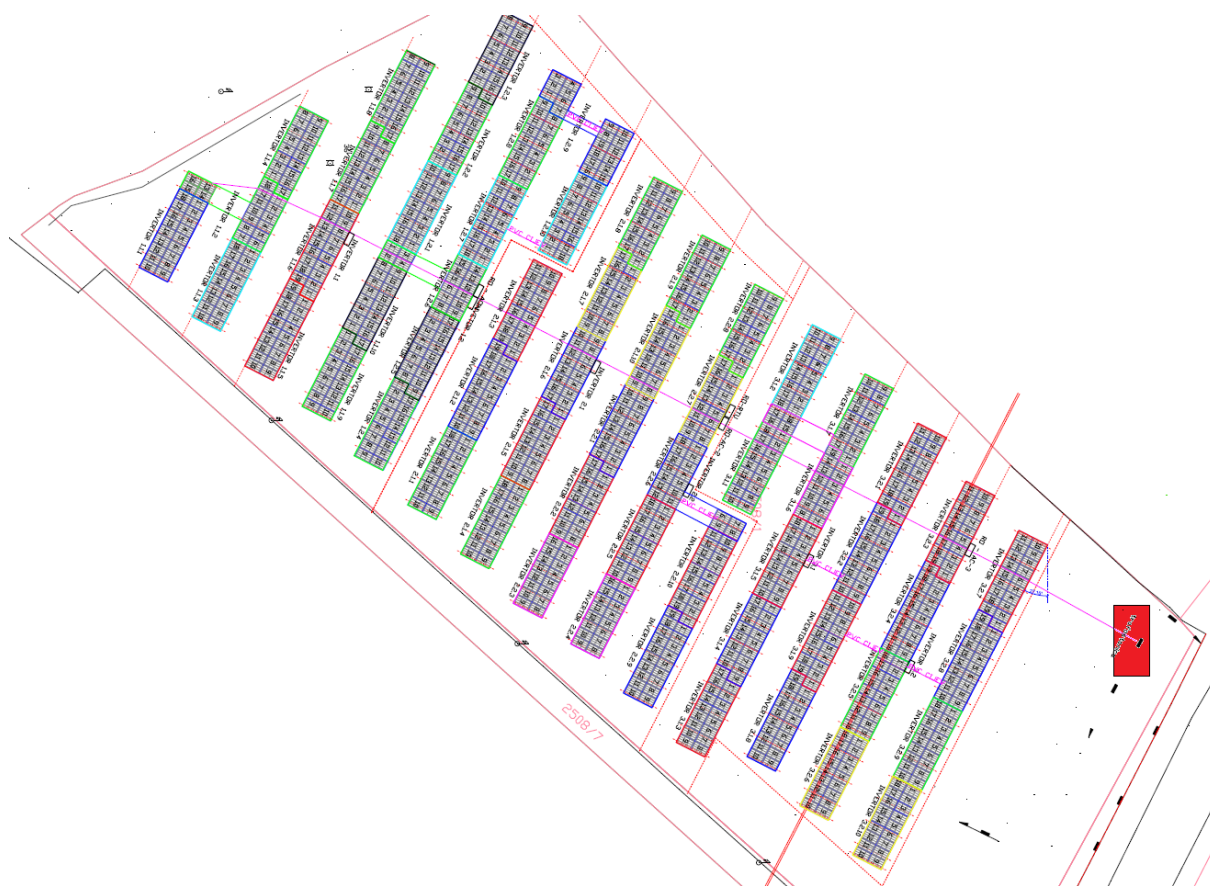
Tabela 3. Broj zahtjeva za izdavanje uslova priključenja SE

<b>ED podružnica</b>	<b>Zahtjevi</b>
<i>ED Zenica</i>	64
<i>ED Tuzla</i>	36
<i>ED Travnik</i>	56
<i>ED Sarajevo</i>	35
<i>ED Mostar</i>	34
<i>ED Bihać</i>	31
<i>Ukupno</i>	<b>256</b>

Ovaj rad fokusiraće se na dvije solarne elektrane koje su puštene u rad tokom mjeseca maja 2024. godine na području ED Mostar.

## 2.1 SE Dračevice

SE Dračevice se nalazi blizu grada Mostara i sastoji se iz tri dijela nazivne snage po 149 kW. Niskonaponski priključak je izveden do susjedne TS 10/0.4kV gdje se energija dalje plasira na SN mrežu. Ispod je dat tlocrt elektrane za naznačenom pozicijom TS (označeno crvenom bojom).



Slika 1. Tlocrt SE Dračevice

Kao osnova sistema fotonaponske solarne elektrane, ugrađeni su fotonaponski paneli od 540W.

Fotonaponske ćelije izvedene su kao monokristalne. Karakteriše ih visok stepen iskorištenosti, posebno za kontinentalna područja i područja sa maglom. Otpor ovih ćelija pri visokim temperaturama je smanjen. Moduli su otporni na fizička oštećenja kao naprimjer oštećenja nastala udarom groma, grada ili slično a otporni su i na koroziju.

Elektrana se sastoji od ukupno 1050 solarnih fotonaponskih panela snage 540W. Svaki panel građen je od 144 solarne ćelije (6x24). Dimenzija fotonaponskog panela je (2279x1134x35)mm, a težina 29 kg.

Uz svaki od tri dijela SE nalazi se rasklopni ormar (RO) za neophodnom mjerno – zaštitno – upravljačkom opremom te 2 DC/AC invertora izlazne snage od po 110 kVA, ograničena na 149kW na pragu elektrane.

Ormar sadrži prekidač za odvajanje FNE od elektrodistributivnog sistema nazivne struje 250A, a koji sadrži podesivi termički i kratkospojni član, te koji je opremljen pomoćnim kontaktima, špulom isklopa, motornim pogonom za daljinske manipulacije uključanja i isključenja. Ostvarene su sljedeće zaštite, funkcionalnost i informacije prema dispečerskom centru:

a) Zaštitne funkcije:

- Strujne zaštitne funkcije ANSI: 49,51,50,51N
- Naponske zaštitne funkcije ANSI: 27,59,10-minutna nadnaponska zaštita (59S1)
- Frekventne zaštitne funkcije ANSI: 81L, 81H
- Zsštita od ostrvskog rada elektrane

b) Signalizacija:

- Status preklopke lokalno/daljinski
- Status prekidača za odvajanje
- Signali djelovanja zaštite
- Kvar IED
- Kvar ispravljača/UPS-a
- Prorada osigurača u pomoćnim strujnim krugovima
- Ispad komunikacije od proizvodnog mjesta do IKT ormara
- Ispad komunikacije sa DCU
- Pristup ormaru sa TK opremom
- Nestanak pomoćnog napona/rad na baterijama

c) Mjerenja:

- I,U,P,Q,f, cosfi
- Napon napajanja (pomoćni napon) IED
- Broj prorade prekidača
- Memorija događaja

d) Upravljanje:

- Upravljanje prekidačem za odvajanje
- Setovanje aktivne snage
- Automatski ponovni uklop elektrane, nakon 60 s provjere uslova

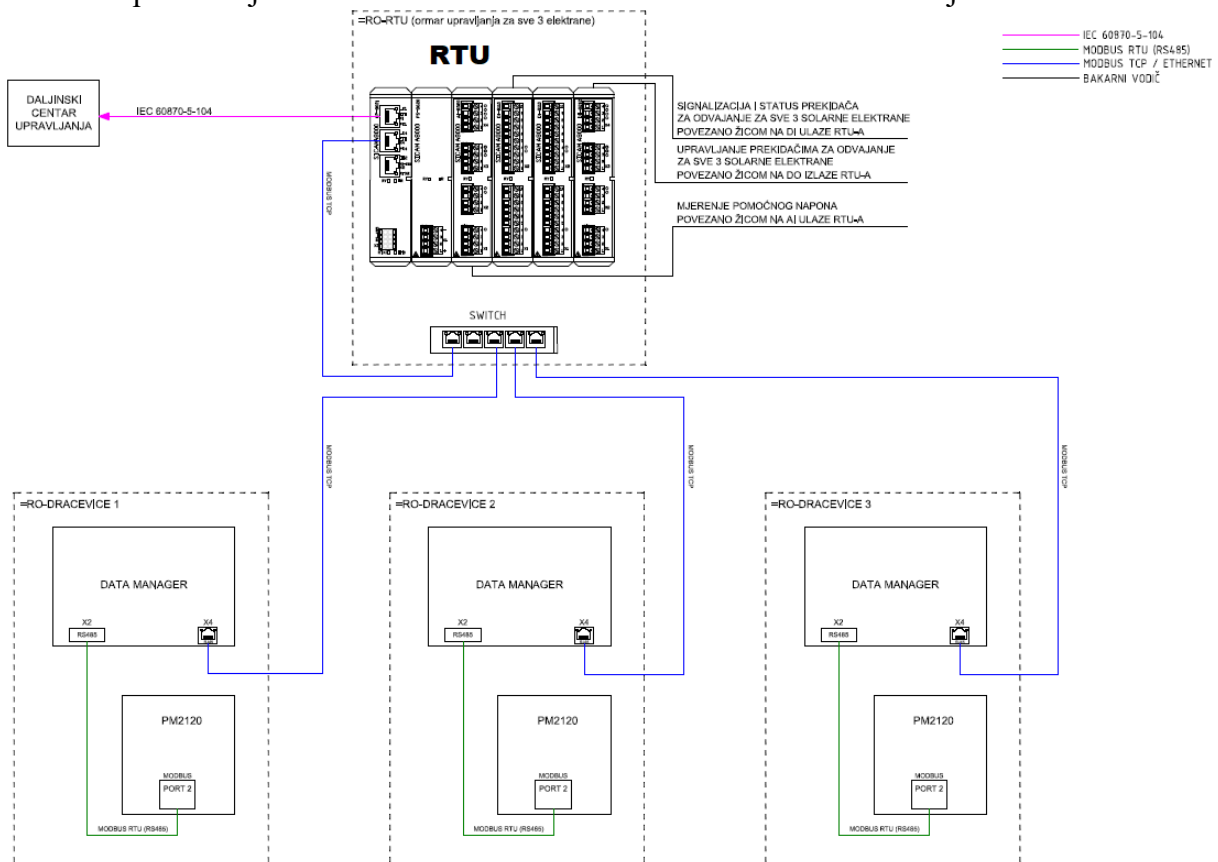
Prikupljanje informacija sa mjerno zaštitno upravljače opreme vrši se putem RTU uređaja koji je objedinio informacije sa sva tri dijele SE.

Na I/O module RTU uređaja uvedeni su statusi prekidača za odvajanje, signali prorade zaštite i opšti signali.

U RTU uređaj je parametriran komunikacioni protokol IEC 60870-5-104 preko kojeg je moguć daljinski nadzor nad solarnom elektranom kao i upravljanje prekidačem za odvanjanje i upravljanje aktivnom snagom.

Data logger u RO ormaru će sa jedne strane komunicirati sa inverterima i multimetrom, a sa druge sa RTU uređajem. Komunikacioni protokol između data logger-a i RTU uređaja je MODBUS TCP/IP.

Na slici ispod data je šema komunikacionih veza RO ormara i RTU uređaja.



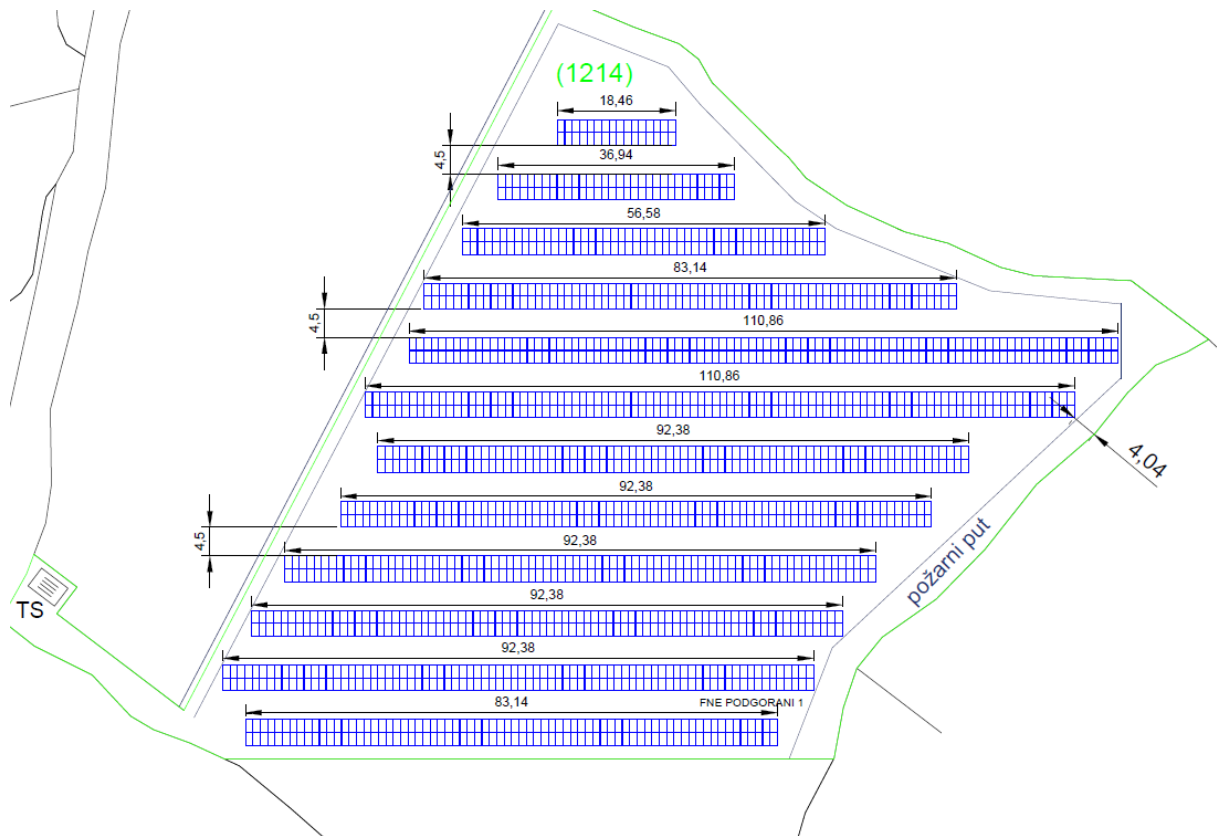
Slika 2. Shema komunikacionih veza unutar SE Dračevice

Za vezu prema DCU Mostar koristiće se komunikacioni link na bazi optičkih vlakana.

## 2.2 SE Podgorani

Ova elektrana se takođe nalazi blizu grada Mostara. Nazivna snaga je 735 kW. Postoji ukupna 1666 panela nazivne snage 545 W. Tlocrt elektrane je dat na slici ispod.





Slika 3. Tlocrt SE Podgorani

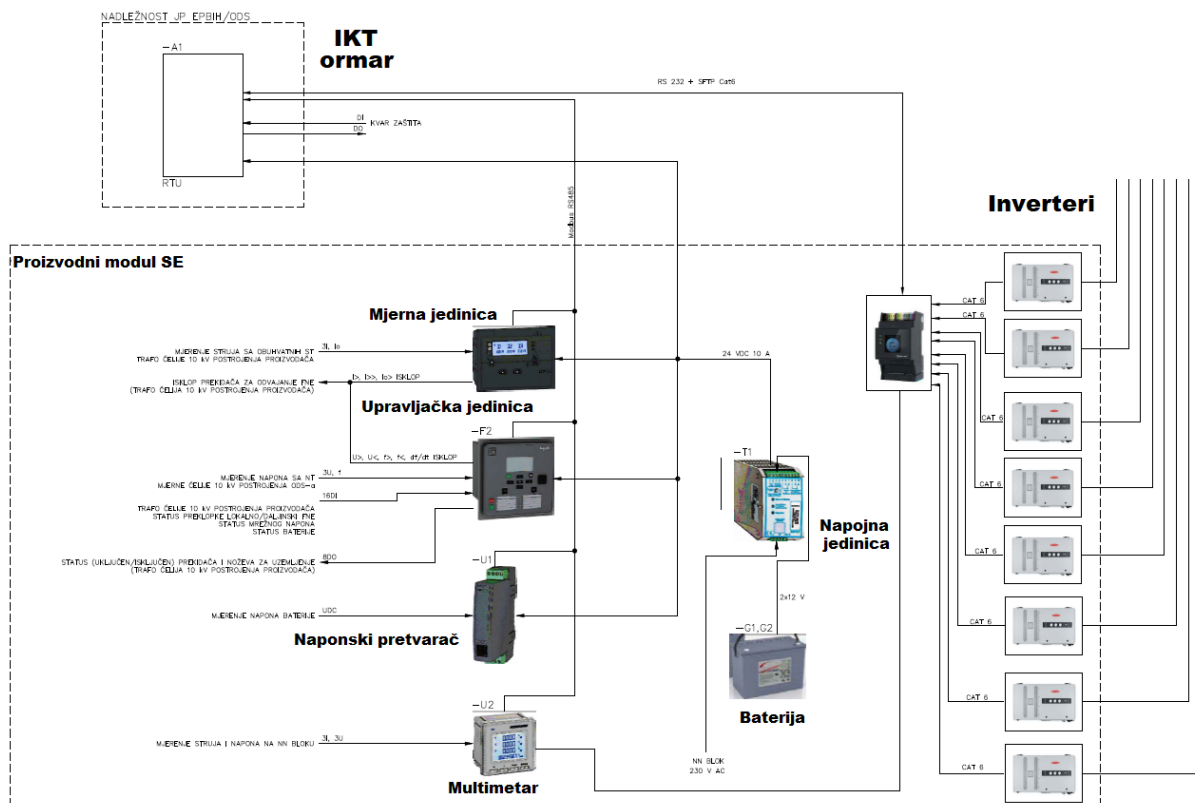
Ugrađeno je ukupno osam invertera. U blizini se nalazi izgrađena TS 10/0.4 kV putem koje se vrši plasman energije u elektrodistributivnu mrežu. U objektu TS je ugrađen ormar sa mjerno zaštitno upravljačkom opremom.

Za potrebe zaštite elektrane i zaštitnih funkcija: nadnaponska ( $U \gg$ ), podnaponska ( $U <$ ,  $U \ll$ ), nadfrekventna ( $f >$ ), podfrekventna ( $f <$ ), ROCOF ( $df/dt$ ) u ormar je ugrađen zaštitni relej tipa TP-10. Mjerenje faznih/linijskih napona, frekvencije zaštitni relej uzima sa NT mjerne ćelije SN postrojenja ODS-a. Mjerni krugovi releja su odvojeni od mjernih krugova obračunskog mjernog mjesta – brojila i zaštićen je zasebnim trolnim automatskim minijaturnim prekidačem (MCB). Zaštitni relej djeluje na isklopni kalem prekidača trafo ćelije SN postrojenja FNE. Za potrebe uvođenja informacija sa zaštitnog releja (mjerenje napona, prorade zaštita, ispad automata) u SDNiU TP-10 je opremljen komunikacionim protokolom Modbus RTU (RS485).

Za potrebe uvođenja mjerenja faznih struja u SDNiU, koristi se zaštitni uređaj tipa VIP 410 A, ugrađen na trafo ćeliji SN postrojenja FNE. VIP 410 A je opremljen komunikacionim protokolom Modbus RTU (RS485) koji će se koristiti za slanje mjerenja prema telemetrijskom uređaju (RTU).

Za potrebe uvođenja mjerenja P, Q,  $\cos\phi$  u SDNiU, koristi se analizator mreže tipa MF9, ugrađen na 0,4 kV NN bloku. MF9 je opremljen komunikacionim protokolom Modbus RTU (RS485) koji će se koristiti za slanje mjerenja prema telemetrijskom uređaju (RTU).

Šema spajanje opreme u ormaru data je na slici ispod.



Slika 4. Šema spajanja komponenti u ormaru SE Podgorani

### 3 SISTEM DALJINSKOG NADZORA I UPRAVLJANJA

#### 3.1 IKT ormar u objektima SE

Shodno tehničkoj preporuci TP-17 nabavka IKT ormara u svrhu funkcije daljinskog nadzora i upravljanja je obaveza JP EPBiH. Investitor je dužan osigurati sve zahtjevane signale koji će se uvesti u telemetrijski uređaj. IKT ormar podrazumijeva i ugradnju komunikacione opreme što može podrazumijevati digitalni radio modem ili terminalnu opremu veze na bazi optičkih vlakana.

Tip komunikacione veze određuje i sama pozicija solarne elektrane pa se posebnih tehničkim rješenjem definiše način uvezivanje elektrane prema centru upravljanja.

#### 3.2 Mreža digitalnih radio modema

U JP EPBiH postoji razvijena komunikaciona infrastruktura na bazi mreže digitalnih radio modema industrijske izvedbe. Ukoliko se solarne elektrane nalazi u zoni pokrivanja ove mreže tehničko rješenje će podrazumijevati nabavku dodatnog modema u samoj SE. Ukoliko ne postoji zona pokrivanja analizira se mogućnost instalacije dodatne repetitorske lokacije. Također se vrši analiza mogućnosti realizacije optičkog spojnog puta pa se bira povoljnija varijanta sa tehno-ekonomskog aspekta.

Trenutno je u fazi i analiza mogućnosti ugradnje GPRS modema kako bi se koristila i mreže nekog od Telekom operatera.

### 3.3 Aplikacija u centru upravljanja

U JP EPBiH postoji SCADA/DMS/OMS sistem (u nastavku SDO) kao rezultat modernizacije poslovnih procesa. Sistem je obuhvatio sve elektrodistributivne podružnice. Radi se o sistemu na jedinstvenoj softverskoj platformi pri čemu se svakoj elektrodistributivnoj regiji dodjeljuju prava pristupa. Kao najvažniji ciljevi implementacije SDO sistema mogu se izdvojiti:

- Smanjenja u prekidu napajanja kupaca
- Smanjenja tehničkih i netehničkih gubitaka primjenjujući napredne tehnike analize i optimizacije
- Prevencije poremećaja na mreži
- Pобољшanja sigurnosti tokom održavanje mreže i postrojenja
- Dostupnost informacija o stanju na mreži bilo kojem ovlaštenom korisniku na bilo kojoj ovlaštenoj lokaciji
- Promocije kvalitetnijeg i efikasnijeg rada kroz provedbu timske saradnje, uniformnosti informacija i primjene standardizirane obrade podataka
- Efektivne integracije sa drugim poslovnim i tehničkim sistemima kompanije

Bitan faktor u smanjenju prekida u napajanju kupaca u mreži JP EPBiH predstavlja lociranje kvara. Što je kvar brže i tačnije lociran znatno su manja vremena zastoja odnosno popravke kvara i vraćanje mreže u prvobitno stanje.

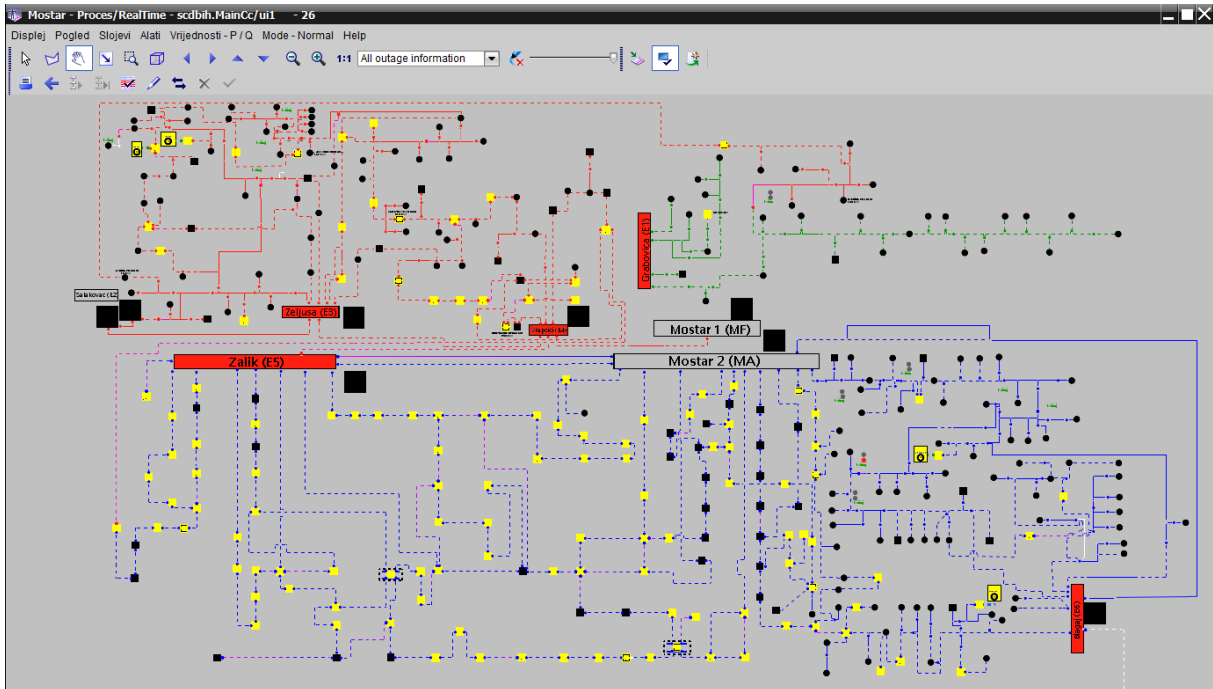
Unutar SDO sistema egzistira skup aplikacija za rad sa distributivnom mrežom (DNA) koji povećava opservabilnost mreže i daje korisniku širok pogled trenutnog stanja mreže u realnom vremenu. Osigurava i dinamičku optimizaciju distributivne mreže te automatski detektuje stanje kvara na elementima mreže ili na samoj mreži i daje optimalu restauraciju područja pogođenih kvarom. Sve aplikacije su tako dizajnirane da podržavaju različite tipove distributivnih mreža (velike radijalne ili manje petljaste strukture, simetrične balansirane sisteme i nesimetrične nebalansirane sisteme). Model distributivne mreže i količina podataka potrebna za analizu mreže može biti veoma velika. Dodatno, kvalitet podataka igra značajnu ulogu za dobijanje rezultata. Zbog ovoga je i podržan moćan alat za validaciju podataka u cilju pomoći korisniku da detektuje i ispravi greške.

DNA je podjeljen u više različitih aplikacija. Ove aplikacije mogu biti iskorištene da odgovore zadacima i strukturi sistema te poboljšaju opservabilnost mreže. Ova modularna struktura se lako prilagođava rastu sistema. Glavne karakteristike su: automatska verifikacija kvaliteta i kompletnosti mrežnih podataka, kompletni i konzistentni proračuni trenutnog stanja distributivne mreže i detekcija pogrešnih mjerenja [8]. DNA se sastoji od:

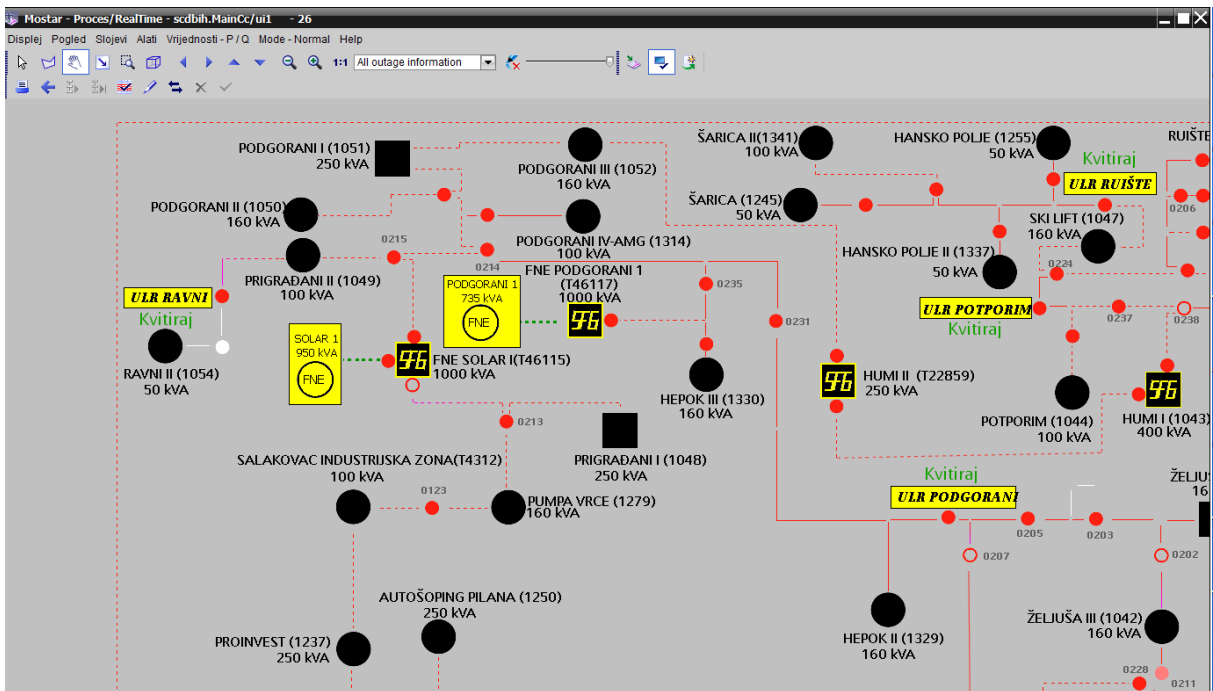
- Distribution System Power Flow (DSPF)
- Distribution System State Estimator (DSSE)
- Short-Term Load Scheduler (STLS)
- Fault Management (FM) koji obuhvata Fault Location (FLOC) i Fault Isolation and Service Restoration (FISR)
- Volt-Var Control (VVC)
- Optimal Feeder Reconfiguration (OFR)
- Data Validation (DV)

Svi ovi moduli igraju značajnu ulogu kod prikljućanje solarnih elektrana čiji utjecaj na mrežu postaje sve značajniji.

Na slici 5. dat je primjer jednog od displeja za prikaz elektrodistributivne mreže, dok je na slici 6. detaljnije prikazan dio sa ucrtanom lokacijom SE Podgorani.



Slika 5. Generalni prikaz distributivne mreže grada Mostara



Slika 6. Prikaz distributivne mreže sa preciznijom lokacijom SE Podgorani

## 4 ZAKLJUČAK

Usljed velikog broja pristiglih zahtjeva sa priključenje solarnih elektrana na elektrodistributivnu mrežu te ubrzanu dinamiku izgradnje na terenu veliki izazov će biti održati stabilnost elektrodistributivnog sistema. Bez obzira na analize koje se provode kod izdavanja saglasnosti za priključenje praksa obično pokazuje kompleksniji uticaj na mrežu. Praćenje naponskih prilika, tokova snaga i opterećenja postaje veliki izazov i za dispečersko osoblje u centrima upravljanja. Korištenje integrisanog SCADA/DMS softvera će dati veliki doprinos kvalitetnom praćenju ovog procesa. Primjer dvije solarne elektrane obrađene u ovom radu ukazuje na raznolikost proizvođača opreme što može dovesti do usložnjavanja uvezivanja u sistem daljinskog nadzora i upravljanja. Elektroprivreda BiH je tehničkom preporukom obavezana da nabavlja IKT ormar za potrebe uvezivanja u SDNiU što može usporiti realizaciju zbog provođenja javne nabavke i odabira najpovoljnijeg ponuđača. Ostaje da se razmotri izmjena tehničke preporuke kojom bi se definisala obaveza investitoru solarne elektrane da nabavlja IKT ormar shodno tehničkim zahtjevima definisanim od strane JP EP BiH. Treba napomenuti da realizacija komunikacione veze može značajno podići troškove investitoru pa se teži ka prenosu podataka putem GPRS mreže Telekom operatera gdje je to moguće.

## LITERATURA

- [1] Renewables Readiness Assessment, International Renewable Energy Agency (IRENA), septembar 2023
- [2] Zakon o električnoj energiji Federacije Bosne i Hercegovine 01-02-1-360-01/23, Vlada FBiH 2023.
- [3] Mrežna pravila distribucije 01-07-467-02/18, JP EPBiH 2018.
- [4] Zakon o korištenju obnovljivih izvora energije i efikasne kogeneracije 01-02-1-462-01/23, Vlada FBiH 2023.
- [5] Izvedbena dokumentacija SE Dračevica, april 2024.
- [6] Izvedbena dokumentacija SE Podgorani, maj 2024.
- [7] Tehnička preporuka TP 17, EP BiH, 2023.
- [8] Tehnička dokumentacija Siemens Power Spectrum, juni 2021.

# EXAMPLE OF INTRODUCING SOLAR POWER PLANTS INTO THE REMOTE MONITORING AND CONTROL SYSTEM

Elvedin Cernica, Džemo Borovina, Ensar Pašić  
ELEKTROPRIVREDA BIH D.D. SARAJEVO

SARAJEVO

BOSNIA AND HERZEGOVINA

*Abstract*— The paper describes specific ways of introducing solar power plants into the system of remote monitoring and management on the example of two locations in the area of the city of Mostar. At one location, we have a set of three adjacent power plants with a rated power of 149kW each, from which information collection and management functions are combined. At another location, there is a power plant with a nominal power of 735 kW, which has slightly different equipment in the function of a remote monitoring and control system. In order to connect with the control center, a network of digital radio modems is used, as well as connection paths based on optical fibers. The paper will include a description of the selected equipment within the solar power plant facilities themselves, a description of the connection path and applications in the control center.

*Key words* — Solar power plant, SCADA.

**PRIMJER UVOĐENJA SOLARNIH ELEKTRANA U SISTEM DALJINSKOG  
NADZORA I UPRAVLJANJA**

**EXAMPLE OF INTRODUCING SOLAR POWER PLANTS INTO THE REMOTE  
MONITORING AND CONTROL SYSTEM**

**Elvedin Cernica, Džemo Borovina, Ensar Pašić  
ELEKTROPRIVREDA BIH D.D. SARAJEVO**

**SARAJEVO**

**BOSNIA AND HERZEGOVINA**

*Kratak sadržaj* – Zbog svoje klime i velikog potencijala solarne energije te zbog pojeftinjenja solarnih panela i prateće opreme, Bosna i Hercegovina je postala privlačna za investitore u solarne elektrane. Sa druge strane elektrodistributivna preduzeća se susreću sa novim izazovima, jer pasivna mreža sada postaje aktivna, te je od velike važnosti praćenje zagušenja na mreži i prevencija ispada. Bez obzira što se u posebnim softverskim alatima vrši modelovanje mreže i analiza uticaja novih priključaka solarnih elektrana, neophodno je uspostaviti nadzor i upravljanje nad ovim objektima kako bi se spriječili neželjeni efekti. Rad opisuje dva specifična načina uvođenja solarnih elektrana u sistem daljinskog nadzora i upravljanja na primjeru dvije lokacije na području grada Mostara. Na jednoj lokaciji imamo skup od tri susjedne elektrane nazivne snage po 149kW sa kojih je objedinjeno prikupljanje informacija i funkcija upravljanja. Na drugoj lokaciji postoji elektrana nazivne snage 735 kW koja ima nešto drugačiju opremu u funkciji sistema daljinskog nadzora i upravljanja. U cilju povezivanja sa centrom upravljanja koristi se mreža digitalnih radio modema kao i spojni putevi na bazi optičkih vlakana. Na početku rad objašnjava zakonsku regulativu na osnovu koje se vrše priključenja na mrežu, zatim obuhvata opis odabrane opreme unutar samih objekata solarnih elektrana, te opis spojnog puta i aplikacije u centru upravljanja. Od velike važnosti su softverski moduli koji obuhvataju proračune tokova snaga u realnom vremenu te i drugi opisani moduli koje koristi dispečersko osoblje u cilju optimalnog vođenja elektrodistributivnog sistema.

*Ključne reči* – Solarna elektrana, SCADA



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.352DJ](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.352DJ)

**D2 08**

## **DIGITALNA TRANSFORMACIJA KROZ IMPLEMENTACIJE SIGURNOSNIH I BEZBEDNOSNIH STANDARDA U DOMENU OPERACIONIH TEHNOLOGIJA**

**VLADAN ĐOKIĆ\***  
**DORNIER GROUP EAST d.o.o.**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* — U radu su prikazani opšti pristupi i metode za implementaciju sigurnosnih i bezbednosnih standarda u proizvodnji, prenosu i distribuciji električne energije.

*Ključne reči* — Informacione tehnologije (IT), Operacione tehnologije (OT), Funkcionalna sigurnost i standardi, Cyber bezbednost i standardi, Industrijski kontrolni sistemi (ICS).

### **1. UVOD**

U proteklih dvadeset godina u proizvodnim pogonima električne energije u Republici Srbiji, kako u termo i hidro, tako i u sektorima prenosa i distribucije električne energije izvršena je zamena zastarelih upravljačkih/kontrolnih i sistema zaštite sistema novim mikroprocesorskim uređajima i sistemima.

Uvođenjem novih upravljačkih i tehnologija zaštita koje se ubrzano razvijaju, mora se standardizovati način na koji se uređuje, primenjuje i prati funkcionalnost, sigurnost i bezbednost tih tehnologija, njihova fleksibilnost kao i načini korišćenja podataka u Digitalnoj transformaciji.

---

\* Kralja Milana 3, 11000 Beograd, [vladan.djokic@dornier-group.com](mailto:vladan.djokic@dornier-group.com)



U Republici Srbiji, kako u velikim-složenim, tako i u manjim postrojenjima za proizvodnju prenos i distribuciju električne energije, potrebno je izvršiti usklađivanje već implementiranih sistema za upravljanje i zaštitu sa važećim standardima iz oblasti operacionih tehnologija i standardima za funkcionalnu sigurnost postrojenja. Zahtevi za pomenuto se još dublje ispoljavaju zbog upliva novih tehnologija distribuirane „zelene“ neupravljive proizvodnje električne energije.

## **2. STANDARDI ZA SIGURNOST I BEZBEDNOST U PROCESNOJ INDUSTRIJI**

Sigurnost i bezbednost su dva ključna svojstva u Industrijskim kontrolnim sistemima (ICS) i imaju identičan cilj, da ICS zaštite od ispada – neuspeha.

Sigurnost ima za cilj da zaštiti sistem od propusta da bi se izbegla opasnost a bezbednost je fokusirana na zaštitu sistema od grešaka prouzrokovanih zlonamernim napadima.

U našem jeziku se termini Sigurnost (Safety) i Bezbednost (Security) veoma često, čak i u prevodima, definišu dvosmisleno i često mešaju. U standardima su izrazi definisani nedvosmisleno.

- **SIGURNOST (Safety)** - Sloboda od rizika i štete  
Sigurnost industrijskih sistema se fokusira na pojave u sistemu koje se definišu kao rizik i kako da se rizik svede na prihvatljiv nivo.
- **BEZBEDNOST (Security)** – Zaštita od napada i pretnji  
Bezbednost sistema se fokusira na sprečavanje nezakonitih ili neželjenih pristupa sistemima, ometanju normalnog rada i neautorizovanom pristupu poverljivim informacijama (s namerom ili nenamerno).

Najsvrsishodniji, najjednostavniji i najbezbedniji način da se sa sigurnošću može računati da su upotrebljeni upravljački i sistemi zaštite odgovarajući i da svoju funkciju vrše sigurno (Functional Safety) i bezbedno (Cyber Security) je da se koriste i poštuju evropski standardi, direktive i pravilnici koji uređuju ovu oblast.

Dva najsveobuhvatnija standarda za Funkcionalnu sigurnost i Cyber bezbednost, između ostalih standarda, koji su više usmereni na konkretne uređaje, su:

- IEC 61511 – Funkcionalna sigurnost E/E/EP u procesnoj industriji (korisnici, projektanti i integratori – Life Cycle)
- IEC 62443 – Industrijske mreže i Sistemska Bezbednost (CYBER SECURITY)

Gore pomenuti standardi, uz standard IEC 61508 koji se odnosi na proizvođače, su usvojeni kao SPRS standardi.

Za implementaciju ovih standarda je neophodno izraditi i doneti pravilnike o upotrebi na odgovarajući način kao što je slučaj u imlementaciji ISO 27000 serije standarda koji se koriste za Informacione tehnologije.

### 3. ICS (INDUSTRIJSKI KONTROLNI SISTEMI), OT (OPERACIONE TEHNOLOGIJE), IT (INFORMACIONE TEHNOLOGIJE)

Industrijski Kontrolni Sistemi (ICS) su skup uređaja koji direktno kontrolišu proizvodne procese u industriji i drugim granama privrede, saobraćaja, infrastrukture i dr.

Termin ICS (koji se često u literaturi i u samim standardima pominju i kao IACS), pokriva DCS, PCS, SCADA, RTU, RTL, ESD, PCD, SIS, HIPPS i druge sisteme za zaštitu, kontrolu i upravljanje procesima.

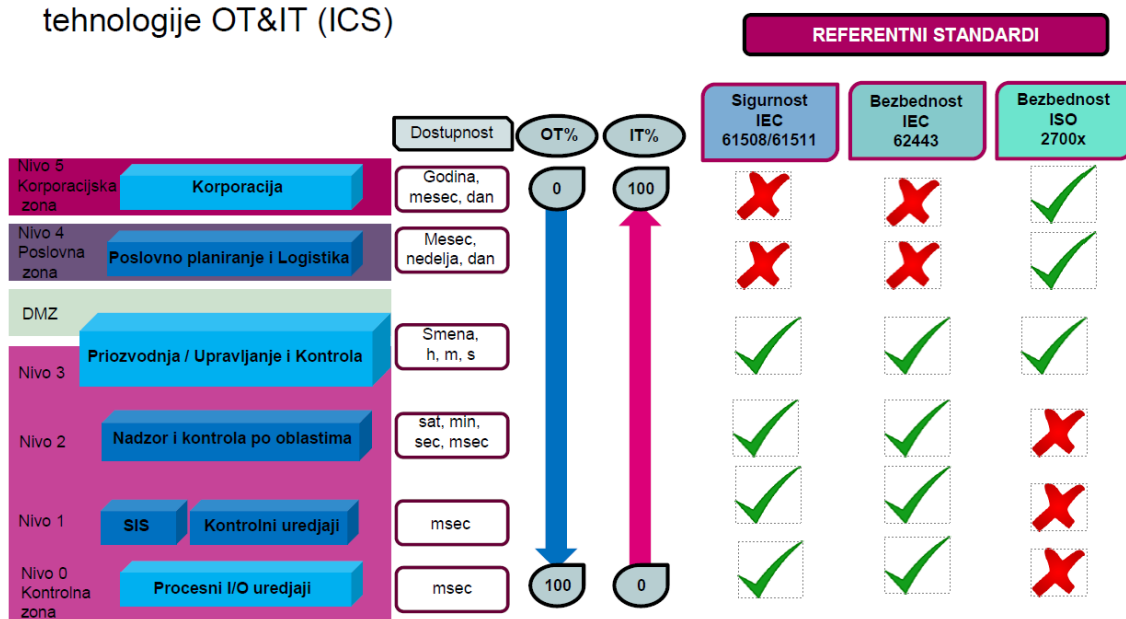
Industrijski Kontrolni Sistemi takođe koriste i komercijalno dostupne softverske proizvode (comercial of the shelf COTS) kao što su Windows, Oracle, Linux, SQL, MySQL i drugi.

U industriji, gde se pojavljuju kontrolni sistemi, ICS je predstavljen kao Operaciona Tehnologija OT (Operational Technology).

OT je termin koji se koristi za različite tehnologije kojima se upravlja procesima i sastoji se takođe od hardvera i softvera kao i IT. U fizičkom smislu nema skoro nikakve razlike između Informacionih (IT) i Operacionih (OT) tehnologija sem u njihovom domenu korišćenja.

Industrijski kontrolni sistemi su u suštini kombinacija (saradnja izmedju Operacionih i Informacionih tehnologija) ali pristup u odnosu na standarde se razlikuje.

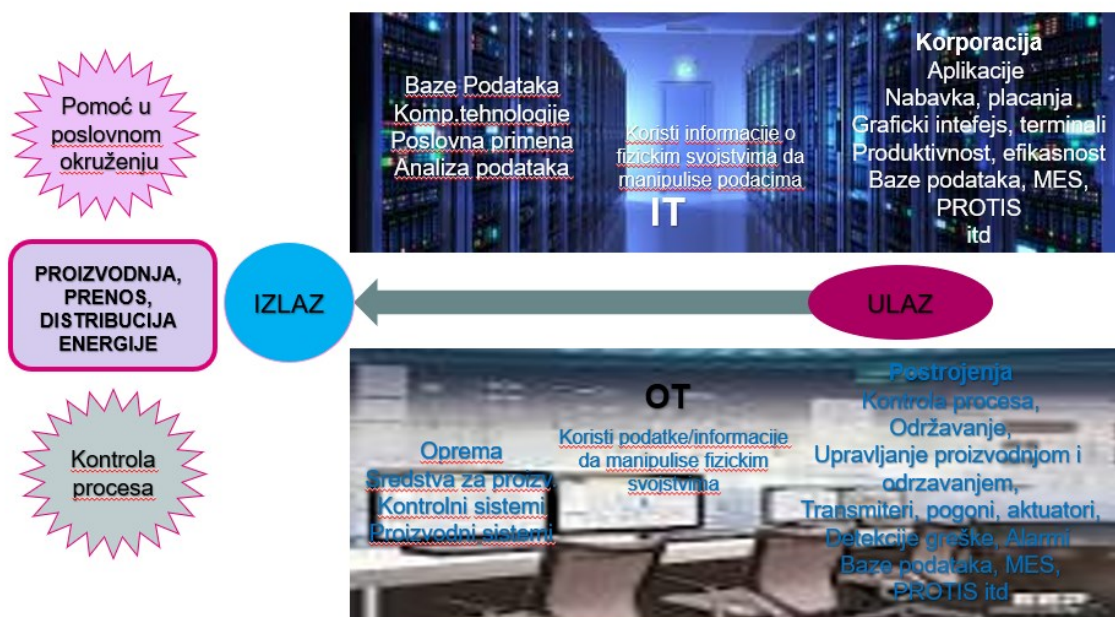
- Referentni Standardi koji pokrivaju Operacione i Informacione tehnologije OT&IT (ICS)



Slika 1

Najprostija definicija razlike između Operacionih i informacionih tehnologija je da OT koristi podatke-informacije da reguliše i upravlja (manipulise) fizičkim svojstvima dok IT koristi informacije o fizičkim svojstvima za sakupljanje i obrađivanje (manipulisanje) podacima.

## Operacione Tehnologije OT vs Informacione Tehnologije IT



Slika 2

### 4. FUNKCIONALNA SIGURNOST OPERACIONIH TEHNOLOGIJA (SPRS/IEC 61511 I SPRS/IEC 61508)

Funkcionalna sigurnost predstavlja deo ukupne sigurnosti i bezbednosti Kompanije /Sistema i postiže se u slobodi da se ne prihvati rizik:

- Postizanje slobode da se ne prihvati rizik kroz (koristeći) **SIS** (Safety Instrumented System)
  - Električni / Elektronski / Programabilni elektronski sigurnosni sistemi u skladu sa IEC 61508 i IEC 61511
  - Primeri:
    - Havarijsko isključivanje sistema (Emergency Shut Down, ESD)
    - Sistem za upravljanje gorionicima (Burner Management System, BMS)
    - Sva oprema koja je deo SIS-a (Safety Instrumented System) :
      - Finalni element
      - Logika
      - Senzor

Menadžment Funkcionalne Sigurnosti kao prvi korak

- Menadžment Funkcionalne Sigurnosti ima zadatak da u procesu proizvodnje/eksploatacije bilo kog dela Procesu i celokupnog Procesu, kontinualno osigurava nesmetan rad Sistema za Funkcionalnu sigurnost (SIS) u procesu (tamo gde se koriste) i obezbedi/postavi uslove koje će održavati Proces u sigurnom stanju ili u stanju sigurnog zaustavljanja procesa (fail-safe).
- Internacionalni Standardi za Funkcionalnu sigurnost IEC 61508 i IEC 61511 kao specifičan standard za celokupnu procesnu industriju su sa poslednjom decenijom prošlog veka postali sastavni deo mnogih procesnih/proizvodnih organizacija/kompanija. Svi kompleksni zahtevi proistekli iz ovih Rizik baziranih

standarda se uspešno implementiraju i formiraju ključno praćenje živornog cikusa od strane Menadžmenta Funkcionalne sigurnosti u datoj Organizaciji/Kompaniji.

- Ključni element ovih Standarda je koncept strukturiranog praćenja životnog ciklusa sigurnosti (safety life cycle) i funkcionalno upravljanje procesom u kome se zahteva sigurnost.

### **Spektar Funkcionalne sigurnost postrojenja**

Pri izgradnji novih procesnih i Termo postrojenja, modernizaciji, revitalizaciji i proširenju postojećih postrojenja, izvođači i korisnici postrojenja moraju poštovati odgovarajuće standarde za Funkcionalnu sigurnost. Ovo uključuje osnovni standard IEC 61508, kao i izvedene standarde za procesnu industriju IEC 61511 i DIN EN 50156 za termo postrojenja. Iz pomenutog proizilaze mnoga pitanja, na primer:

- Kada se i koji standardi i direktive koriste, koji pravilnici?
- Kako se to odnosi na zaštitu opreme/inventara?
- Kako isplanirati FSM?
- Koji su neophodni dokumenti za viši nivo u organizaciji kompanije (FSM) i nadležne institucije (Inspektorat, Revizije, Procene, TÜV, Exida itd.)?
- Kako izgraditi sistem upravljanja i SIS da odgovara standardima?
- Kako SIS funkcijama (SIF) postići zahtevane parametre pouzdanosti?

Da bi se dosledno sproveda Funkcionalna sigurnost u procesu / sistemu, potrebno je uzeti u obzir sigurnosni životni ciklus.

### **Planiranje Funkcionalne Sigurnosti**

Implementacija upravljanja Funkcionalnom Sigurnošću pomoću sigurnosnog plana.

Stručna izrada analize rizika i opasnosti.

Planiranje i projektovanje sigurnosnih funkcija od senzora, preko kontrole do pogona.

Izrada specifikacija sigurnosnih zahteva (SRS).

Analiza pouzdanosti i overa celokupne sigurnosti sistema.

Standardom utvrđena uputstva za testiranje i test protokoli za periodična testiranja.

### **Planiranje SIL-a**

SIL proračun za celokupnu sigurnosnu petlju. Proračun PFD, Određivanje tolerancije hardverskog ispada (HFTL hardware failure tolerance) itd.

Planiranje senzora, aktuatora i pouzdane kontrole, uzimajući u obzir verovatnoću neizvršenja i HFTL odgovarajuću funkciju sigurnosti.

Nabavka odgovarajuće dokumentacije.

Određivanje optimalnog inspekcijiskog intervala.

Izrada uputstava za testiranje.

### **Planiranje i realizacija**

Studije izvodljivosti i tehničke specifikacije.

Kontrolu tehničkog zadatka i tenderske dokumentacije.

Podrška pri puštanju postrojenja u rad i vođenje procesa itd.

## 5. CYBER BEZBEDNOST OPERACIONIH TEHNOLOGIJA (OT) IEC 62443 IEC 62443 KAO VODIČ U IMPEMENTACIJI BEZBEDNOSTI U ICS

Cilj u primeni serije standarda IEC 62443 je da se poboljša bezbednost, dostupnost, integritet opreme i komponenata sistema i poverljivost podataka koji se koriste u Industrijskim Kontrolnim Sistemima (ICS) kao i da se obezbede uslovi za dalju nabavku i implementaciju opreme, komponenata i alata koji će se koristiti u ICS.

Usklađenost sa zahtevima iz IEC 62443 ima za cilj da se poboljša “Cyber Security” i koristi se kao pomoć u identifikaciji i rešavanju slabosti postojećeg bezbednosnog sistema, smanjivanju rizika od kompromitovanja postojećih podataka, ili izazivanje degradacije (kontinualno-diskontinualno uništavanje) opeme (hardvera i softvera).

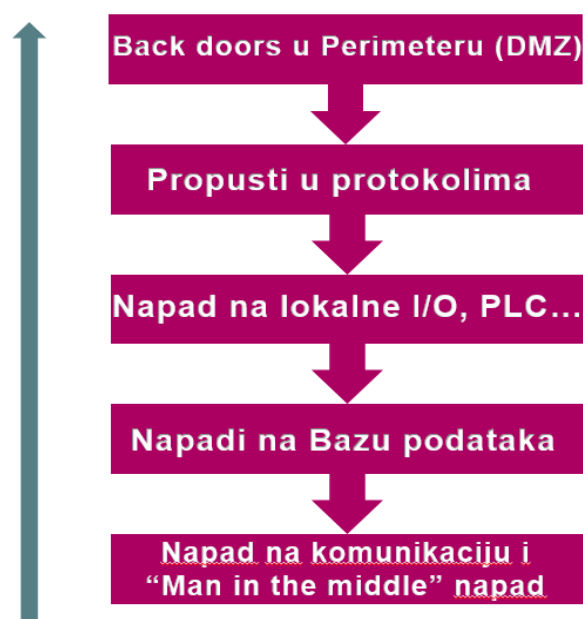
Serijski standardi IEC 62443 se zasniva na već utvrđenim standardima za Bezbednost opšte namene u celokupnom okviru Informacionih Tehnologija kao što je ISO 27000 serija, standardi IEC 15408 (Information security, cybersecurity and privacy protection- Evaluation criteria for IT security) i IEC 18045 (Evaluation criteria for IT security — Methodology for IT security evaluation) i drugi, i identifikuje, definiše i otklanja razlike u pristupu od strane OT prema IT i od IT “Information Security” (ISO 2700x) prema OT.

### Bezbednost Informacionih tehnologija (OT) u ICS

- Sistemi za kontrolu i upravljanje proizvodnjom/procesom (ICS) se realizuju u okviru internih i eksternih kompjuterskih mreža određene Organizacije/Kompanije.
- Prenos podataka i komandnih signala između različitih sistema i različitih mreža povećava mogućnost za upad u sisteme i mreže i povećava osetljivost na različite vrste uticaja u samim sistemima i mrežama.
- Neophodno je sprečiti unutrašnji i spoljni neovlašćeni pristup kako bi se osigurala dostupnost i integritet celokupnog sistema i mreža u Kompaniji/Organizaciji.

Načesći poznati načini napada na Industrijske kontrolne sisteme (ICS)

- Odbrana od napada u dubinu (In Depth) je najefikasnija ako se primeni sistematski.
- Svi napadi se ne mogu sprečiti jednim tipom nivoa odbrane ili akcije bezbednosti.
- Najslabija tačka u sistemu je najverovatnije i meta napada.
- Najpouzdaniji metod bezbednosti ICS-a je od dole na gore! Od OT prema IT



Slika 3

## 6. CYBER SECURITY IMPLEMENTACIJA (OT+IT)

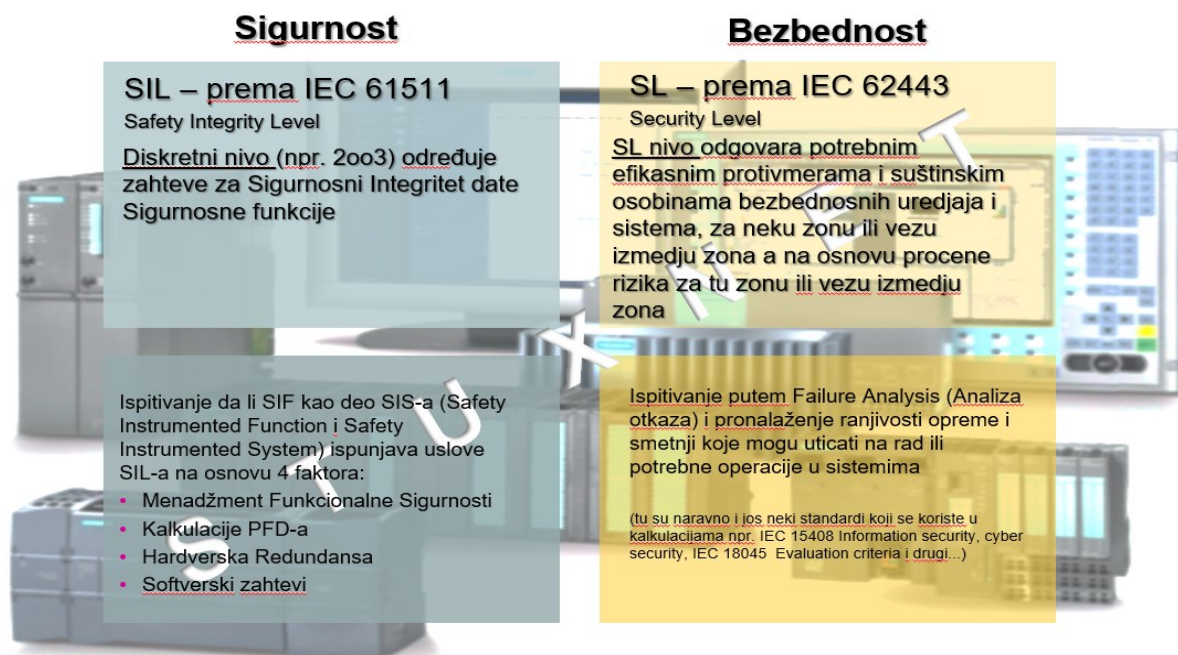
Sadašnja tehnička dostignuća omogućuju da IT mreže i računarski sistemi imaju vezu sa spoljašnjim svetom preko interneta. To daje višestruke mogućnosti operateru koji koristi daljinski sistem upravljanja, održavanja ili vrši globalno preuzimanje podataka. Ključna reč INDUSTRY 4.0 (četvrta industrijska revolucija ili danas popularno Digitalizacija). Na ovaj način nastaju mrežno tehničke konekcije sve do nivoa automatizacije odnosno do sistema za upravljanje procesom. Ove višestruke mogućnosti su povezane sa povećanim rizikom u pogledu IT bezbednosti, kroz bezbednosne propuste i mogu dovesti do gubitaka u proizvodnji, ali takođe do sveobuhvatnih pretnji po društvo i životnu sredinu. Niz zakona, direktiva i regulativa stavlja odgovornost na stranu operatera. Odatle proizilazi mnogo pitanja kao na primer:

- Koji standardi i direktive se i kad koriste?
- Kakvo je stanje tehnike?
- Kako su projektovani interfejsi?
- Kako izgleda optimalna IT bezbednost?
- Kako treba podesiti upravljanje sistemom IT bezbednosti?
- Koje obaveze za dalje obaveštavanje u procesu postoje (CERT)?

Da bi se obezbedila OT+IT bezbednost u postrojenjima potrebno je rešiti tehnički problematična mesta kao i implementirati zadatke upravljanja procesom. Pri tome se treba fokusirati na centralni deo postrojenja, upotrebljene sisteme upravljanja, njihove periferije i nadređene korisničke, inženjerske i sisteme upravljanja procesima.

### Sertifikovana oprema i uređaji

Kao što postoje opreme i uređaji koji se koriste u funkcionalnoj sigurnosti prema Functional Safety standardima IEC 61508 i IEC 61511, tako postoji i oprema koja je sertifikovana po IEC 62443 standardima.



Slika 4



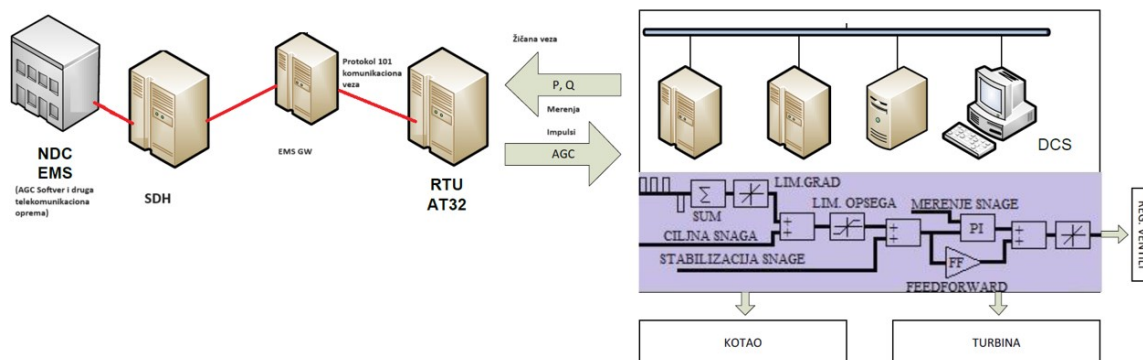


Slika 5

Primer:

Bidirekciona komunikacija izmedju EPS-a i EMS-a

Sekundarna regulacija učestanosti i snage razmenjena na jednoj od jedinica TENT-a.



Slika 6: Skica komunikacionog sistema bloka uključenog u sekundarnu regulaciju

Slika prikazuje komunikacionu vezu izmedju NDC-a (EMS) i DCS-a (ICS) na TENT-u i ostvaruje se preko protokola IEC 60870-5-101 i žičanom vezom između RTU-AT32 i dalje na druge ICS mreže i izvršne uređaje.

Primer pokazuje potrebu da se sprovedu SFA (sistem failure analysis) i druge analize veza između relacionih baza podataka, da bi se onemogućio neovlašćen pristup.

## 7. Digitalna transformacija

Da bi se pojednostavio pristup putanje prema digitalnoj transformaciji neophodno je definisati nivoe na kojima se ona (digitalna transformacija) razvija.

Digitizacija – proces digitizacije zapocinje u uređajima koji podatke koji se nalaze u samom procesu pretvara u digitalne signale/podatke. Analogne signale posle konverzije u digitalne signale i same binarne signale u takođe digitalne signale. Ovi signali se kasnije koriste u digitalizaciji.

Digitalizacija je proces u kome se digitalni signali koriste u obradi istih. Njihove uzročno posledične veze i akcije donose nove digitalne signale koji se koriste kao akcija u odnosu na stanje u procesu. Digitalizacija unapređuje akciju i reakciju na stanje u procesu. Pored pomenutog istovremeno digitalizacija ostvaruje i diskretno sakupljanje podataka u bazi podataka.

Digitalna transformacija – Korišćenje podataka iz baze podataka je osnovni vid digitalne transformacije. Transformisanje podataka na način koji je potreban pojedinim aplikacijama i algoritmima u procesu dizajniranja nove poslovne aplikacije koja integriše digitalizovane podatke kroz novu aplikaciju je u suštini sama digitalna transformacija i stvara osnove novog poslovnog okruženja.

Primer:

Kao primer se može navesti trenutna zamena pametnih brojila koja se može svrstati u IoT (Internet of Things) koji su još jedan vid razvoja digitalizacije i posledične digitalne transformacije u sferi korišćenja podataka sakupljenih iz lokalnih uređaja i centralizovanih u relacionim bazama podataka.

U ovom procesu je svrsishodno iskoristiti normative iz standarda IEC 62443 i definisati najslabije tačke u sakupljanju podataka iz pametnih brojila.

## 8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je kratko upoznavanje sa trenutnim stanjem u oblasti **funkcionalne sigurnosti** u operacionim tehnologijama i **cyber bezbednosti** u operacionim tehnologijama kao osnove za sveobuhvatnu digitalnu transformaciju.

Prvi korak u realizaciji ovih standarda za bezbednost i sigurnost je:

- Analiza postojećeg stanja u Kompaniji na bazi koje bi se dali konkretni predlozi za dalju realizaciju/implementaciju i primenu pomenutih standard tokom životnog ciklusa.
- Utvrđivanje horizontalnih i vertikalnih kapaciteta kompanije za potrebe implementacije i dalje održavanje Sistema tokom životnog ciklusa.
- Rangiranje problema po proizvodnim jedinicama.
- Utvrđivanje specifičnih algoritama i potrebne dokumentacije za implementaciju i dalji kontinualan rad.
- Utvrđivanje i implementacija standardizovanih templejta u okviru pojedinačnih proizvodnih jedinica.
- Dokumentacija.

Ovime bi se nivo sigurnosti i bezbednosti podigao do nivoa sigurnosti i bezbednosti kompanija u Evropi i okruženju.

Ideja vodilja za sve korisnike ovih standarda je očuvanje imovine, održavanje i unapređenje proizvodnje i smanjivanje štetnog uticaja na zdravlje i okolinu kao i smanjenje troškova osiguranja imovine. Uz sve to i održati rentabilan proizvod i respektabilan odnos prema vlasničkoj strukturi i obavezama koje proizilaze iz statusa kompanije.

Takođe, namera rada je da u najkraćim crtama iznese trenutni status Operacionih i



Informacionih tehnologija u Evropi i predlog za način njihove implementacije u okviru korporacija EPS, EMS, EDB ili bilo koje druge Kompanije. Standardi i njihova implementacija i primena u Evropi nije vezana za državne organe već samo kao i svaki tehnički standard za tehniku. Provera usklađenosti standarda, verifikacija i validacija, procenjivanje i revizije se vrše od strane nezavisnih kompanija.

Problemi koji nastaju u impementaciji ovih standarda su prvenstveno organizacione prirode i mogu se rešavati samo organizovanim pristupom.

Neprimenjivanje i neusklađivanje sa ovim standardima neizostavno dovodi do povećavanja rizika materijalne i nematerijalne štete na postrojenjima i ugrožavanje ljudskih života i životne sredine.

## 9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Vattenfall, VPC GmbH, Dornier Group - dokumentacija i projektna dokumentacija*
- [2] *VGB publicly available documentation*
- [3] *IEC61508 Ed.2 parts 1-7 introduction*
- [4] *IEC61511 Ed.2 introduction*
- [5] *SIS Safety Instrumented System- SIL manual GM Inretnational*
- [6] *IEC62443 1-4 basis*
- [7] *CIGRE – A. Latinović, РАД ТЕРМОБЛОКОВА ТЕ „НИКОЛА ТЕСЛА“ – А, ОБРЕНОВАЦ У СИСТЕМУ СЕКУНДАРНЕ РЕГУЛАЦИЈЕ УЧЕСТАНОСТИ И СНАГЕ РАЗМЕНЕ И УТИЦАЈ НА ПАРАМЕТРЕ РАДА ПАРНОГ КОТЛА*
- [8] *IChemE Si pages simposium ser.*
- [9] *Security Levels ISA-99*
- [10] *<http://www.controleng.com>*
- [11] *<http://www.tuv.com/germany/de/>*
- [12] *<https://www.ge.com/digital/applications>*
- [13] *Siemens Energy – <cache.industry.siemens.com/dl/files>*
- [14] *<https://www.fortinet.com/solutions/industries/scada-industrial-control-systems>*

# DIGITAL TRANSFORMATION THROUGH THE IMPLEMENTATION OF SAFETY AND SECURITY STANDARDS IN THE FIELD OF OPERATIONAL TECHNOLOGIES

VLADAN DJOKIC\*  
DORNIER GROUP EAST d.o.o.

BELGRADE

SERBIA

*Abstract* - The paper presents general approaches and methods for the implementation of safety and security standards in the power generation, transmission and distribution.

Over the past twenty years, numerous power plants in the Republic of Serbia both, thermal and hydro as well in transmission and distribution facilities, have replaced the obsolete control systems with the new microprocessor-based systems.

By introducing the new process control technologies that rapidly evolve, the standardized approach in which the functionality of these technologies is regulated must be applied and monitored.

In the 21st century, a century of digitization, an approach has been established that, when it comes to the entire energy sector, and especially the power generation and power transmission industry, the information technologies used in process control must have distinctive and standardized development. This new field of information technologies used in process control is named Operational Technologies (OT).

Implementation and operation according to the valid and relevant standards for these areas requires a wider approach and includes human resources from managerial to technical level in the production processes throughout the entire lifecycle of the control systems.

In this paper, the important steps in a way of implementation and the use of the relevant Functional Safety standards and Cyber Security standards are highlighted.

Implementation of these standards, along with the already initiated implementation of standards in the field of Information Technology in EPS, will frame a comprehensive approach to the more efficient and reliable operation of the production facilities, higher energy efficiency, more efficient risk mitigation, reduction of forced shutdowns and negative environmental impact.

*Key words* - Information Technologies (IT), Operational Technologies (OT), Functional Safety Standards, Cyber Security Standards, Industrial Control Systems (ICS).

---

\* Kralja Milana 3, 11000 Beograd, [vladan.djokic@dornier-group.com](mailto:vladan.djokic@dornier-group.com)

D2 08

**DIGITALNA TRANSFORMACIJA KROZ IMPLEMENTACIJE SIGURNOSNIH I  
BEZBEDNOSNIH STANDARDA U DOMENU OPERACIONIH TEHNOLOGIJA**

**DIGITAL TRANSFORMATION THROUGH THE IMPLEMENTATION OF  
SAFETY AND SECURITY STANDARDS IN THE FIELD OF OPERATIONAL  
TECHNOLOGIES**

**VLADAN DJOKIC\***  
**DORNIER GROUP EAST d.o.o.\***

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* – U radu su predstavljeni opšti pristupi i metode za implementaciju sigurnosnih i bezbednosnih standarda u proizvodnji, prenosu i distribuciji električne energije.

Rad daje osvrt na tehnologije u veku digitalizacije, koje se upotrebljavaju u upravljanju proizvodnjom, prenosom i distribucijom kao i razvoj dve grane novih tehnologija, operacione i informacione.

Bez obzira što i operacione i informacione tehnologije imaju slične a nekada i iste hardverske komponente, njihovo korišćenje u proizvodnom i informacionom okruženju je različito.

U radu je istaknuta neophodnost različitog pristupa operacionim i informacionim tehnologijama kroz standarde iz ovih oblasti.

Prikazani su osnovni standardi koji se koriste za funkcionalnu sigurnost i cyber bezbednost postrojenja i uređaja i njihov put implementacije u procesima i istaknuti važni koraci u načinu implementacije i korišćenju relevantnih standarda.

Takođe su predstavljeni i putevi uvođenja sigurnosnih i bezbednosnih standarda u kompanijama kroz životni ciklus.

*Ključne reči* – Informacione Tehnologije (IT), Operacione Tehnologije (OT), Funkcionalna Sigurnost i njeni standardi, Cyber Bezbednost i njeni standardi, Industrijski Kontrolni Systemi (ICS).

---

\* Kralja Milana 3, 11000 Beograd, [vladan.djokic@dornier-group.com](mailto:vladan.djokic@dornier-group.com)



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.364J](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.364J)

D2 09

**IMPLEMENTACIJA ISMS U UPRAVI EPS AD U SKLADU SA ZAHTEVIMA  
STANDARDA ISO 27001; IMPLEMENTACIJA KORPORATIVNOG OKVIRA I  
STVARANJE PREDUSLOVA ZA POVEZIVANJE SA OGRANCIMA**

**LJUBODRAG JOSIPOVIĆ<sup>1\*</sup>, JASNA MARKOVIĆ-PETROVIĆ<sup>1</sup>,  
ACO ARSENIJEVIĆ<sup>1</sup>, IGOR ČIKA<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>EPS AD <sup>2</sup>PDCA KONSALTING**

**<sup>1</sup>BEOGRAD, <sup>2</sup>NOVI SAD**

**REPUBLIKA SRBIJA**

*Kratak sadržaj* — Implementacija sistema menadžmenta bezbednošću informacija – (Information Security Management System - ISMS) u Upravi EPS AD je nastala kao odgovor na zahteve aktuelnog načina poslovanja i brigom o bezbednosti informacija. Uvođenje formalizovanog procesa upravljanja IT rizicima predstavlja kvalitativni napredak u shvatanju i primeni bezbednosti informacija EPS AD Uprava, kao i pravu podršku u donošenju poslovnih odluka.

ISMS u EPS AD bi trebalo da doprinese boljem, efikasnijem i bezbednijem poslovanju i da bude u skladu sa već uspostavljenim sistemima upravljanja unutar firme. Primena tehničkih i organizacionih kontrolnih mera bezbednosti koje su definisane u ISO/IEC 27001 standardu daće rezultate u vidu sveobuhvatnog unapređenja i povećanja bezbednosti informacionog sistema organizacije.

Rad opisuje systemske, kao i neke operativne aktivnosti koje su realizovane i koje će biti realizovane tokom implementacije ISMS u EPS AD prema ISO/IEC 27001:2022 standardu.

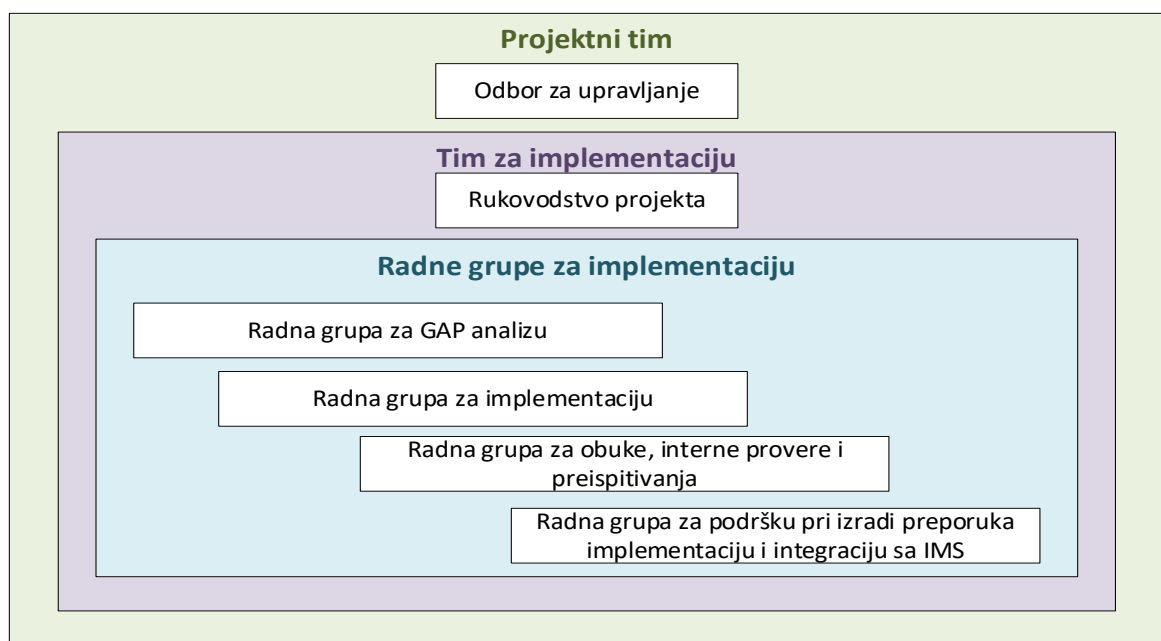
*Ključne reči* — Informaciona imovina – ISMS – Korporativni dokument – Korporativna pravila – Preispitivanje ISMS – Pretnja – Preventivne i korektivne mere – Ranjivost – Sertifikacija sistema – Standard ISO 27001:2022

---

\* Carice Milice 2, Beograd, ljubodrag.josipovic@eps.rs

## 1 UVOD

Akcionarsko društvo Elektroprivreda Srbije je najveća kompanija u Srbiji, privredni i energetski oslonac zemlje. Organizacija kompanije je vertikalna i čine je Uprava EPS AD (u daljem tekstu: Uprava) i osam Ogranaka. Bezbednost informacija je osnovna potreba kompanija, koje žele da očuvaju i održe integritet, poverljivost i dostupnost informacija kojima raspolažu i kojima upravljaju. Sa tim ciljem je u Upravi započet proces implementacije sistema menadžmenta bezbednošću informacija (*Information Security Management System - ISMS*). Implementaciju sprovodi Projektni tim organizovan na način prikazan na Slici 1. Imajući u vidu opseg projekta članovi Projektnog tima su predstavnici svih funkcionalnih celina Uprave. S' obzirom da je u Ograncima Drinsko-Limske hidroelektrane (DLHE) [1] i HE Đerdap pre više od 10 godina implementiran ISMS sistem u Projektnom timu su i predstavnici ovih Ogranaka, iskusni u oblasti bezbednosti informacija



**Slika 1.** Struktura Projektnog tima za implementaciju ISMS.

Očekivani benefiti implementacije ISMS u Upravi su ustrojavanje i ravnanje poslovnih procesa sa primenjenim informacionim tehnologijama (IT), uspostavljanje sistemskog pristupa i povećana bezbednost informacija poslovnih procesa, uključujući i nadzorno-upravljačke sisteme (DCS/SCADA), povećanje svesti zaposlenih o bezbednosti informacija, uspostavljanje sistema upravljanja informacionim rizicima,

U radu su prvo prikazani ciljevi implementacije ISMS u Upravi, a zatim ulazi, izlazi i prepoznati rizici projekta implementacije ISMS. U nastavku su opisane faze projekta, a posebna pažnja je usmerena na ključni korak implementacije, procenu rizika. Na kraju rada je dat predlog neophodne infrastrukture za praćenje funkcionisanja ISMS u sadašnjem i budućem periodu.

## 2 CILJEVI, ULAZI/IZLAZI I RIZICI NA PROJAKTU

Na početku realizacije projekta su identifikovani ciljevi projekta, ulazni parametri i očekivani izlazi iz projekta, kao i potencijalni rizici u implementaciji sistema ISMS. Glavni **ciljevi** projekta su: (1) implementacija sistema menadžmenta bezbednošću informacija u Upravi, (2) uspostavljanje sistemskog pristupa u menadžmentu bezbednošću informacija u celoj

kompaniji, (3) stvaranje preduslova za povezivanje sa sertifikovanim sistemima Ogranaka DLHE i HE Đerdap i implementaciju u drugim Ograncima i (4) priprema Uprave za sertifikaciju od strane nezavisnog sertifikacionog tela.

**Ulazni** elementi u projekat su: (1) organizaciona struktura EPS AD (Uprava i Ogranci), (2) IMS dokumentacija Uprave, (3) direktno zahtevi ISO/IEC 27001 [2] i drugih referentnih standarda serije ISO/IEC 27000, (4) indirektno, zahtevi aktuelnih verzija standarda ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001 i drugih, (5) kontekst EPS AD – sagledavanje internih i eksternih faktora i (6) rezultati drugih projekata/usluga koji su realizovani ili se paralelno odvijaju u Upravi i drugim organizacionim delovima EPS AD, a koji mogu biti u vezi sa bezbednošću informacija, a sa aspekta sistema menadžmenta.

Predviđeni **izlazi** iz projekta su: (1) analiza Konteksta sa predlogom dopune za usvajanje usklađenog sa zahtevima standarda ISO/IEC 27001 [2], (2) izveštaj o GAP analizi prema zahtevima standarda, (3) dokumentovane informacije sistema ISO/IEC 27001, (4) potvrde o realizovanim obukama – program, materijal i sertifikati, (5) dokumenta koja prate internu proveru i (6) plan unapređenja nakon preispitivanja ISMS od strane najvišeg rukovodstva.

Identifikovani rizici implementacije ISMS su:

- opseg implementacije projekta je informaciona imovina EPS AD, ali ne samo u oblasti informacionih i komunikacionih tehnologija, već sve delatnosti, odnosno sva imovina koja nosi ili sadrži neku informaciju (hardver, softver, papirni dokumenti, pečati, automobili, znanje zaposlenih i eksterne strane, reputacija kompanije, ...), što je znatno kompleksnije za obradu, analizu i preduzimanje mera povećanja bezbednosti
- opseg je, u organizacionom smislu, u startu određen kao Uprava sa korporativnim pravilima za Ogranke, ali se zbog strukturnih reformi u EPS AD, koje su u toku, i transformacije nekih delatnosti, on proširuje i na Ogranke. To se naročito odnosi na IKT oblast (koja se u potpunosti centralizuje na nivou cele kompanije), gde u nekim segmentima korporativna pravila (pravila koja važe za sve organizacione jedinice EPS AD, i ugrađuju se u posebna dokumenta, specifična za Ogranke, npr. udaljeni pristup informacionom sistemu, bekap podataka, aktivni direktorijum, ...) sva moraju prerasti u korporativna dokumenta (ne postoje posebna specifična dokumenta za Ogranke, već je jedan, korporativni dokument važeći i za Upravu i za Ogranke, tj. jedan jedini dokument važi za sve organizacione celine u kompaniji)
- ko je nadležan za primenu ISMS-a u Ograncima, s` obzirom na izvršene organizacione promene i promene koje su u toku?
- primena novih ISMS dokumenata ovog Projekta u Ograncima sa aspekta onih koji već imaju implementiran ISMS?
- odgovornost za pojedine aktivnosti: direktor Sektora za IKT ili Odgovorno lice za IKT sistem od posebnog značaja EPS AD?
- u procesu strukturnih reformi formiraće se nove organizaciona celine, Sektor za upravljanje rizikom, a u IKT oblasti Sektor za informacionu bezbednost i upravljanje IKT rizicima, što donosi i suštinske i formalne implikacije na ISMS dokumenta, čija je izrada u toku
- izmene implementiranog sistema za prijavu incidenata (*ticketing*) u Upravi radi odgovora na dopunske zahteve ISMS sistema, i njegova primena i u Ograncima
- izrada aplikativnog softverskog rešenja za popis informacione imovine, kao prelazni korak ka konačnom rešenju uvođenjem novog *Asset Management* sistema u EPS AD, planiranom za neku od sledećih godina
- procena rizika, obuke, interne provere i preispitivanje posloводства za širok dijapazon delatnosti u EPS AD (proizvodnja energije i uglja, trgovina električnom energijom, ekonomski poslovi, opšti poslovi, IKT poslovi, poslovi fizičke bezbednosti, ...), što je

obiman posao

- nedovoljan broj kadrova sa formalnim i suštinskim znanjima iz oblasti bezbednosti informacija.

### 3 FAZE IMPLEMENTACIJE ISMS

Implementacija sistema i sertifikacija ISMS podrazumeva sledeće globalne korake:

- Implementacija, koja obuhvata tri faze:
  - o prva faza: snimanje, analiza i mapiranje procesa
  - o druga faza: implementacija zahteva standarda ISO/IEC 27001
  - o treća faza: obuke, interna provera i preispitivanje
- Predsertifikaciona provera
- Sertifikacija uspostavljenog ISMS

Prve dve faze implementacije su završene. Rezultat **prve faze** je Izveštaj koji je zasnovan na Zakonu o informacionoj bezbednosti i internom Pravilniku o bezbednosti informaciono-komunikacionog sistema [3]. Izveštaj nije uzeo u obzir Zakon o zaštiti podataka o ličnosti i Pravilnik o zaštiti podataka o ličnosti od 14.10.2020.godine. Nalaz GAP analize je da je najveći nedostatak nepostojanje metodologije procene rizika informacione bezbednosti na nivou Uprave, na osnovu kojeg bi bio definisan i opisan prioritet i da nema zvanično uspostavljene metrike za praćenje i evaluaciju performansi primene mera informacione bezbednosti, te je bilo neophodno u procesu implementacije otkloniti te nedostatke.

Radna grupa za GAP analizu je na osnovu nalaza, navela scenarije rizika i dala preporuke za mere tretmana u skladu sa prepoznatim rizicima. Zbog nepostojanja metodologije za procenu rizika informacione bezbednosti, u dosadašnjem periodu nije bilo vrednovanja verovatnoće pojave scenarija rizika, kao ni procene uticaja pojave rizika na informacionu bezbednost Uprave. Preporuke, kao mere tretmana navedenih rizika date su na osnovu kompetencija članova Radne grupe, njihovog iskustva i dobre prakse koju primenjuju u radu.

Na taj način, preporuke nemaju snagu neusaglašenosti, niti obaveznosti primene u Upravi, jer ne postoji definisan prihvatljivi nivo rizika informacione bezbednosti od strane posloводства EPS AD. Definisani nivo prihvatljivih rizika će biti obavezan deo metodologije procene rizika informacione bezbednosti.

Neophodno je uspostaviti metrike procesa ISO/IEC 27001 koje će na osnovu zadatih veličina, načina i pravila merenja i dokumentovanja rezultata merenja primene mera Aneksa A ISO/IEC 27001 [2], dati meru efikasnosti i efektivnosti primene mera informacione bezbednosti u Upravi.

U toku **druge faze**, a na osnovu nalaza i preporuka nastalih kao rezultat prve faze, izvršene su sledeće aktivnosti:

- prilagođavanja postojećih i izrada nedostajućih dokumenta IMS prema zahtevima standarda ISO/IEC 27001
- određene su dodatne mere kako bi se unapredile performanse postojećeg sistema informacione bezbednosti i podigao njegov nivo mera.
- izvršena je sistematizacija postojećih dokumentovanih informacija, kao i izrada ili dopuna sistemske i operativne dokumentacije
- izvršena je integracija sistema menadžmenta bezbednošću informacija sa već postojećim integrisanim sistemima menadžmenta u Upravi (ISO 9001, ISO 14001 i ISO 45001).

Dokumentovanje sistema obuhvatilo je definisanje skupa politika bezbednosti, procedura i radnih instrukcija kao i zapisa koji se generišu u životnom ciklusu ISMS. Tim za implementaciju je putem obuka i radionica inicijalno upoznat sa zahtevanom ISO/IEC 27001 dokumentacijom, načinom vršenja popisa informacione imovine, procenom rizika, ... Sva ISMS dokumentacija je realizovana u duhu integracije sa postojećom IMS dokumentacijom.

Izrađeno je 16 novih operativnih procedura vezanih za oblast informacione bezbednosti sa pripadajućim radnim uputstvima i zapisima, i izvršena dopuna 14 postojećih sistemskih procedura sa elementima informacione bezbednosti.

Kao finalni dokument o implementiranom ISMS u Upravi objavljuje se „Izjava o primenljivosti“ (*Statement of Applicability*) koja formalno predstavlja spisak primenjenih izabranih kontrola iz dodatka Anex A, ISO 27001 standarda.

Poslednja, **treća** faza, prvog koraka implementacije će obuhvatiti obuke, internu proveru i preispitivanje. U toku prethodne faze su završene obuke stručnih timova popis informacione imovine i procenu rizika, a predstojeće aktivnosti u ovoj fazi su:

- obuke preostalih stručnih timova i internih proverivača, ali i svih zaposlenih uključujući i poslovodstvo (najviši i srednji nivo), uz pripremu dokumentacije za obuke izvršioca poslovnih partnera koji imaju ugovorni odnos sa EPS AD
- realizacija interne provere - inicijalni proces provere implementiranog ISMS sistema radi određivanja eventualnih neusaglašenosti u odnosu na zahteve ISO/IEC 27001, nedostataka i mogućnosti za unapređenja i predloge za poboljšanje
- preispitivanje rezultata interne provere od strane rukovodstva sa ciljem donošenja konačne odluke u vezi sa procesom sertifikacije.
- priprema organizacije za prolazak kroz sertifikacionu proveru i dobijanje sertifikata - prezentovanje procesa sertifikacije, uobičajenih zahteva sertifikacionih tela u vezi provere prema zahtevima ISO/IEC 27001, ukazivanje na interne odgovornosti, obaveze i ključne odrednice procesa i međuzavisnosti.

Procesi predsertifikacione provere će utvrditi ispunjenost uslova za pokretanje procesa sertifikacije ISMS sistema u Upravi.

Sertifikacija ISMS podrazumeva sertifikacionu proveru i izdavanje sertifikata za implementirani ISMS sistem u Upravi, i biće sprovedena posle završetka aktuelnog Projekta.

Predsertifikacionu i sertifikacionu proveru će obaviti sertifikaciona kuća akreditovana od strane tela nadležnog za internacionalni standard ISO/IEC27001:2022.

#### **4 UPRAVLJANJE INFORMACIONIM RIZICIMA**

Upravljanje informacionim rizicima je jedan od najvažnijih aktivnosti u ISMS sistemu. Za procenu informacionih rizika u Upravi izabrana je metodologija u skladu sa preporukama ISO/IEC 27005 [4] standarda pristupom zasnovanom na informacionoj imovini kao i referentnim vodičima i publikacijama u oblasti upravljanja rizicima [5].

Pri proceni rizika po bezbednost informacija, obavljen je prvi korak - **identifikacija i popisivanje informacione imovine** u okviru definisanog predmeta i područja primene ISMS, sa definisanim vlasnicima i vrednostima informacione imovine. Na osnovu popisa i vrednosti informacione imovine identifikovani su scenariji rizika, koji su detaljni u smislu identifikovanja informacione imovine, pretnji i ranjivosti. U prvoj iteraciji je izvršen inicijalni popis informacione imovine kao osnov za potom realizovanu nultu procenu rizika.



Rizik predstavlja kombinaciju posledica koje će uslediti nakon pojave neželjenog događaja i verovatnoće nastanka ovog događaja. **Analiza rizika** predstavlja ulaznu informaciju u **ocenjivanju rizika** i odluku o daljem postupanju sa rizicima. Analiza rizika podrazumeva razmatranje identifikovanih scenarija rizika i primenjenih mera zaštite – kontrola, ako postoje, i njihovu efektivnost i efikasnost. Proces ocenjivanja rizika se vrši na osnovu dva kriterijuma:

- ocenjivanje realne verovatnoće pojave identifikovanih rizika
- ocenjivanja potencijalne posledice ukoliko se identifikovani rizik ostvari,

Opisne i numerički kvantifikovane vrednosti verovatnoće pojave rizika i potencijalne posledice date su u Tabelama I i II.

**Tabela I** Skala verovatnoće pojave rizika.

<b>VEROVATNOĆA POJAVLJIVANJA RIZIKA</b>		
Ocena	Učestalost pojavljivanja	Primer
1	<b>Malo verovatno</b>	Verovatnoća scenarija rizika je veoma mala Nema saznanja o ostvarenju scenarija rizika u poslednjih 5 godina
2	<b>Retko</b>	Verovatnoća scenarija rizika je mala. Postoje saznanja o ostvarenju scenarija rizik u poslednje 2 godine
3	<b>Periodično</b>	Verovatnoća scenarija rizika je značajna. Postoje saznanja o ostvarenju scenarija rizik na godišnjem nivou
4	<b>Redovno</b>	Verovatnoća scenarija rizika je velika. Postoje saznanja o ostvarenju scenarija rizik na kvartalnom nivou
5	<b>Često</b>	Verovatnoća scenarija rizika je veoma velika. Postoje saznanja o ostvarenju scenarija rizik na mesečnom nivou

**Tabela II** Skala posledica realizacije rizika.

<b>POTENCIJALNE POSLEDICE</b>		
Ocena	Posledice	Primer
1	<b>Zanemarljive</b>	Zanemarljive posledice po Upravu Uprava će prevazići situaciju bez previše poteškoća
2	<b>Značajne</b>	Značajne ali ograničene posledice po Upravu Potrebno je malo napora da bi se otklonile posledice
3	<b>Ozbiljne</b>	Bitne posledice za Upravu Uprava će prevazići situaciju sa bitnim ograničenjima bez uticaja na Ogranke
4	<b>Kritične</b>	Teške posledice po Upravu Ugroženo je kratkoročno funkcionisanje Uprave klijenti blago pogođeni, bez ikakvih dugotrajnih posledica.
5	<b>Katastrofalne</b>	Katastrofalne posledice po Upravu Značajno pogođena Uprava sa posledicama koje direktno utiču na poslovanje Ogranaka i mogu biti dugotrajne.

U procesu ocenjivanja rizika se kvantifikuje verovatnoća nastanka rizika kao numerički iskazana ekspertska procena verovatnoće da ranjivost bude aktivirana određenom pretnjom i potencijalne posledice rizika kao numerički iskazane nepovoljne posledice realizovanje pretnje koja koristi neku ranjivost. Na taj način ISMS Stručni tim za procenu rizika po bezbednost informacija Uprave definiše vrednost rizika kao numerički iskazan nivo rizika u skladu sa funkcijom veličine uticaja i verovatnoće pojavljivanja određenog rizika i određuje

prioritete u postupanju sa identifikovanim rizicima. Takođe, za svaki identifikovan rizik, definiše se njegov vlasnik kroz imenovanje zaposlenog (ili funkcije prema organizacionoj šemi) od strane ISMS Stručnog tima za procenu rizika po bezbednost informacija Uprave.

Nivo rizika predstavlja proizvod verovatnoće i posledice pojavljivanja rizika, i opisuje se matricom 5x5 (Tabela III).

**Tabela III** Nivo rizika.

Verovatnoća	Posledica				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

Skala rizika sa nivoima reprezentuje stepen ili nivo rizika kome je informaciona imovina izložena. Nivo rizika daje opis postupanja sa rizikom. Skala rizika i neophodne akcije je prikazana u Tabeli IV.

**Tabela IV** Skala rizika.

Nivo rizika	Opis rizika i postupanje sa rizikom
<b>Veoma visok (21 – 25)</b>	Postojeći sistem može da nastavi da radi, ali plan postupanja sa rizikom mora biti pokrenut <u>hitno, najkasnije u roku 3 dana</u>
<b>Visok (16 – 20)</b>	Postojeći sistem može da nastavi da radi, ali plan postupanja sa rizikom mora biti pokrenut, što je pre moguće, a najkasnije u roku od 10 dana
<b>Srednji (11-15)</b>	Razraditi plan postupanja sa rizikom u razumnom roku, a najkasnije u roku od 14 dana, ukoliko je to moguće ili da se odluči da se rizik toleriše
<b>Nizak (5-10)</b>	Odrediti da li postoji potreba za postupanje sa rizikom i u kom vremenskom periodu ili da se odluči da se prihvati rizik.
<b>Veoma nizak (1 – 4)</b>	Ne postoji potreba za postupanje sa rizikom i taj se rizik prihvata.

Cilj ocene rizika je da se da stručna podrška donošenju odluka, na osnovu rezultata analize rizika, o tome kojim rizicima je potreban tretman i prioritet za sprovođenje tretmana. Ocenjivanje rizika obuhvata poređenje nivoa rizika identifikovanog tokom procesa analize rizika sa usvojenim kriterijumima. Na osnovu ovog poređenja, donosi se odluka o postupanju sa rizikom, u skladu sa pravnim, regulatornim i drugim zahtevima,

U nekim slučajevima, ocena rizika može dovesti do odluke da se preduzmu dalje analize. Ocena rizika takođe može dovesti do odluke da se sa rizikom postupa na način održavanja postojećih kontrola. Ove odluke su pod uticajem stava Uprave i **kriterijumima za prihvatanje rizika** na kojima je zasnovan proces upravljanja rizikom:

- Rizici ocenjeni ocenom od 1 do 10 smatraju se prihvatljivim rizicima,
- Rizici ocenjeni ocenom od 11 do 15 smatraju se srednjim (tolerišućim) rizikom i treba primeniti odgovarajuće kontrole kako bi se vrednost spustila na nivo prihvatljivog rizika.
- Rizici ocenjeni ocenom od 16 do 25 smatraju se neprihvatljivim rizicima i takve vrednosti bi trebalo u najkraćem roku spustiti bar na vrednost srednjeg rizika i stalno nadgledati dok ne dostignu nivo prihvatljivog rizika.

Postupanje sa rizikom podrazumeva izradu **plana postupanja sa rizicima** u varijanti izbora jedne ili više opcija za modifikaciju rizika, kao i sprovođenje tih opcija. Plan postupanja sa rizikom je sastavni deo dokumenta QF-ISMS-001 Registar rizika ISMS.

Postupanje sa rizikom se sprovodi u formi cikličnog procesa:

- procena postupanja sa rizikom nakon primene mere;
- odluka da li je preostali rizik na prihvatljivom nivou;
- ako nije na prihvatljivom nivou, generisanje novog postupanja sa rizikom, i
- procena efektivnosti tog postupanja sa rizikom.

Opcije postupanja sa rizikom nisu nužno međusobno isključive ili odgovarajuće u svim okolnostima. Opcije za postupanje sa rizicima su sledeće:

- redukcija ili smanjenje posledica rizika
- transfer rizika ili prenos rizika
- tolerisanje i prihvatanje rizika
- eliminacija ili izbegavanje rizika

Plan za postupanje sa rizicima predstavlja izbor jedne ili više opcija za modifikaciju rizika, odnosno, aktivnosti koje Uprava planira i izvršava u okviru ukupnog upravljanja rizicima. Odluka o vrsti mere postupanja sa rizikom zavisi i od poslovnih okolnosti. Opcije za tretman rizika se mogu primeniti individualno ili u kombinaciji. Pri donošenju odluka uzima se u obzir i postojanje rizika sa kritičnim ili katastrofalnim posledicama za koje se mogu primeniti opcije i koje nisu opravdane po ekonomskoj osnovi (*cost-benefit* analiza).

Jedan od faktora koje Uprava uzima u obzir je trošak sprovođenja same odluke o meri postupanja sa rizicima. Uprava nastoji da postigne pravilnu ravnotežu između postizanja koristi od zaštite, da ispravno investira, i da ostane profitabilna, uspešna, efikasna i konkurentna – ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) princip.

U programu IKT bezbednosti izrađeni su i **planovi IKT kontinuiteta poslovanja**, koji u slučajevima značajnijeg narušavanja sistema treba da obezbede kontinuitet IKT poslovanja, sa što manje poremećaja i šteta. Neophodno je testiranje planova IKT kontinuiteta u praksi, na ciljano i slučajno odabranim primerima. Tako provereni i usaglašeni planovi IKT kontinuiteta će biti usvojeni od strane Projektnog tima i posloводства.

Kada je reč o elektroprivrednim sistemima, a oni su u EPS AD preovlađujući, njihove specifičnosti iskazane su posebnim sektorskim standardom ISO/IEC 27019:2017 [6] koji je baziran na standardu ISO/IEC 27001:2013. Ove specifičnosti su uzete u obzir kod implementacije ISMS.

## 5 INFRASTRUKTURA ZA PRAĆENJE FUNKCIONISANJA ISMS

U cilju kontinualnog praćenja funkcionisanja sistema menadžmenta bezbednosti informacija uspostavljena je infrastruktura koju čine: (1) generalni direktor, (2) izvršni direktor za informacione tehnologije i digitalizaciju, (3) odgovorno lice za IKT sistem od posebnog značaja, (4) administrator IKT sistema od posebnog značaja, (5) ISMS stručni timovi i (6) krajnji korisnici.

Tematski ISMS stručni timovi su formirani od strane Uprave radi obezbeđivanja primene zahteva sistema menadžmenta bezbednošću informacija u Upravi EPS AD, i oni učestvuju u aktivnostima vezanim za njihovu oblast delovanja i nastaviće sa radom i posle implementacije i sertifikacije ISMS.

Prepoznati ISMS stručni timovi su:

- ISMS stručni tim za interne provere
- ISMS stručni tim za usklađenost (*compliance*)
- ISMS stručni tim za obuku zaposlenih i spoljnih saradnika
- ISMS stručni tim za upravljanje incidentima po bezbednost
- ISMS stručni tim za procenu rizika po bezbednost informacija
- ISMS stručni tim za kontinuitet poslovanja
- ISMS stručni tim za IKT operacije i bezbednost informacija
- ISMS stručni tim za komunikaciju sa zainteresovanim stranama

## 6 ODGOVORI NA IZAZOVE

Odgovori na izazove i rizike uočene na početku i u toku realizacije ovog Projekta, a imajući u vidu dosadašnje korake realizacije su kako sledi:

- Projekat implementacije ISMS u Upravi je započet u junu 2023. godine, a sajber napadi na informacioni sistem EPS AD, koji su izvršavani u toku iste i naredne godine, a naročito u decembru 2023. godine, su uzrokovali da se, i od strane zaposlenih i od strane najvišeg rukovodstva, obrati veća pažnja na efikasniju i efektivniju realizaciju predmetnog projekta, kroz njihovo pojačano uključanje u njegovu realizaciju.
- Opseg primene je Informaciona imovina EPS AD, dakle sve delatnosti, tako da je ova aktivnost rađena uz pomoć predstavnika svih delatnosti, koji su i formalno članovi Tima za implementaciju, a izvršena je njihova osnovna obuka za izvršenje tih poslova.
- Doneta je odluka i tako je urađeno da dokumenta koja se potpuno odnose na IKT informacionu imovinu, po pravilu budu korporativna dokumenta, a da se za ostala dokumenta poštuju novouvedena korporativna pravila, tako da nadležnost za primenu u Ograncima za prvonavedena dokumenta je na poslovima informacionih tehnologija i digitalizacije (Uprava), a za druga na poslovođstvu Ogranaka;
- Primena dokumenata u Ograncima sa aspekta onih koji imaju implementirane sisteme menadžmenta informacijama će biti izvršena kroz sledeću reviziju njihovih ISMS sistema, po principima navedenim u prethodnoj alineji;
- ISMS dokumenta su prilagođena novoj organizacionoj strukturi u IKT oblasti, pa tako, na primer, odgovornosti za pojedine aktivnosti predviđene za direktora Sektora za IKT preuzima Izvršni direktor za informacione tehnologije i digitalizaciju,
- U sledećoj izmeni implementiranog *ticketing* sistema u Upravi, a na osnovu dobrih iskustava već implementiranih ISMS u Ograncima HE Đerdap i DLHE, izvršiće se izmene i dopune neophodne zbog implementacije ISMS-a i na ostale delove EPS AD
- Aplikativno softverskog rešenja za popis informacione imovine, bazirano na rešenju instaliranog u HE Đerdap, je izrađeno i implementirano,
- Procena rizika, obuke, interne provere i preispitivanje poslovođstva za širok dijapazon delatnosti u EPS AD (proizvodnja energije i uglja, trgovina EE, ekonomski poslovi, opšti poslovi, IKT poslovi, poslovi fizičke bezbednosti, ...
- Nedovoljan broj kadrova sa formalnim i suštinskim znanjima iz oblasti bezbednosti informacija se u velikom obimu rešava formiranjem posebnog Sektora za informacionu bezbednost u Poslovima informacionih tehnologija i digitalizacije.

## 7 ZAKLJUČAK

Implementacija ISMS sistema prema ISO/IEC 27001:2022 standardu donosi okvir za primenu najbolje prakse bezbednosti informacija u kompaniji. Životni ciklus po modelu *Plan-Do-Check-Act* je baziran na procesu upravljanja IT rizicima, u cilju minimizovanja štete uzrokovane pretnjama, koje mogu iskoristi ranjivosti sistema.

ISMS u Upravi obuhvata sve lokacije, ljudske i informacione resurse i IKT tehnologije, koji su u svrhu obavljanja osnovne delatnosti firme. Uvođenje ovakvog sistema utiče i uticaće na podizanje nivoa svesti svakog zaposlenog o neophodnosti poštovanja usvojenih i primenjenih mera bezbednosti informacija na informacionu imovinu, jer će dovesti do sistematizovanog i jednostavnijeg postupka proizvodnje, transfera i korišćenja informacija i znanja. ISMS sistem u Upravi će se periodično preispitivati od strane rukovodstva u duhu već uspostavljenog integrisanog sistema menadžmenta, sertifikovanog prema ISO 9001.

## LITERATURA

- [1] Josipović LJ, Zlojutro M, Popović A, Pijevac T, Đapić M, Čitaković R: „Uvođenje sistema za upravljanje bezbednošću informacija u PD Drinsko-Limske hidroelektrane doo Bajina Bašta u skladu sa standardom ISO/IEC 27001:2005“, *Zbornik radova 30. savetovanja CIGRE Srbija*, R D2 11, maj, 2011, Zlatibor.
- [2] ISO/IEC 27001:2022 Information security, cyber-security and privacy protection - Information security management systems – Requirements (ISO, 2022).
- [3] Pravilnik o informacionoj bezbednosti JP EPS 12.01.504616/1-19 (avgust 2019)
- [4] ISO/IEC 27005 Information technology-Security techniques-Information security risk management.
- [5] NIST SP 800-30, Risk Management Guide for Information Technology Systems.
- [6] ISO/IEC 27019: 2017 Information technology - Security techniques - Information security controls for the energy utility industry (ISO, 2017)

**IMPLEMENTATION OF ISMS IN THE MANAGEMENT OF EPS AD IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE ISO 27001 STANDARD; IMPLEMENTATION OF A CORPORATE FRAMEWORK AND CREATING CONDITIONS FOR CONNECTING WITH BRANCHES**

**LJUBODRAG JOSIPOVIĆ<sup>1</sup>, JASNA MARKOVIĆ-PETROVIĆ<sup>1</sup>, ACO ARSENIJEVIĆ<sup>1</sup>, IGOR ČIKA<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>EPS JSC, <sup>2</sup>PDCA CONSULTING**

**<sup>1</sup>Belgrade, <sup>2</sup>Novi Sad**

**Serbia**

*Abstract*— The implementation of the Information Security Management System (ISMS) in the management of EPS AD arose as a response to the demands of the current business environment and concerns about information security. The introduction of a formalized IT risk management process represents a qualitative advancement in the understanding and application of information security within EPS AD Management, as well as genuine support in making business decisions.

The ISMS in EPS AD is expected to contribute to better, more efficient, and safer business operations, and to align with the already established management systems within the company. The implementation of technical and organizational security control measures defined in the ISO/IEC 27001 standard will result in a comprehensive improvement and enhancement of the organization's information security system.

This paper describes the systemic as well as some operational activities that have been realized and those that will be implemented during the ISMS implementation in EPS AD in accordance with the ISO/IEC 27001:2022 standard.

*Key words* — Information Assets – ISMS – Corporate Document – Corporate Rules – ISMS Review – Threat – Preventive and Corrective Measures – Vulnerability – System Certification – ISO 27001:2022 Standard.



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.375B](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.375B)

**D2 10**

**ELEKTROPRIVREDNE TELEKOMUNIKACIONE MREŽE: RAZVOJ,  
ODRŽAVANJE I LJUDSKI FAKTOR**

**DRAGAN BOGOJEVIĆ\***  
**FLANER DOO BEOGRAD**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* — Elektroprivredne kompanije u Srbiji poseduju telekomunikacione mreže zasnovane na optičkim kablovima punih dvadeset godina. U tom periodu razvijane su SDH/PDH, IP MPLS, DWDM i IP MPLS mreže preko transportnih DWDM mreža. Daje se kratak pregled telekomunikacionih mreža koja su posle razvoja prešla u eksploataciju i koja su predmet redovnih aktivnosti održavanja. Analizom javno dostupnih strateških dokumenata i planova razvoja daje se i ograničen pogled šta se može očekivati u bliskoj budućnosti. Ovaj rad dodatno analizira i organizacionu strukturu u oblasti telekomunikacija i IKT-a u državnim elektroprivrednim kompanijama kao i ljudski faktor. Pregledom aktivnosti u razvoju i održavanju i obaveza zaposlenih, izvodi se zaključak da je ljudski faktor postao kritičan element kome treba posvetiti mnogo više pažnje.

*Ključne reči* — Elektroprivreda Srbije, telekomunikacione mreže, razvoj i održavanje, ljudski faktor

---

\* Bulevar Mihajla Pupina 115v, Beograd, [dragan.bogojevic@flaner.rs](mailto:dragan.bogojevic@flaner.rs)

## 1 UVOD

Elektroprivredne kompanije (EPK) razvijaju svoje telekomunikacione mreže na planski način. EMS i EDS imaju desetogodišnje planove razvoja i u njima delove za IT i telekomunikacije i koji se ažuriraju na godišnjem nivou. Iz njih idu i trogodišnji planovi poslovanja (3PP) i godišnje nabavke i kroz sistem javnih nabavki telekomunikacione mreže (TKM) se razvijaju i održavaju. EPS ima takođe svoje trogodišnje planove poslovanja čiji su izvodi javno dostupni, ima javne planove nabavki i ima(o) je i strategiju razvoja IKT-a ali ona nije javno dostupna.

Neki segmenti aktivnosti kao što je održavanje TKM nisu u fokusu pažnje jer se "podrazumeva da je sve u redu" što je u praksi najčešće i dokazano. Ovaj rad je hteo da naglasi da postoje i zanemarene aktivnosti održavanja koje već skoro dve decenije omogućavaju normalno funkcionisanje TKM i EPK, uz veliko angažovanje i zaposlenih u elektroprivrednim kompanijama i spoljnim kompanijama sa kojima održavaju opremu.

Rad se bavi i organizacijom IKT i telekomunikacione funkcije. Upravo u vreme pisanje ovog rada u toku su organizacione promene u IKT-u EPS-a koji posle 10 godina pokušava da je menja i unapredi, što potvrđuje aktuelnost ove teme. Ovim radom želelo se i da se ukaže na još jedan faktor bitan za realizaciju i normalno funkcionisanje TKM i celog IKT-a u EPK a na koji treba obratiti više pažnje - ljudski faktor. Kratkim sagledavanjima svih ovih aspekata, može se bolje odgovoriti na pitanje šta su kritični faktori razvoja, tehnologije, nabavke, novac, ljudi? Ili sve prethodno i ljudi? Ko treba da definiše strategiju, država, spoljne konsultantske kuće ili IKT struka u EPK koja zna o čemu se radi i šta je realno.

Kako su sve tri EPK u državnom vlasništvu, treba napomenuti da je država imala svoje strategije i planove koje se bave i elektroprivrednim kompanijama [01] ali se u periodu od 2018. do 2023. ti planovi nisu realizovali. Nova strategija (Strategija razvoja sistema elektronskih komunikacija u Republici Srbiji do 2027. godine) iz 2024. godine [02] je to formalno konstatovala u delu oko konsolidovanja mrežne infrastrukture u vlasništvu države, uz opis razvijenosti optičke infrastrukture i transportnih sistema EMS-a:

*"Imajući u vidu da su u Republici Srbiji postojali značajni kapaciteti, pre svega, optičkih transportnih mreža u vlasništvu države, Ministarstvo se u prethodnoj Strategiji opredelilo za konsolidovanje svih kapaciteta koje pojedini sistemi ne koriste za sopstvene potrebe. Na ovaj način pristup određenim neiskorišćenim kapacitetima (na primer na nivou usluge) bi se mogao iskoristiti za potrebe države i/ili bi se mogao ponuditi drugim operatorima.*

*„Elektroprivreda Srbije” a.d. (u daljem tekstu: EPS), „Elektromreža Srbije” a.d. (u daljem tekstu: EMS) i „Elektrodistribucija Srbije” d.o.o. (u daljem tekstu: EDS) su, prvenstveno sledeći svoje potrebe i planove, izgradile svoju mrežu optičkih vlakana u zaštitnom užetu (OPGW) postavljenom duž mreže dalekovoda. Izgradnja je započeta 1998. godine, a intezivirana 2004. godine, tako da danas optička mreža ima ukupnu dužinu oko 5600 km. U periodu realizacije Strategije bilo je postavljeno oko 600 km optičkih kablova na dalekovodima EMS-a.*

*Prema podacima iz juna 2023. godine, u EMS-u se kao glavni transportni sistem koristi SDH sistem, a za specifične interfejse nižih brzina u upotrebi je PDH sistem. Od 2018. godine je započeto uvođenje DWDM sistema, a sredinom 2022. godine počela je realizacija prve faze implementacije dodatne DWDM opreme uz primenu IP/MPLS tehnologije, sa planiranim rokom završetka do 2025. godine.*



*Imajući u vidu nerešeno vlasničko pitanje (na nivou energetskih subjekata EPS, EMS i EDS) većeg dela optičkih kablova za prenos TK signala ugrađenih u prenosnu mrežu EMS-a, konsolidaciju neiskorišćenih kapaciteta, kako je to bila predvidela prethodna Strategija, nije bilo moguće u potpunosti realizovati."*

Autor vezano za gornji citat ima sledeću konstataciju: strategija u poglavlju "Konsolidovanje **mrežne infrastrukture u vlasništvu države**" ukazuje da konsolidaciju neiskorišćenih kapaciteta nije bilo moguće realizovati zbog nerešenog vlasničko pitanja na nivou energetskih subjekata koji su **100% u vlasništvu države**.

## **2 RAZVOJ I ODRŽAVANJE ELEKTROPRIVREDNIH TK MREŽA**

Ovaj rad je napisan na bazi javno dostupnih informacija. U ovom poglavlju biće dat kratak pregled razvojnih planova u oblasti elektroprivrednih telekomunikacionih mreža na bazi višegodišnjih strateških dokumenata kao što su desetogodišnji planovi razvoja, trogodišnji planovi poslovanja i drugi. Desetogodišnje planove razvoja za period 2023. - 2032. imaju EMS za prenosni sistem [03] i EDS [04] za distributivni sistem i u njima delove za IT i telekomunikacije. Za EPS postoji trogodišnji plan poslovanja [05]. Sve kompanije imaju na portalu javnih nabavki [06] informacije o postupcima i njihovoj realizaciji. Postoji i veći broj radova koji se bavi temom razvoja ili pregleda nacionalnih elektroprivrednih telekomunikacionih mreža. Na primer, rad [07] može da posluži za poređenje stanja TKM iz 2022. i 2024. godine. Šta kažu najnoviji dostupni razvojni i poslovni planovi EMS-a, EDS-a i EPS-a vezano za razvoj TKM?

### **2.1. EPS**

Telekomunikacioni sistem **EPS AD** se sastoji od PDH/SDH, DWDM i IP MPLS mreža. Prethodnih godina promovisan je koncept razvoja telekomunikacionog sistema koji se zasnivao na izgradnji nove okosnice i agregacionog dela IP MPLS mreže velikog kapaciteta, unapređenju pristupne ravni mreže i izgradnji nove mreže prenosa zasnovane na primeni DWDM/OTN tehnologije. Bazirano na informacijama sa Portala javnih nabavki [06] u 2023. i 2024. godini EPS u TKM ima investicije koje se odnose na unapređenje nadzora IP MPLS mreže i nadogradnju pristupne ravni, kao i na unapređenje infrastrukture IP MPLS mreže.

U [05] u delu za IKT održavanju i telekomunikacije dat je opšti pregled opreme koja se održava i šta su njene specifičnosti (različitost i heterogenost): *"Održavanje u oblasti informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT) podeljeno je na tekuće i investiciono održavanje poslovnih i tehničkih informacionih sistema, telekomunikacionih i ostalih tehnoloških sistema. Sa tehnološke strane osnovne celine za IKT održavanje su vezane za održavanje IT hardvera (serverske i storidž infrastukture), SAN i LAN mrežne infrastukture, uređaja za napajanje, klimatizaciju Data centara, softvera, uređaja za napajanje u telekomunikacionoj mreži, sistema za sinhronizaciju, telekomunikacione mreže prenosa, IP MPLS mreže i IKT servisa EPS AD . Delovi opreme koji se održavaju su izrazito različiti i heterogeni, starosti od nekoliko do desetak godina. Zbog kratkog tehnološkog veka IKT opreme, njeno kontinuirano održavanje u dužem vremenskom periodu predstavlja poseban izazov, tako da je standardizacija i homogenizacija IKT opreme u EPS AD predmet posebnih analiza. Aktivnosti održavanja se uglavnom realizuju kroz godišnje ugovore za preventivno i korektivno održavanje, tehničku podršku sa ili bez popravke neispravnih modula i različitim modalitetima ugovora servisnog nivoa."*

Koje sve TKM EPS AD održava, na koji način i preko kojih ugovora, može se videti na portalu javnih nabavki [06]. EPS, kao najvažnije održava IP MPLS, DWDM, SDH / PDH mrežu, kao i prateće sisteme napajanja i sinhronizacije. U okviru održavanja DWDM-a već se rade upgrade-ovi čvorova i NMS-a. SDH/PDH i IP MPLS mreža se neprekidno održava od ulaska u eksploataciju. Oprema se mora nadzirani preko odgovarajućih NMS sistema; potrebni su redovni preventivni pregledi najmanje jednom godišnje i vanredne intervencija u slučaju neispravnosti. O kako zahtevnom poslu se radi ilustrovaćemo kroz broj čvorova gore pomenutih mreža. IP MPLS mreža ima 52 lokacije za preventivne tehničke preglede. Održavanje DWDM sistema - 32 čvorišta su predmet preventivnog i operativnog održavanja, kao i daljinskog nadzora, uz praćenje performansi mreže i kreiranja novih servisa. SDH/PDH mreža ima 70 lokacija za održavanje i za preventivne preglede. Održavanje sistema jednosmernog napajanja se sprovodi na 66 objekata na teritoriji Srbije a održavanje sistema za sinhronizaciju na 4 lokacije.

## 2.2. EMS

U dokumentu [03] prikazana je planirana dinamika razvoja sistema telekomunikacija i tehničkog sistema upravljanja EMS AD za desetogodišnji period 2023-2032. Vezano za optički sistem prenosa očekuje se da se u predstojećem desetogodišnjem intervalu nastavi sa postavljanjem OPGW, tako da ukupno bude opremljeno oko 6000 km dalekovoda. Kako bi se prenosili signali distantne i diferencijalne zaštite na svim pravcima gde postoji OPWG, u skladu sa potrebama, biće instalirani uređaji za prenos signala zaštite. Ne očekuje se značajno širenje SDH prenosne mreže, već u manjoj meri primena dostupnih hibridnih SDH/PDH/MPLS-TP multipleksera u okviru projekata priključenja objekata na prenosni sistem i izgradnje novih objekata.

Ključni investicioni projekat u TKM u EMS-u je „Nadogradnja telekomunikacionog transportnog sistema“. Prema [03], od 2022. godine *"krenulo se sa unapređenjem već izgrađenog DWDM sistema, kroz koje se sagledava buduće racionalno korišćenje TK resursa i integracija saobraćaja kroz primenu MPLS over DWDM tehnologije"*. Iako na portalu [06] i u dokumentu [08] postoje javno dostupne informacije o stepenu realizacije ovog važnog investicionog projekta, ovaj rad ih neće navoditi. Zbog značaja, predlaže se rukovodstvu projekta da o tome napiše poseban rad.

U cilju realizacije svojih strateških planova, ali i zbog aktuelne potrebe napajanja nove DWDM i MPLS opreme gore pomenutog projekta, EMS je krenuo sa ugradnjom novih izvora napajanja u svojim važnim elektroenergetskim i poslovnim objektima [06]. Novi izvori (DC/DC pretvarači 220VDC/48VDC) snaga 10 kW i 14 kW realizovani su na 10+1 lokaciji a započela je realizacija i na dodatnih 11 lokacija.

Što se tiče održavanja TKM EMS-a, na bazi [06] EMS, kao i EPS, održava sve TKM; optičku mrežu na EMS dalekovodima, PDH/SDH mrežu, DWDM sistem iz prve faze realizacije, IP telefonsku komutacionu opremu, EMS napajanja, telezaštitne uređaje ...

## 2.3. EDS

Neki razvojni pravci u EDS doo preuzeti su iz trogodišnjeg programa poslovanja [09] i odnose se na razdvajanje IKT infrastrukture EPS i EDS i projekat automatizacije i modernizacije srednjenaponske distributivne mreže: *"Imajući u vidu usvojene strateške dokumente u oblasti IKT, pravce razvoja IKT u državi i okruženju, sve veći broj poslovnih*

*procesa koji zahtevaju IKT podršku, a pre svega, još uvek nedovršen proces razdvajanja IKT infrastrukture EDS od infrastrukture EPS, u periodu 2024-2026. godine IKT funkciju očekuju intenzivne aktivnosti. Pokazalo se da su podeljena nadležnost i dualno upravljanje IKT sistemom otežali detekciju i usporili rešavanje problema izazvanih sajber napadom. Nezavisna, savremena i sigurna infrastruktura predstavlja stabilnu osnovu za implementaciju i eksploataciju svih IS u poslovnom okruženju. Činjenica je da su EPS i EDS poslednjih godina prošle kroz više različitih faza organizacionih razdvajanja i spajanja, što se posledično odrazilo na trenutno stanje IKT infrastrukture. Zbog svega iznetog, njeno potpuno razdvajanje je prioritetna aktivnost. Ta odluka, odnosno nalog za potpuno razdvajanje zajedničke IKT infrastrukture EPS a.d. i Elektrodistribucije Srbije d.o.o., je doneta i naložena Zaključkom Vlade Republike Srbije CP 05 Broj:00-9/2024 od 18. januara 2024. godine. Takođe potrebna su velika dodatna finansijska sredstva za realizaciju Projekta Automatizacija i modernizacija srednjenaponske distributivne mreže koji treba biti podržan od strane Centra za IKT u delu telekomunikacija, aplikativnom delu i delu koji se odnosi na sisteme za daljinski nadzor i upravljanje."*

Prema [06], konkretizacija je data kroz sledeće projekte: unapređenje IT i TK infrastrukture, izgradnja centra za ranu detekciju IKT incidenata, nadogradnja radio sistema za potrebe dispečerske telefonije, proširenje mrežne infrastrukture i njenih kapaciteta, izgradnja RR linkova i druge.

Deo oko održavanja IKT u EDS DOO je takođe prisutan u [09] i u njemu je eksplicitno iskazan značaj održavanja visokog stepena pouzdanosti i raspoloživosti u oblasti IKT kao kritičnog resursa: *"Održavanje IKT sistema je deo posebnog Programa održavanja upravljačkih, informacionih i pratećih telekomunikacionih sistema odnosno održavanje DATA centara, IT infrastrukture i opreme, SCADA sistema, računarskih mreža, radio sistema (upravljanje i govor), sistema telefonije (fiksna, IP, mobilna), sistema multipleksera, telekomunikacionih kablova, poslovnih i tehničkih aplikacija, softverskih sistema, sistemskog softvera, licenci. Značaj održavanja visokog stepena pouzdanosti i raspoloživosti u oblasti informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT) kao kritičnog resursa je daleko veći, s obzirom da potencijalno nefunkcionisanje upravljačkog, informacionog i telekomunikacionog sistema može uzrokovati značajne poremećaje u obavljanju poslovnih aktivnosti Društva."*

Na bazi [06], primeri IKT održavanja u EDS DOO su: održavanje RR linkova i antenskih stubova, održavanje sistema za konsolidovani monitoring IKT infrastrukture, održavanje telefonskih centrala, održavanje telekomunikacionih kablova, održavanje optičkog SDH sistema prenosa i multipleksera i drugi.

Iz gornjih prikaza može se konstatovati da postoje važni razvojni telekomunikacioni projekti u EMS-u i EDS-u kao i projekti daljeg unapređenja i nadogradnje IP MPLS mreže EPS-a. Što se tiče aktivnosti održavanja, održava se gotovo sva telekomunikaciona oprema isporučena u zadnjih 15 do 20 godina. Ovo zahteva puno znanja i veština kod ljudi. Na primer, moraju znati PDH i SDH sisteme (od prvih generacija do najnovijih), MPLS opremu od prve generacije Core rutera koji su imali izlaz na 622 Mb/s SDH pa do zadnjih čiji su interfejsi 10/100 Gb/s ka DWDM-u. Dobar deo kompanija koje su prve isporučivale PDH/SDH uređaje više ne postoje. Broj telekomunikacionih čvorova samo kod EPS-a i EMS-a je preko 200 na preko 100 lokacija.

### 3 ORGANIZACIONI RAZVOJ TELEKOMUNIKACIONE FUNKCIJE

Usvajanje regulative EU, zelena tranzicija, digitalna transformacija kompanija i značajna uloga IKT-a u tim promenama dovode do promena i u energetske kompanija, u slučaju Srbije državnim elektroprivrednim kompanijama. Sve to zahteva i značajne organizacione transformacije u svim EPK i u IKT funkciji i podfunkciji telekomunikacija.

U radu [10] je prikazana situacija vezana za organizacione i tehničko-tehnološke aspekte u EPK tokom 2020. godine. Istaknuto je da za razliku od OPS-a i ODS-a gde su IKT funkcije na nivou 1 u EPS-u IKT se nalazi na nivou 2. Tada je konstatovano da sprovođenje konvergencije između OT i IT oblasti neće biti uspešno bez razmatranja i usklađivanja organizacije kompanije. Tada kao i krajem avgusta 2024., organizacija u oblastima IT, telekomunikacija i OT je bila različita u srpskim EPK, ujednačenija kod OPS-a i ODS-a i prilično nestrukturirana kod EPS-a. Detalji su dati u narednim poglavljima.

#### 3.1 EPS

U vreme prijave ovog rada IKT funkcija u EPS-u (uglavnom sa odvojenim organizacionim jedinicama za IT i telekomunikacije) je organizovana u Upravi i ograncima za proizvodnju električne energije i EPS Snabdevanju. Vredno je pomenuti da je januara 2013. u Upravi JP EPS formirana Direkcija za IKT sa 4 sektora i odgovarajućim brojem službi, ali je odlukom rukovodstva od marta 2015. organizacija spuštена na jedan sektor sa četiri službe. Od tada pa do jula 2024. godine u Upravi IKT je bila organizovan u okviru funkcije Korporativni poslovi u Sektoru za IKT sa službama za infrastrukturu; upravljanje i koordinaciju (telekomunikacije); produkciju; razvoj i strategiju. U ograncima za PEE, IKT je bio izrazito heterogeno organizovan kroz: Centar za informatiku; Službu za IT; Sektor IKT; Sektor za IS; Služba za sistem menadžmenta kvaliteta i informatiku.

U vreme završetka ovog rada finalizuje se nova IKT sistematizacija u EPS-u, što govori da je ovakva organizacija trebala da se menja i i IKT podiže na viši nivo. Nakon više od devet godina u skladu sa usvojenim Planom transformacije, od 15. avgusta 2024. formira se nova izvršna funkcija "IT i digitalizacija" sa izvršnim direktorom na čelu. Prema najavi, u okviru nje će se funkcionalno povezati poslovi uprave i ogranaka sa jasnim linijama rukovođenja. Nezvanično, tada bi trebalo da budu formirana četiri nova sektora. Organizaciona celina koja se bavi razvojem i održavanjem telekomunikacionih mreža bi trebala da bude u sektoru za IKT infrastrukturu u Službi za telekomunikacije i mrežnu infrastrukturu, koja bi trebala da ima nekoliko odeljenja.

#### 3.2 EMS

EMS IKT ima promene u svojoj organizacionoj šemi iz 2020. godine. Kao najvažnije, na bazi [11], IKT funkcija ima izvršnog direktora u čijoj su nadležnosti četiri centra: Centar za IT infrastrukturu sa dva sektora (za mrežnu i serversku IT infrastrukturu); novoformirani Centar za telekomunikacione sisteme sa sektorom za telekomunikacione sisteme prenosa i sektorom za komutacione sisteme prenosa; Centar za aplikativni razvoj i podršku informacionim sistemima sa dva sektora; i Centar za operativne tehnologije centara sa tri sektora i sektor za IKT bezbednost.

### 3.3 EDS

Kod EDS-a IKT je 2020. bila organizovana na nivou Centra za IKT sa 3 sektora (svaki sa po 5 službi): SCADA i procesna tehnika; telekomunikacije; i sektor za podršku procesu upravljanja DEES. Trenutno, nivo organizacije je ostao isti, broj sektora je četiri, a sada je prioritet uvođenje novog petog sektora za informacionu bezbednost [09]: *"Uzimajući u obzir izneto, kao i značaj održavanja visokog stepena pouzdanosti informaciono-komunikacionih sistema, nameće se potreba da se postojeća organizacija poslova u Centru za IKT izmeni, odnosno dopuni, tako što će se formirati peti sektor (po funkcionalnom principu) – Sektor za informacionu bezbednost. Zbog specifičnosti, poslovi informacione bezbednosti bi se obavljali centralizovano, na nivou novoformiranog sektora, odnosno, nije potrebno formirati službe po distributivnim područjima. Takođe, opisima zaduženja i odgovornosti koje će sektor, odnosno njegovi zaposleni imati, treba jasno definisati da, u smislu informacione bezbednosti, Sektor ima nadležnost nad svim funkcijama u Društvu. Odnosno, bez obzira što je formalno, zbog tehnološke zavisnosti, Sektor u okviru Centra za IKT, njegov zadatak je da upravlja informacionom bezbednošću celog EDS-a. Centar za IKT će se podvrgnuti značajnim organizacionim izmenama u periodu od tri godine."*

Može se **zaključiti** da je organizacija IKT funkcije u EPK sklona promenama. Usklađuje se prema potrebama samih kompanija - ponekad i stavom menadžmenta šta je i kolika njena uloga i koji hijerarhijski nivo joj treba dodeliti. Na primer, telekomunikacije u EPS-u su istorijski organizaciono pozicionirane od direkcije 2012., sektora 2013. - 2015. i službe od 2015. do 2024. i nadalje. U EMS AD, zahvaljujući investicijama, podignut je hijerarhijski nivo funkcije telekomunikacija sa sektora na centar, a deo vezan za transportne telekomunikacione sisteme sa službe na sektor. EDS ima Centar za IKT a planirano je formiranje sektora za informacionu bezbednost, koji će, bez obzira što je formalno u Centru za IKT, upravljati informativnom bezbednošću celog EDS-a.

## 4 LJUDSKI FAKTOR

Deklarativno, u svim kompanijama pa i u EPK uvek je prisutno da su ljudi na prvom mestu, da sve kompanije vode računa o zaposlenima, da se posebna pažnja posvećuje ljudima sa specijalnim znanjima, da je ljudski faktor bitan i kritičan element. Realno, u kojoj meri se to prepoznaje i u elektroprivrednim kompanijama? Moglo bi se reći da funkcije ljudskih resursa (HR) u EPK prepoznaju značaj ljudskog faktora, ali je glavno pitanje kako se to završi u praksi.

Ilustrovaćemo izvodom iz trogodišnjeg plana poslovanja **EPS AD** iz 2024. [05] a vezano za politiku zaposlenosti: *"Usled penzionisanja i odlaska na bolje plaćene poslove značajan deo najstručnijeg kadra, sa specifičnim znanjima i veštinama neophodnim za obavljanje delatnosti u elektroprivredi, napustio je EPS AD Beograd u poslednjih nekoliko godina. U prvih 10 meseci, po osnovu dobrovoljnih odlazaka, 60 lica je napustilo EPS AD, od čega 38 sa visokom i višom stručnom spremom. Analiza dobrovoljnih odliva pokazuje da EPS AD najviše napuštaju inženjeri elektrotehnike i mašinstva.*

*Nemogućnost EPS AD Beograd da svojim najstručnijim zaposlenima ponudi približne uslove kakve im nude konkurentske firme iz okruženja, ukazuje na to da EPS AD nije više atraktivan poslodavac na tržištu. Zato kreiramo programe privlačenja i zadržavanja stručnjaka svih struka, a posebno elektro i mašinske. Započecemo sa stipendiranjem najboljih studenata ciljanih fakulteta, već od ove školske godine. Radićemo na povećanju zarada i povećanju zadovoljstva zaposlenih radom u EPS AD, radi zadržavanja stručnjaka i prijema novih."*

**EDS DOO** u svom trogodišnjem planu poslovanja [09] planira samo obnavljanje kadrova usled odliva, uz konstataciju da su nova zapošljavanja ograničena i budžetom i Uredbom Vlade Srbije: *"Trogodišnjim programom poslovanja planirano je obnavljanje kadrova neophodnih u funkciji realizacije elektroenergetskog bilansa i predviđenih programa rada i razvoja, a u skladu sa sagledanim mogućim odlivom zaposlenih. Planirana dinamika zapošljavanja u 2024. godini, izvršiće se pod uslovima propisanim Zakonom o budžetskom sistemu i Uredbom o postupku za pribavljanje saglasnosti za novo zapošljavanje i dodatno radno angažovanje kod korisnika javnih sredstava."*

**EMS AD** takođe ima problem sa odlivom stručnog inženjerskog kadra usled nedovoljno atraktivnih zarada, kao i generalno malog broja zaposlenih u odnosu na obim aktivnosti. U delu telekomunikacija došlo je do prijema nekoliko novih saradnika koji su angažovani na poslovima izgradnje nove MPLS mreže.

U radu na terenu u elektroenergetskim objektima postoji dosta aktivnosti koje se "ne vide" a traže angažovanje zaposlenih. Na primer, pripremne aktivnosti: zahtevi i obezbeđivanje dozvola za ulazak u EEO i pripremne aktivnosti obilaska lokacija (*site survey*); participacija u aktivnostima prilikom isporuke opreme, instalacije i puštanja u rad, SAT (*Site Acceptance Test*) testiranja. U praksi, pri izgradnji čvora mreže potrebno je u proseku četiri puta posetiti objekat (obilazak, isporuka, instalacija, puštanje u rad i SAT ispitivanja).

Analiza obima posla i broja zaposlenih u IKT-u EPK je česta aktivnost spoljnih konsultantskih kuća, koje uglavnom kao rezultat "pronalaze" višak zaposlenih. U ovom radu daje se suprotan primer telekomunikacija u upravi EPS-a. Jednociфreni broj zaposlenih, koji predstavlja oko 10% zaposlenih u IKT-u u Upravi, manji je od broja mreža koje treba da se održavaju (SDH/PDH; DWDM, IP MPLS, sistem napajanja i sistem za sinhronizaciju) što je tehnološki na oko 200 čvorova i geografski na stotinak lokacija. Samo obaveze oko održavanja mreža i na primer povremeno učešće u preventivnim pregledima opreme, daleko prevazilaze sadašnji broj zaposlenih. Generalno, u ovom radu se zauzima stav da je broj zaposlenih u telekomunikacijama EPK nedovoljan.

I kod spoljnih kompanija i vendora koji isporučuju opremu, vrše implementaciju mreža, daju tehničku podršku EPK u IKT delu postoji trend stagnacije ili opadanje stručnog kadra uz učestalu promenu vlasničke strukture i imena. Broj zaposlenih kod ključnih vendora se uglavnom smanjuje, postoje primeri da neki od njih zatvaraju svoje kancelarije u Srbiji i odlučuju se za rad preko lokalnih partnera. A na primer, organizacija jednog NOC centra i dežurstava inženjera i tehničara u njemu u režimu 24/7, uz angažovanje zaposlenih i na drugim projektima razvoja i održavanja, zahteva i kod lokalnih kompanija veći broj zaposlenih nego što ih trenutno ima. Kako je studentima tehničkih fakulteta atraktivnije da se bave programiranjem nego infrastrukturnim telekomunikacijama, krug mogućnosti pronalaženja novog stručnog kadra je dodatno sužen.

## **5 PREDLOZI I ZAKLJUČCI**

Predlozi i zaključci u ovom poglavlju kao i konstatacije iz prethodnih poglavlja predstavljaju lične stavove autora sa aspekta tehnologija, organizacije i ljudskog faktora. Vezano za razvoj TKM, EMS je unapredio svoju DWDM mrežu za Core brzine 100 Gb/s i intenzivno razvija MPLS mrežu po konceptu MPLS over DWDM. EDS-u je prioritet razvoja, pored podizanja bezbednost IKT sistema kroz razdvajanje zajedničke IKT infrastrukture od EPS-a, modernizacija srednje naponske distributivne mreže i razvoj radio komunikacija, shodno [04]

nastavak izgradnje i proširenje kapaciteta širokopojasne mreže EDS-a. EPS je u ranijem periodu izgradio napredne IP MPLS i DWDM mreže i ima telekomunikacioni sistem koji pruža najviše servisa. Primećuje se smanjeni obim investicija u telekomunikacioni sistem u odnosu na prethodni period.

Telekomunikacione mreže se sve teže održavaju zbog starosti oprema, prestanak proizvodnje, prestanak podrške proizvođača opreme (primer SDH opreme). Životni vek IKT opreme (uobičajeno 6 godina) je znatno kraći u odnosu na životni vek OT opreme (i do 20 godina). U tri EPK održava se telekomunikaciona oprema u nekoliko stotina čvorova na preko stotinu lokacija, uz na primer, prateću oprema za napajanje u svakom čvoru. Poređenjem samo aktivnosti održavanja i broja zaposlenih, zaključak da je broj zaposlenih nedovoljan.

Organizacione promene IKT i telekomunikacione funkcije su u toku, neke su inicirane iznutra a neke od strane spoljnih konsultantskih kuća. EMS je zbog potreba projekta nadogradnje telekomunikacionog transportnog sistema podigao hijerarhijski nivo telekomunikacija sa sektora na centar a organizacione jedinice za transportne telekomunikacione mreže sa službe na sektor. EDS ima centar sa IKT sa sektorom za telekomunikacije. EPS IKT je u vreme predaje ovog rada u transformaciji sektora za IKT u izvršnu funkciju za IT i digitalizaciju sa 4 nova sektora, ali nezvanično telekomunikacije i mreže ostaju na nivou službe.

Potrebno je zaposliti nove ljude u delu koji se bavi infrastrukturnim telekomunikacijama, bez ograničenja i na bazi stručne kompetentnosti. Koncept SLA (*Service Level Agreement*) održavanja je ispravan, ali postoje minimumi zaposlenih koji se moraju ispuniti. Poželjno je ukloniti restrikcije oko novozaposlenih i njihovih zarada u IKT EPK jer je potreban nivo zarada diktiran tržištem. Da bi se pronašao stručni kadar tog profila, potrebno je motivisati ljude da se zaposle u IKT sektorima u elektroprivredi ili da ostanu zaposleni, a jedan od ključeva su veće zarade. Ljudi koji rade na ovako složenim tehničko tehnološkim sistemima imaju posebna znanja i mogu lako da se zaposle u inostranstvu ili u IKT kompanijama u zemlji! Njihov neadekvatan broj ili nedostatak može da poveća rizik nefunkcionisanja telekomunikacionih sistema, a nefunkcionisanje ove kritične infrastrukture dovodi do nefunkcionisanja cele kompanije. Sa postojećim brojem zaposlenih, postavlja se pitanje da li je moguća veća institucionalna saradnja u trouglu EMS - EDS - EPS!? Sinergijom se može dosta postići, ali su organizacioni jazovi trenutno preveliki, kako unutar kompanije (IKT vs OT, uprava vs ogranci, IT vs TK) tako i između EPK. A deluje da će jazovi biti sve veći.

Obnovljivi izvori energije, zelena tranzicija i digitalna transformacija kompanija donose nove izazove. Prema [13] u Srbiji već ima 511 MW instalisane snage vetra, na distributivnim mrežama je 320 MW solara a prozumeri su dostigli 55 MW. Menja se struktura proizvodnje, menja se struktura potrošnje, menja se tok energije i uvodi se desetina novih elektroenergetskih objekata. Zato je potrebno još ljudi u elektroprivredi i posebno u delu infrastrukturnih telekomunikacija, odnosno telekomunikacionih mreža. Već danas je ljudski faktor postao kritični element razvoja i održavanja telekomunikacionih mreža što će biti još izraženije u budućnosti.

## LITERATURA

- [1] Strategija razvoja mreža nove generacije do 2023. godine, Sl. Glasnik Republike Srbije, br 33/2018
- [2] Strategija razvoja sistema elektronskih komunikacija u Republici Srbiji do 2027. godine, "Službeni glasnik RS", broj 70 od 14. avgusta 2024.

- [3] Plan razvoja prenosnog sistema Republike Srbije za period 2023-2032, AD Elektromreža Srbije, Beograd, jun 2023.
- [4] Plan razvoja distributivnog sistema za period 2023 - 2032., Elektrodistribucija Srbije, Beograd, juni 2024.
- [5] Trogodišnji plan poslovanja Akcionarskog društva „Elektroprivreda Srbije“, Beograd za period 2024-2026.g., Izvod, januar 2024.
- [6] <https://jnportal.ujn.gov.rs/>
- [7] Dragan Bogojević: “Multiservisne mreže u elektroprivredi: pregled i iskustva“, 20. Simpozijum CIGRE Srbija, STK-D2, Bajina Bašta, 10-13 Oktobar 2022, R D2-09, Str. 88-95
- [8] Godišnji program poslovanja EMS AD za 2024. godinu, <https://ems.rs/godisnji-program-poslovanja/>
- [9] Trogodišnji plan poslovanja Elektrodistribucija Srbije“, Beograd za period 2024-2026.g., Izvod, mart 2024.
- [10] Dragan Bogojević, Jedno viđenje konvergencije informacionih i operacionih tehnologija u elektroprivrednim kompanijama, 19. Simpozijum CIGRE Srbije, R D2 02, 2020.
- [11] EMS-AD-do-sektora-web, <https://ems.rs/organizacija/>
- [12] <https://jnportal.ujn.gov.rs/planovi-nabavki-svi>
- [13] EPS Energija broj 108, jul 2024., <https://www.eps.rs/cir/Pages/energija.aspx>



**ELECTRIC POWER INDUSTRY TELECOMMUNICATION NETWORKS:  
DEVELOPMENT, MAINTENANCE AND HUMAN FACTOR**

**DRAGAN BOGOJEVIĆ  
FLANER DOO**

**BELGRADE**

**SERBIA**

*Abstract*— Electricity companies in Serbia have owned telecommunication networks based on optical cables for twenty years. In that period, SDH/PDH, IP MPLS, DWDM and IP MPLS over transport DWDM networks were developed. A brief overview of the telecommunications networks that were put into operation after development and are the subject of regular maintenance activities is given. An analysis of publicly available strategic documents and development plans gives a limited view of what can be expected in the near future. This paper additionally analyzes the organizational structure in the field of telecommunications and ICT in state-owned electricity companies, as well as the human factor. By reviewing the activities in development and maintenance and the responsibilities of employees, the conclusion is drawn that the human factor has become a critical element that should be given much more attention.

*Key words* — Electric Power Company of Serbia, telecommunication networks, development and maintenance, human factor

**ELEKTROPRIVREDNE TELEKOMUNIKACIONE MREŽE: RAZVOJ,  
ODRŽAVANJE I LJUDSKI FAKTOR**

**ELECTRIC POWER INDUSTRY TELECOMMUNICATION NETWORKS:  
DEVELOPMENT, MAINTENANCE AND HUMAN FACTOR**

**DRAGAN BOGOJEVIĆ  
FLANER DOO**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* - Elektroprivredne kompanije u Srbiji poseduju telekomunikacione mreže zasnovane na optičkim kablovima punih dvadeset godina. U tom periodu razvijane su SDH/PDH, IP MPLS, DWDM i IP MPLS mreže preko transportnih DWDM mreža. U ovom radu za tri državne elektroprivredne kompanije daje se kratak pregled telekomunikacionih mreža koje su u razvoju kao i onih koje su posle razvoja prešla u eksploataciju i koja su predmet redovnih aktivnosti održavanja. Analizom javno dostupnih strateških dokumenata, desetogodišnjih planova razvoja, trogodišnjih planova poslovanja i javnih nabavki, daje se i ograničen pogled šta se može očekivati u bliskoj budućnosti. Ovaj rad dodatno analizira i organizacionu strukturu u oblasti telekomunikacija i IKT-a u državnim elektroprivrednim kompanijama koja je često neusklađena i sklona promenama. Iako je deklarativno prepoznat značaj ljudskog faktora i politike zaposlenosti, ovaj rad ukazuje da je najčešće u praksi drugačije. Pregledom aktivnosti u razvoju i održavanju i obaveza zaposlenih, izvodi se zaključak da je ljudski faktor postao kritičan element kome treba posvetiti mnogo više pažnje i da je potrebno zaposliti novi stručni kadar u oblasti infrastrukturnih telekomunikacija.

*Ključne reči* – Elektroprivreda Srbije, telekomunikacione mreže, razvoj i održavanje, ljudski faktor.



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.387M](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.387M)

D2 11

**APLIKACIJE ZA DIJAGNOSTIKU I MONITORING RADIO SISTEMA ZA POTREBE  
UPRAVLJANJA SREDNJE NAPONSKOM DISTRIBUTIVNOM MREŽOM NA  
TERITORIJI BEOGRADA**

**MILIJA MARINKOVIĆ \*  
TAMARA TOMIĆ  
PREDGRAG ŠEJAT  
SANJA JOVANOVIĆ  
ELEKTRODISTRIBUCIJA SRBIJE - BEOGRAD**

**BEOGRAD**

**SRBIJA**

*Kratak sadržaj* - Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, u svom sistemu na kompletnom konzumnom području Republike Srbije, ima veći broj sistema daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom baziranih na digitalnim paketnim radio uređajima PRD (Packet Data Radio) pri čemu se koristi protokol DNP3.

Sistem daljinskog nadzora i upravljanja (SDNU) srednjenaponskom distributivnom mrežom, zasnovan je na uskopojasnim digitalnim radio komunikacijama u UHF opsegu. Sistem omogućuje uključivanje najrazličitije rasklopne opreme i inteligentnih elektronskih uređaja.

Sistemi za daljinski nadzor i upravljanje bazirani na digitalnim paketnim radio uređajima PDR realizovani su na taj način da se merenja, statusi i alarmi prenose po događaju sa vremenskom odrednicom pridruženom na samom RTU (Remote Terminal Unit), pri čemu se sinhronizacija vremena RTU vrši sa SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) serverom preko DNP3 protokola. Svaki radio uređaj u sistemu podržava store and forward funkcionalnost, tako da se može koristiti i za prosleđivanje poruka dobijenih od drugih radio uređaja.

Radio uređaji pored prenosa podataka iz domena daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom imaju mogućnost dijagnostike, odnosno praćenja parametara samih radio uređaja i komunikacionih linkova.

\* Beograd, milija.marinkovic@ods.rs

**Softverska aplikacija RND (Radio Network Diagnostic) radi na Linux operativnom sistemu na standardnoj serverskoj hardverskoj platformi. Za arhiviranje podataka koristi adekvatnu bazu podataka. Baza podataka je namenjena za efikasan rad sa podacima sa vremenskom odrednicom (Time Series data).**

**Korisnički interfejs za pregled podataka i kreiranje izveštaja jeste Web baziran tako da omogućava pristup ovlašćenim službama bez potrebe za instaliranjem namenskog softvera.**

***Ključne reči: SDNU, SCADA, PDR, RTU, RND***

## **1. UVOD**

Elektrodistribucija Srbije je preduzeće za distribuciju električne energije koje predstavlja složen tehničko-tehnološki i poslovni sistem. Funkcija elektrodistributivnih (ED) preduzeća je da električnu energiju, preuzetu od operatora prenosnog sistema, distribuiraju do potrošača pri čemu su od jednakog značaja kontinuitet isporuke i kvalitet isporučene energije u skladu sa odgovarajućim tehničkim normativima.

Daljinsko upravljanje trafo stanicama (TS) je neophodan servis u obezbeđenju kontinuiranog, stabilnog i kvalitetnog napajanja potrošača električnom energijom.

Daljinsko upravljanje se realizuje iz nadređenog centra upravljanja, preko lokalnog sistema za nadzor i upravljanje, realizovanog u transformatorskoj stanici, u realnom vremenu. Kao takav, ovaj servis postavlja specifične zahteve za komunikacione servise, koje karakteriše prenos podataka u realnom vremenu i pogonskih podataka (van realnog vremena) između centra upravljanja (CU) i elektro-energetskih objekata.

Osnovni zadatak uređaja za daljinsko upravljanje i nadzor rasklopnom opremom je da se u slučaju kvara na nekom nepristupačnom terenu, a u slučaju dugačkih i vrlo razgranatih izvoda izvrši brza i pouzdana lokalizacija i isključenje deonice u kvaru. Lokalizaciju i isključenje deonice u kvaru je potrebno izvršiti uz minimalno angažovanje dežurnih električara i raspoloživih vozila. Na ovaj način doći će do značajnog smanjenja trajanja vremena prekida i gubitaka usled neisporučene električne energije.

Uređaji za daljinsko upravljanje i nadzor nad rasklopnom opremom postavljaju se na postojećim dalekovodnim stubovima i u transformatorskim stanicama. Izabrani stubovi se nalaze na početku ogranaka koji napajaju veći broj transformatorskih stanica 10/0,4 kV i na magistrali tako da sekcionišu kontrolisani izvod u ravnomernim deonicama.

Omogućavajući postojanje sistema daljinskog nadzora i upravljanja TS, sistem telekomunikacija postao je neophodan i neizostavan integralni deo upravljanja elektrodistributivnom mrežom Elektrodistribucije Srbije, na teritoriji cele zemlje, dok će u radu biti opisan samo sistem daljinskog nadzora i upravljanja nad srednjenaponskom distributivnom mrežom, kao i aplikacije za dijagnostiku i monitoring pomenutog radio sistema na teritoriji Beograda.

## **2. OPIS SISTEMA DALJINSKOG UPRAVLJANJA SREDNJENAPONSKOM DISTRIBUTIVNOM MREŽOM**

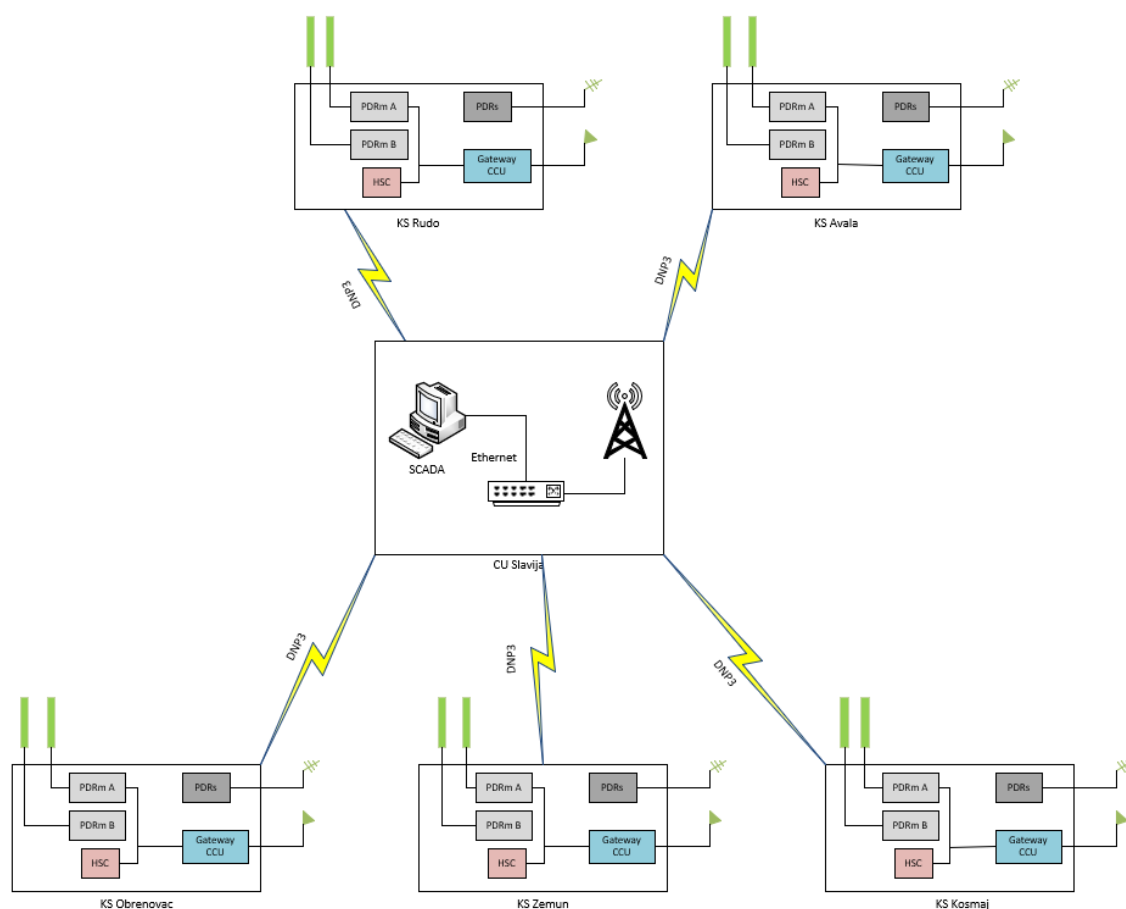
Sistem daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom mrežom na distributivnom području Beograd po svojoj arhitekturi je na dva nivoa.

Prvi nivo čine veze Centar upravljanja - koncentratorski sistemi. Glavnim putem koncentratorski sistemi su sa Centrom upravljanja povezani pomoću postojećih

širokopojasnih linkovskih veza. Ovi linkovi omogućavaju veći protokol, preko 100 Mb/s. Svih 5 dislociranih koncentratorskih sistema (Rudo, Avala, Kosmaj, Zemun i Obrenovac) zajedno sa Centrom upravljanja, koji se nalazi u poslovnom objektu Elktrodistribucije Srbije na Slaviji, čine jedan prsten.

Kao rezervni prenosni put koristi se postojeća PDR komunikacija. Prebacivanje rada na rezervni komunikacioni put vrši se po posebnoj proceduri.

Drugi nivo SDNU čine veze koncentratorskih stanica sa repetitorskim i sa udaljenim krajnjim stanicama. Na većini lokacija su digitalni radio-komunikacioni moduli, s tim što je na njima instalirana nova verzija firmware-a sa podržanim DNP3 protokolom. Ovim je omogućen prenos većeg broja parametara, omogućena je vremenska sinhronizacija kroz ceo sistem, kao i prenos promene statusa i vrednosti svakog parametra sa tačnim vremenom nastanka u lokalnu. Na slici 1 prikazana je arhitektura sistema daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom mrežom.



Slika 1- Arhitektura sistema daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom

### 3. ELEMENTI INSTALIRANOG SISTEMA DALJINSKOG NADZORA I UPRAVLJANJA

Instalirani SDNU čine SCADA server(i) sa pratećom opremom, koncentrador podataka, PDR ripiteri i dislocirane RTU sa izvršnim organima (reklozeri/prekidači/rastavljači). Svaka lokacija u PDR radio sistemu opremljena je adekvatnim antenskim sistemom.

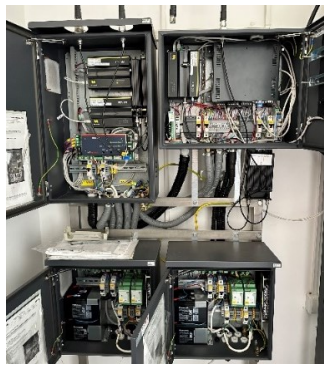
Na teritoriji DP (Distributivno Područje) Beograd definisano je 5 koncentratorskih lokacija (koncentratora podataka), i svaki od njih se sastoji od 4 kabineta:

1. NMCCU kabinet sa kontrolnom jedinicom GW (Gateway) i rezervnim PDR modemom, za komunikaciju sa SCADA sistemom u slučaju otkaza širokopojsnih linkova. U ovom kabinetu je smešten i 5-portni ethernet switch i I/O jedinica.

2. Kabinet sa dva master PDR radio modema za komunikaciju sa svim RTU i ripiterskim lokacijama i kontrolna jedinica HSC (Hot Standby Control) koja je zadužena za selekciju da samo jedan PDR bude aktivan.

3. Dva kabineta za napajanje (radno i redundantno) jedinica u gore navedena dva kabineta. Elementi ovih kabineta su: dve pretvaračke jedinice za konverziju naizmeničnog mrežnog napona 230V AC u jednosmerni 12V DC, dve AKU baterije i dve BMU (Battery Monitoring Units) za kontrolu punjenja i pražnjenja AKU baterija.

Na slici 2 je prikazan pimer instalacije na koncentratorskoj lokaciji.



Slika 2 – Primer instalacije koncentratora podataka

### 3.1 NMCCU

Mrežni koncentratori NMCCU u PDR sistemu nadgledaju i izvršavaju komunikaciju prema svim RTU lokacijama u svakom od 5 PDR podsistema. Ova komunikacija se odvija preko digitalnih UHF radio modema. Sve dobijene podatke sa RTU lokacija, mrežni koncentratori prosleđuju SCADA serveru. Izdate daljinske komande od strane dispečera u CU, preko RS (Remote Server), prosleđuju se do RTU lokacije na kojoj se izvršava izdata komanda od dispečera. Veza mrežnog koncentratora i SCADA sistema je realizovana preko širokopojsnih linkova, a kao rezerva se koristi digitalna radio komunikacija preko PDR sistema višeg nivoa. Sastavni deo GW jedinice je i „Touch“ ekran preko koga se mogu pratiti stanja parametara sa RTU lokacija i u lokalnu izdavati daljinske komande uključenja/isključenja.

Osnovne funkcije mrežnog koncentratora NMCCU su da:

- U kontinuitetu vrši prikupljanje svih procesnih parametara, da najbitnije od njih trenutno prikazuje i da vrši vizuelno upozorenje u slučaju nastanka nekog ekscesa.
- Sva stanja i promene nastale u SDNU trenutno prosleđuje nadređenom SCADA sistemu.
- Omogućiti upravljanje nad udaljenim automatizovanim prekidačkim elementima.
- Prihvata i trenutno prosleđuje željenoj RTU lokaciji svaku upravljačku komandu dobijenu sa nadređenog SCADA sistema.
- Detektuje prisustvo svake RTU i Ripiterske jedinice u sistemu.
- Vršiti arhiviranje snimljenih događaja kako bi operator imao mogućnost naknadne analize.

Pet ormana koncentratora NMCCU locirana su u sledećim objektima:

- Rudo, Soliter 1
- Avala, Avalski toranj
- Kosmaj, Antenski stub Telekoma

- Zemun, Prvomajska
- Obrenovac

3.1.1 Osnovne karakteristike PDR mrežnog koncentratora NMCCU je mrežni koncentrator podataka koji povezuje PDR krajnje stanice (RTU) sa SCADA sistemom. Praćenjem statusnih podataka i slanjem komandnih signala do krajnjih stanica, NMCCU ima potpunu kontrolu nad komunikacionim sistemom distributivne mreže. Kućište uređaja NMCCU može biti postavljeno u kancelariji ili u trafostanici i nije predviđena montaža na otvorenom.

PDR koncentrator podataka sastoji se od:

- Kontrolne jedinice, GW sa NFE (Network Front-End) softverom
- Kontrolne jedinice HSC
- Radio uređaja (PDR)
- Po potrebi UHF filter
- Touch ekrana
- I/O jedinice
- Ethernet switch-a
- Vremenskog releja
- Jedinica za napajanje

Radio mrežni koncentrator nadgleda i komunicira sa svim instaliranim i automatizovanim udaljenim RTU jedinicama. Broj RTU jedinica može biti do 120 i sve one se mogu koristiti i kao ripiteri.

Osnovne karakteristike PDR koncentratora su:

- Kompaktan je i bez pokretnih delova – realizovan je na jednoj ploči.
- Koristi Linux OS.
- Radi kao adapter protokola - podržava višestruke simultane master i slave protokole
- Kao mrežni servis poseduje Firewall zaštitu.
- Višestruki VPN sa enkripcijom.
- Može raditi i kao redundantni sistem (sa automatskim prebacivanjem).
- Ima mogućnost lokalne vremenske sinhronizacije (GPS) ili sa SCADA servera (Ethernet).
- Zahteva minimalno održavanje.
- Može da radi kao primarni RTU uređaj.
- Poseduje lokalni kontrolni panel sa ekranom osetljivim na dodir.
- Poseduje ugrađene radio test funkcije.
- Lako se integriše sa SCADA aplikacijom.
- Oposlužuje do 120 RTU jedinica.
- Po svakoj RTU praktično može prenositi neograničen broj: stanja DI (Digital Input), stanja DO (Digital Output), statusa CO (Counter) i vrednosti AI (Analog Input).
- Prenosi interne digitalne ulazne statuse (prisutnost mrežnog napajanja, nizak nivo AKU baterije, ispravnost punjača, koja je master radio jedinica aktivna, validnost komunikacije sa I/O jedinicom).
- Ima mogućnost daljinskog reseta GW kontrolne jedinice.
- Ima mogućnost lokalne/daljinske selekcije željene master radio PDR jedinice (PDRm\_A/PDRm\_B) preko HSC kontrolne jedinice.
- Prenosi parametre kvaliteta radio komunikacionih linkova (RSSI - Received Signal Strength Indication, Tx i napone napajanja radio modema u tretiranom linku).

### 3.2 PDR ripiter

Sastavni deo PDR podsistema čine i radio ripiteri. Ovi uređaji se instaliraju na strateškim lokacijama kako bi se radio signalom pokrile lokacijski nepristupačne RTU, a ujedno da u

perspektivi pri proširenju SDNU, omogućće radio pokrivanje novih, potencijalno komunikacijski nepristupačnih RTU. Svaki PDR uređaj na RTU lokaciji poseduje funkcionalnost i može se koristiti kao ripiter.

U realizovanom SDNU figurišu i ripiterske stanice u čijem se ormanu nalazi radio jedinica PDR, jedinica FastNet za prihvatanje DI/DO signala, jedinica BMU za kontrolu rezervnog napajanja, ispravljačka jedinica 220 VAC na 12 VDC i jedna baterijska ćelija.

U instaliranom sistemu, ova jedinica predstavlja RTU koji vrši retransmisiju sa jedne na drugu RTU stanicu. Kontrolni moduo, prihvata digitalne ulaze iz jedinice za nadgledanje baterije i prosleđuje ih digitalnom radio modulu, serijskom vezom (protokol DNP3). Sa ripitera je bitno nadgledanje parametara koji ukazuju na validnost glavnog i rezervnog napajanja i statusa jedinice za napajanje. Iako ripiter nema izvršne organe u lokalnu, njegovo eventualno ispadanje iz PDR sistema uticalo bi na validnost komunikacije svih RTU koje ga koriste kao posrednu tačku za komunikaciju sa mrežnim koncentratorom.

#### **4. DIJAGNOSTIFIKOVANJE NEISPRAVNOSTI**

Sistemi za daljinski nadzor i upravljanje bazirani na digitalnim PDR uređajima realizovani su na taj način da se merenja, statusi i alarmi prenose po događaju sa vremenskom odrednicom pridruženom na samom RTU, pri čemu se sinhronizacija vremena RTU vrši sa SCADA serverom preko DPN3 protokola. Pored komunikacije koja se odvija po događaju, povremeno se vrši prozivka svih krajnjih stanica u sistemu kako bi se proverilo da li se postoji kominikacija sa krajnjim stanicama. Svaki radio uređaj u sistemu podržava store and forward funkcionalnost, tako da se može koristiti i za prosleđivanje poruka dobijenih od drugih radio uređaja. Pored radio uređaja instaliranih na krajnjim lokacijama (daljinskim stanicama), na kojima su realizovani daljinski nadzor i upravljanje, instaliran je i određeni broj ripitera koji su opremljeni sa RTU i prikupljaju određene podatke značajne za rad samog ripitera. Na jednoj radio putanji od krajnje lokacije do centra upravljanja može biti maksimalno 6 radio hopova. Radio uređaji mogu se konfigurisati tako da na određeni broj radio poruka šalju dijagnostičke parametre radio komunikacija.

##### **4.1. Dijagnostički parametri**

Radio poruke koje krajnji radio uređaji šalju u centar upravljanja pored informacija dobijenih od RTU sadrže i sledeće podatke koji su od interesa za praćenje rada i dijagnostiku samog radio sistema:

- Predajna snaga signala (Maksimalna i minimalna predajna snaga u satu)
- Prijemna snaga signala (Maksimalni i minimalni RSSI u satu)
- Slabljenje signala (Maksimalno i minimalno slabljenje u satu)
- Broj poruka u minutu
- Napon napajanja radio uređaja (Maksimalni i minimalni napon napajanja)
- Temperatura radio uređaja (Maksimalna i minimalna temperatura u satu)

Učestanost slanja dijagnostičkih parametara je konfigurabilno i može se definisati na master radio uređaju.

##### **4.2 Softverski modul**

Softverska aplikacija RND (Radio Network Diagnostic) radi na Linux operativnom sistemu na standardnoj serverskoj hardverskoj platformi. Za arhiviranje podataka koristi adekvatnu bazu podataka. Baza podataka je namenjena za efikasan rad sa podacima sa vremenskom odrednicom (Time Series Data).



Korisnički interfejs za pregled podataka i kreiranje izveštaja jeste Web baziran tako da omogućava pristup ovlašćenim službama bez potrebe za instaliranjem namenskog softvera. U korisničkom interfejsu može se obezbediti:

- Prikaz mreže radio sistema (radio uređaji prema prostornom rasporedu odnosno koordinatama i radio linkovi) sa prikazom parametara za svaki radio uređaj i link koji su poslednji prikupljeni.
- Grafički prikaz promena parametara radio uređaja i radio linkova u toku vremena.
- Tabela prikaz dijagnostičkih parametara za sve radio uređaje i sve radio linkove sistema ili podsistema.

Za svaki prikazani parametar obezbeđuje se definisanje granica (minimalno dve vrednosti) i promene boje ispisa u zavisnosti od vrednosti parametara i definisanih granica.

Vremenski period za koji se daju grafički prikaz promene parametara, kao i tabelarni prikaz, omogućuje izbor proizvoljnog početnog i krajnjeg trenutka sa unapred definisanim izborom zadnjeg dana, nedelje, meseca ili godine, a može omogućiti i vezivanje perioda vremena za tekuće vreme (npr. poslednjih 6 sati, poslednja 24 sata i slično). Takodje, može se obezbediti automatsko ažuriranje podataka prema konfigurabilnoj učestanosti (npr. 15 sekundi, 1 minut, 15 minuta itd.), kao i automatsko kreiranje izveštaja (npr. dnevni, nedeljni, mesečni ili godišnji) i na zahtev korisnika.

## 5. GLAVNE FUNKCIJE RND SOFTVERSKOG SISTEMA

RND (Radio Network Diagnostic) sistem omogućava efikasno prikupljanje i prenos podataka sa RTU (Remote Terminal Unit) uređaja do SCADA servera. Kada se na RTU desi određeni događaj, kao što je promena merenja ili alarm, sistem automatski prenosi ove informacije u realnom vremenu. Ova funkcionalnost osigurava da SCADA server odmah dobija najnovije podatke, što omogućava brzu reakciju na promene u sistemu i povećava efikasnost upravljanja i nadzora.

Vremenska odrednica je ključna za tačnost podataka. RND sistem koristi DPN3 protokol za sinhronizaciju vremena između RTU uređaja i SCADA servera. Ova sinhronizacija obezbeđuje da svi podaci koji se prenose imaju tačno vreme nastanka, čime se osigurava konzistentnost i preciznost informacija. Ovo je posebno važno za analizu podataka i donošenje odluka u realnom vremenu. Pored prenosa podataka po događaju, RND sistem periodično vrši prozivku svih krajnjih stanica u mreži. Ova prozivka služi za proveru da li su sve stanice u sistemu dostupne i u stanju da komuniciraju sa SCADA serverom. Ovaj proces omogućava rano otkrivanje potencijalnih problema u komunikaciji i pomaže u održavanju visoke pouzdanosti sistema.

Radio-uređaji u RND sistemu podržavaju store and forward funkcionalnost, što znači da mogu primiti poruke od drugih radio-uređaja i prosleđivati ih dalje. Ova funkcija je posebno korisna u situacijama gde je potrebno proširiti domet komunikacije ili obezbediti redundantnost. Na primer, ako direktna komunikacija između dva uređaja nije moguća zbog fizičkih prepreka ili velikog rastojanja, radio-uređaj može primiti poruku i proslediti je do odredišta kroz niz drugih radio-uređaja. Ovako se osigurava da sve poruke stignu do SCADA servera, čak i u slučaju prekida na nekim delovima mreže.

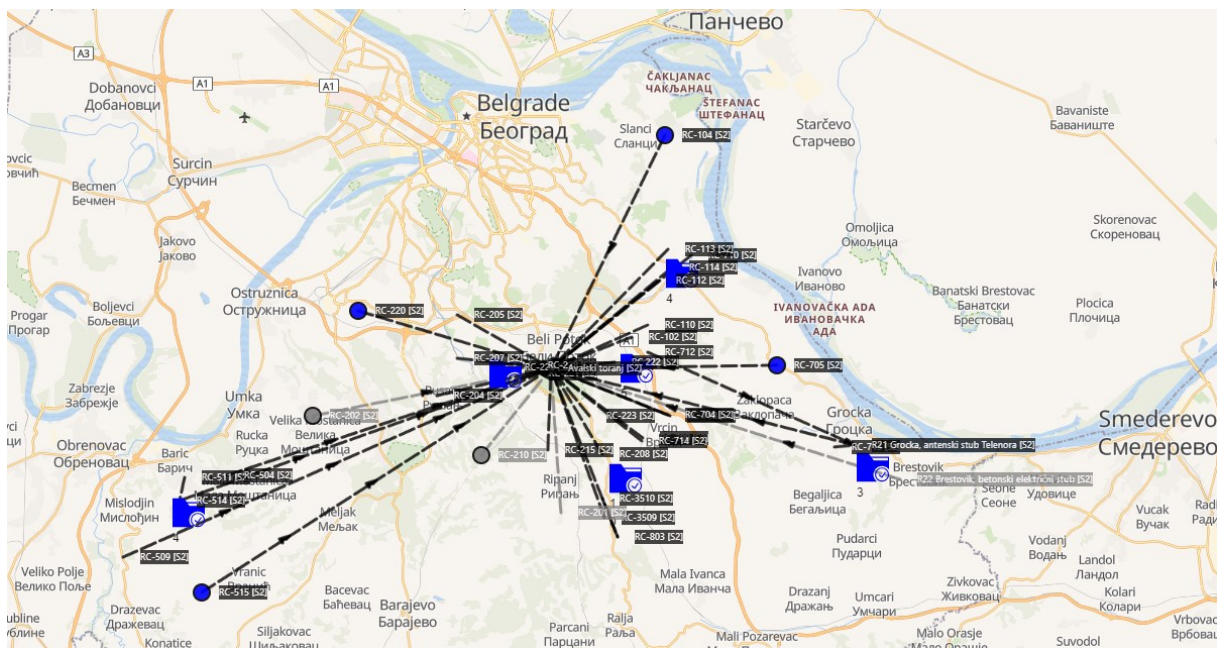
Učestanost slanja dijagnostičkih parametara je konfigurabilna, što znači da se može prilagoditi potrebama sistema i korisnika. Operateri mogu podesiti učestanost na osnovu specifičnih zahteva, kao što su intenzivnije praćenje tokom kritičnih perioda ili manje često slanje podataka tokom normalnog rada. Ova fleksibilnost omogućava optimizaciju resursa i bolje upravljanje mrežom, jer se parametri mogu prilagoditi prema trenutnim uslovima i potrebama.

## 5.1 Arhiviranje podataka

Softver mora koristiti bazu podataka koja je optimizovana za rad sa Time Series podacima, odnosno podacima sa vremenskom odrednicom. Ova vrsta podataka je ključna za sistem koji se bavi merenjem i praćenjem promena u realnom vremenu. Baza podataka mora biti u stanju da efikasno obrađuje i čuva velike količine podataka, omogućavajući brz pristup i analizu. Ovo je posebno važno za SCADA sisteme koji zahtevaju visoku performansu i pouzdanost.

RND sistem pruža prostorni prikaz radio-uređaja i radio-linkova u mreži, koristeći koordinate za tačnu lokaciju svakog uređaja. Ovaj prikaz omogućava korisnicima da vizualizuju mrežu i prate njenu konfiguraciju i status u realnom vremenu. Pored toga, sistem mora prikazivati poslednje prikupljene parametre za svaki radio-uređaj i link, što omogućava brzu dijagnostiku i reagovanje na probleme.

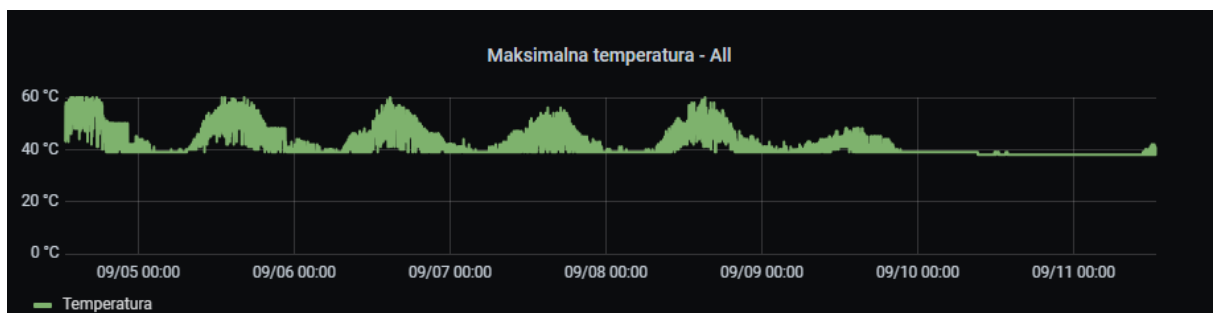
Sistem omogućava grafički prikaz promena parametara radio-uređaja i radio-linkova tokom vremena. Pored grafičkog prikaza, sistem pruža i tabelarni prikaz dijagnostičkih parametara, uključujući minimalne, maksimalne i srednje vrednosti za odabrani period.



Slika 3 – Prostorni prikaz radio-uređaja i radio-linkova u mreži

### 5.1.1. Definisane granice parametara i promena boje prikaza

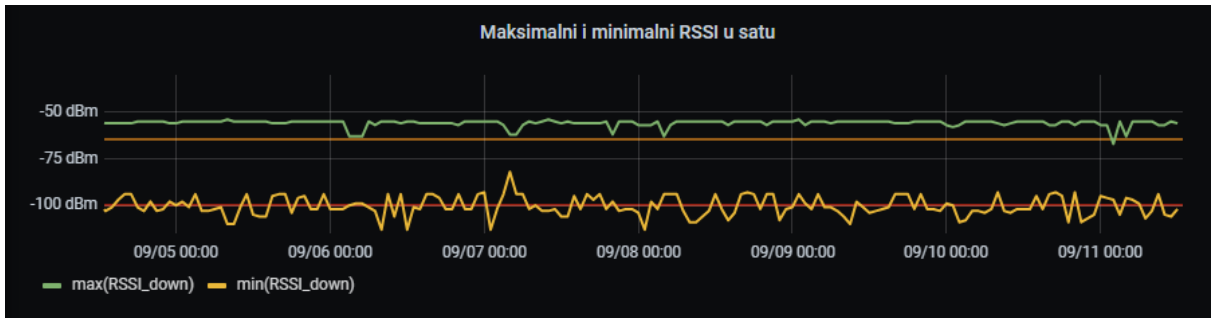
RND sistem mora omogućiti korisnicima da definišu granice za parametre, kao što su minimalne i maksimalne vrednosti, i da prikažu ove parametre u različitim bojama u zavisnosti od njihove vrednosti.



Slika 4 – Prikaz parametara radio uređaja

## 5.2 Automatsko ažuriranje podataka

Sistem obezbeđuje automatsko ažuriranje podataka u realnom vremenu, sa konfigurabilnom učestanošću. Korisnici mogu podesiti frekvenciju ažuriranja na osnovu svojih potreba, kao što su svakih 15 sekundi, 1 minut, 15 minuta itd. Ova funkcija osigurava da su prikazani podaci uvek ažurni i tačni.



Slika 5 – Prikaz maksimalne i minimalne vrednosti parametra radio uređaja

## 5.3 Izveštaji

RND sistem omogućava automatsko kreiranje izveštaja o stanju i performansama radio mreže. Korisnici mogu podesiti automatsko generisanje izveštaja u određenim intervalima, kao što su dnevni, nedeljni, mesečni ili godišnji izveštaji. Ovi izveštaji pružaju detaljne informacije o radu sistema i pomažu u analizi performansi i donošenju odluka.

RND ID	Naziv Radio	Adresa Radio	Tip Radio	Org. sistema	Opis/oznaka	Datum poslednje korekcije	Vreme poslednje korekcije	Vreme poslednje od poslednje poruke	Vreme prethodne poslednje poruke	Iskusan broj poruka od poslednje poruke	Digresiv na poruku od poslednjeg Radio/Post. sta	Prekidanje na poruku od strane Repara	RSSI Down (dBm) Min	RSSI Down (dBm) Max	Loss Down (dBm) Min	Loss Down (dBm) Max	Temperatura (°C) Min	Temperatura (°C) Max	Napon (V) Min	Napon (V) Max	Up Link Naziv	Up Link ID
100	100	100	100	100	100	24/07/2024	17:59:55	0s	18:00:00	18000	0	0	-74	-72	100	107	30	30	12.500	13.481	100	100
101	21.Tarista-BC01					24/07/2024	17:58:19	11m.42s		1	182	182	0	0	0	0	44	44	13.206	13.773	100	100
102	21.Tarista-BC04					24/07/2024	14:19:23	2h.45m.38s		4	4	4	0	0	0	0	50	50	13.506	13.664	100	100
103	21.Tarista-BC05					24/07/2024	14:19:23	2h.45m.38s		4	4	4	0	0	0	0	48	48	13.333	13.544	100	100
104	21.Tarista-BC04					24/07/2024	17:46:30	13m.31s		13	86	86	0	0	0	0	46	46	13.296	13.568	100	100
105	21.Tarista-BC04					24/07/2024	17:52:41	7m.20s		7	174	174	0	0	0	0	45	45	13.370	13.550	100	100
106	21.Tarista-BC05					24/07/2024	14:30:50	1h.16m.16s.14s		240	5	5	0	0	0	0	57	57	11.811	11.811	100	100
107	21.Tarista-BC05					24/07/2024	17:19:15	41m.45s		41	36	36	0	0	0	0	51	51	11.974	12.001	100	100
108	101.Tarista-BC05					24/07/2024	17:35:17	24m.48s		24	29	29	0	0	0	0	45	45	11.856	12.009	100	100
109	111.Tarista-BC05					24/07/2024	17:52:19	7m.52s		7	113	113	0	0	0	0	45	45	13.211	13.685	100	100
110	121.Tarista-BC05					24/07/2024	17:47:12	12m.86s		12	28	28	0	0	0	0	40	40	13.376	13.511	100	100
111	131.Tarista-BC05					24/07/2024	18:44:54	0s		0	0	0	0	0	0	0	48	48	13.147	13.741	100	100

Slika 6– Primer prikaza RND izveštaja

## 6. ZAKLJUČAK

U sistemima koji rade u realnom vremenu i zahtevaju visoku raspoloživost i pouzdanost, kao što su sistemi daljinskog nadzora i upravljanja elektroenergetskim sistemom, proces modernizacije mora da bude kontinualan i postepen. Novi sistemi moraju se uvoditi na način koji omogućava da se servisi, koje ovi sistemi obezbeđuju, ne prekidaju. Telekomunikacioni sistemi Elektrodistibucije Srbije na distributivnom području Beograda su raznoliki, od analognih do digitalnih, od uskopojasnih do sistema velikih brzina i kapaciteta prenosa.

Opređenja za tehničko-tehnološku koncepciju izgradnje savremenih telekomunikacionih sistema u Elektrodistibuciji Srbije su nedvosmislena u sledećim aspektima:

- Postepena zamena zastarelih analognih sistema i tehnologija, kroz digitalizaciju servisa i nastavak izgradnje infrastrukture širokopojasnih mreža, tj. sistema prenosa, o bilo kom fizičkom medijumu se radilo;

- Postepena integracija većeg broja heterogenih telekomunikacionih servisa u jedinstvenu multiservisnu mrežu zasnovanu na IP tehnologiji;
- Primena koncepta IP VPN na sopstvenoj infrastrukturi komutacije i prenosa u cilju realizacije zahtevanog nivoa kvaliteta servisa, međusobne izolacije pojedinih servisa i poboljšanja bezbednosti mreže i servisa.

## LITERATURA

- [1] Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", 2012, „Projekat izvedenog objekta - Ugradnja uređaja za radio daljinsko upravljanje i nadzor rasklopnom opremom u srednjenaponskoj 10 kv mreži Elektrodistribucije Beograd "d.o.o., 17, 29
- [2] Institut Mihajlo Pupin, 2010, „Studija razvoja telekomunikacionog sistema privrednog društva za distribuciju električne energije Elektrodistribucije Srbije“,58
- [3] Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla", 2010, „Radio-sistem za daljinski nadzor i upravljanje srednjenaponskom elektrodistributivnom mrežom (u frekvencijskom opsegu 430-470 MHz)“, 39
- [4] Elektrodistribucija Srbije, 2020, „Nadgradnja sistema daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom na teritoriji Distributivnog područja Beograd“.

**APPLICATIONS FOR THE DIAGNOSIS AND MONITORING OF RADIO SYSTEMS  
FOR THE MANAGEMENT OF MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS  
IN THE TERRITORY OF BELGRADE**

**MILIJA MARINKOVIC \*  
TAMARA TOMIC  
PREDGRAG SEJAT  
SANJA JOVANOVIC**

**ELEKTRODISTRIBUCIJA SRBIJE D.O.O.  
BELGRADE  
SERBIA**

*Abstract* - Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Belgrade, within its system covering the entire consumption area of the Republic of Serbia, operates multiple remote monitoring and control systems for medium-voltage distribution networks based on digital packet radio devices PRD (Packet Data Radio), using the DNP3 protocol.

The Remote Monitoring and Control System for the medium-voltage distribution network relies on narrowband digital radio communications in the UHF range, enabling integration of various switchgear and intelligent electronic devices.

The Remote Monitoring and Control System based on digital packet radio devices PDR transmit measurements, statuses, and alarms event-driven with a time stamp associated with the Remote Terminal Unit (RTU), synchronized with the SCADA server via the DNP3 protocol. Each radio device supports store and forward functionality, allowing message retransmission from other radio devices.

In addition to data transmission for remote monitoring and management of the medium voltage distribution network, radio devices feature diagnostic capabilities for monitoring their parameters and communication links.

The software application RND (Radio Network Diagnostic) operates on the Linux OS on a standard server hardware platform, utilizing an appropriate database for data archiving, designed for efficient handling of Time Series data.

The user interface for data visualization and report generation is web-based, enabling access for authorized personnel without the need for dedicated software installation.

*Keywords* - System of remote monitoring and management, Medium-voltage distribution network, SCADA, PDR, RTU, RND



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.398K](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.398K)

D2 12

**ПРИМЕНА ВРЕМЕНСКЕ СИНХРОНИЗАЦИЈЕ IEEE 1588  
ПРИ КОРИШЋЕЊУ СТАНДАРДА IEC 61850 У ТЕЛЕЗАШТИТНИМ  
УРЕЂАЈИМА**

**АНКА КАБОВИЋ\*, МИЛЕНКО КАБОВИЋ, ВЛАДИМИР ЧЕЛЕБИЋ,  
ИВА САЛОМ  
ИНСТИТУТ “МИХАЈЛО ПУПИН”  
СРЂАН МИТРОВИЋ  
ЕМС А.Д.**

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

***Кратак садржај***— Електроенергетски системи користе прецизно одређивање времена за надгледање мреже, за координацију рада и интеграцију различитих делова мреже, као и за заштиту мреже, тј. да би се анализирали настали поремећаји и спречио евентуални распад система. Такође све је већи удео дистрибуираних енергетских извора (DER – *Distributed Energy Resources*), што захтева бољи увид у статус система, као и бржу идентификацију и отклањање грешака. Због поменутих разлога, а и све веће примене стандарда IEC61850 у уређајима, потребна је синхронизација њиховог времена са прецизношћу бољом од 1ms, што омогућава примена протокола IEEE 1588v2 (PTP – *Precision Time Protocol*). У раду су приказане могућности реализације PTP протокола у оквиру CPU модула телешаштитног уређаја TZ-600 прилагођеног за рад по стандарду IEC 61850. Такође су приказана и тестирања рада протокола у оквиру једне реализације.

***Кључне речи***— PTP протокол, телешаштита, CPU модул, Zynq 7000, процесорски систем, синхронизација времена, системско време

---

\* Волгина 15, Београд, [anka.kabovic@pupin.rs](mailto:anka.kabovic@pupin.rs)

## 1 УВОД

Прецизно одређивање времена догађаја у електроенергетском систему се користи у сврху надгледања мреже, координације рада и заштите, да би се њиховом анализом спречили већи поремећаји и испад система. Због важности поменутог, а и све веће примене стандарда IEC 61850 у уређајима, увећава се број апликација које захтевају прецизну синхронизацију времена коришћењем протокола IEEE 1588v2 (*PTP – Precision Time Protocol*) [1], који омогућава синхронизацију времена са повећаном тачношћу бољом од 1 ms, коришћењем софтверског и хардверског одређивања временске ознаке IEEE 1588v2 протокола.

Различите примене захтевају различиту прецизност синхронизације, тако нпр. преношење одбирака измерених вредности напона и струје у оквиру процесне магистрале у подстаници која ради по стандарду IEC 61850, захтева прецизност временске синхронизације испод 1  $\mu$ s. Затим диференцијална заштита линије и трансформатора захтева прецизност временске синхронизације реда величине од 10 до 20  $\mu$ s. Прецизност синхронизације времена од око 1 ms се захтева за SCADA системе и системе за дигитално праћење грешака у систему. Традиционално се прецизна синхронизација времена у електропривреди спроводила коришћењем за ту потребу намењеним кабловским системима који су преносили PPS временски сигнал или IRIG-B временски код.

У новије време се као много простије решење за синхронизацију времена користи IEEE 1588v2 протокол, који може да обезбеди синхронизацију времена са тачношћу бољом од 1  $\mu$ s. Постоје одређене бојазни везане за деградацију тачности синхронизације времена услед прекида комуникације са сателитима, као и опасности везане за могућност сајбер напада. Поред тога, интеграција РТР протокола у комуникационе системе доноси додатни мрежни саобраћај и чини сложенијим интеракције у саобраћају. Ипак, једноставнија реализација је условила све већу популарност ових система за синхронизацију времена, тако да постоји тренд раста у коришћењу стандарда IEC 61850, као и IEEE 1588 у будућим електроенергетским телекомуникационим мрежама.

Иако коришћење старијег NTP (*Network Time Protocol*) [2] протокола задовољава тачност синхронизације времена од 1 ms, што је довољно за сагледавање догађаја везаних за команде телезаштите, могућност коришћења РТР централног такта унутар трафостанице, као и могућност преношења сигнала који захтевају већу прецизност синхронизације времена, условили су коришћење и РТР синхронизације и у телезаштитним уређајима.

## 2 КАРАКТЕРИСТИКЕ РТР ПРОТОКОЛА

### 2.1 Тачности протокола за синхронизацију времена

Синхронизација времена је неопходна у трафостаницама да би се омогућило повезивање времена између различитих уређаја. У IEC 61850-5 [3] дефинисано је 6 синхронизационих класа приказаних у табели I.

**Табела I** – Синхронизационе класе дефинисане у IEC 61850-5

КЛАСА ВРЕМЕНСКЕ СИНХРОНИЗАЦИЈЕ	СИНХРОНИЗАЦИОНА ГРЕШКА
TL	>10ms
T0	10ms
T1	1ms
T2	100μs
T3	25μs
T4	4μs
T5	1μs

## 2.2 Начини реализације РТР протокола

РТР протокол је дефинисан по стандарду IEEE 1588 и због могућности постизања високе тачности постао је стандардни проткол за примену у индустријским мерним и контролним системима, као и у телекомуникацијама. Овај стандард дефинише *master-slave* архитектуру сатова (тактова) у мрежи, који међусобно размењују поруке које се користе за њихову синхронизацију. РТР протокол може бити реализован софтверски или уз помоћ хардвера, а разлика између ових реализација је у томе како се генеришу временски маркери: софтверски или хардверски [1].

Софтверска реализација има мању променљиву прецизност, која зависи од рада софтвера, као и конфигурације мреже и њеног пропусног опсега. За њу може да се користи тзв. софтвер „отвореног кода“ (*open source*) – РТРd. Да би се постигла задовољавајућа тачност неопходан је сложени систем за подешавање сатова. У оквиру *Linux* оперативног система, може се постићи тачност боља од 10 us [4].

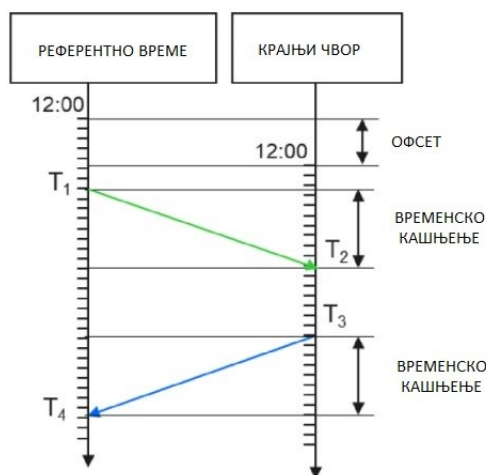
Хардверска реализација РТР протокола код које се користе нижи слојеви OSI модела за генерисање временских маркера може побољшати тачност синхронизације на бољу вредност од 20 ns. За генерисање временских маркера могу се користити РНУ интегрисана кола или програмабилна логика (*Field Programmable Gate Arrays – FPGA*) сложених процесорских система као што је *Xilinx Zynq 7000 SoC*. У литератури [4] помињу се различити начини реализације хардверског РТР протокола.

## 2.3 Принцип рада РТР протокола

Код РТР протокола формира се временска хијерархија коришћењем *master-slave* оквира тако да само један такт може да се означи као *grandmaster* (који је синхронизован са примарном референцом времена, као што је GNSS – *Global Navigation Satellite System*) за синхронизацију свих *slave* тактова у мрежи. За разлику од NTP протокола, РТР протокол се заснива на међународном атомском времену (*Temps Atomiq International – TAI*) које решава проблеме дисконтинуалне временске скале (постојање *leap second*) код UTC.

Основни принцип рада синхронизације времена код мрежа са комутацијом пакета, укључујући NTP и РТР, може се генерално представити као на слици 1.





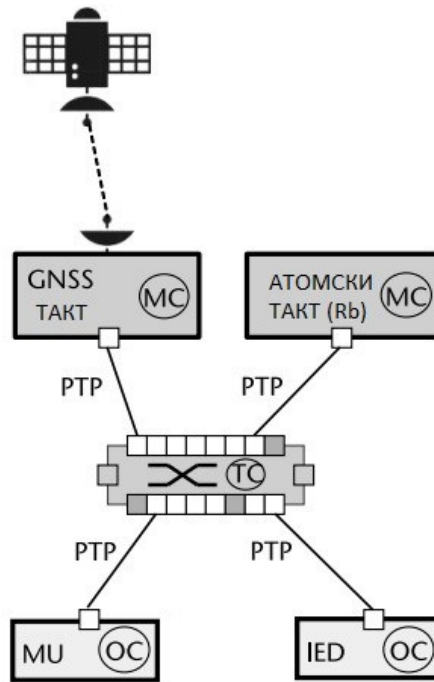
Слика 1 – Основни начин рада синхронизације времена у мрежама са комутацијом пакета [5]

Као што се види са слике 1, временске ознаке (*timestamp*) се повремено међусобно размењују између *master* и *slave* уређаја (сата), и на основу њих се одређује и коригује временска разлика између сатова и одређује кашњење у мрежи између поменутих уређаја. Да би се то постигло са задовољавајућом тачношћу, потребно је да кашњење пакета података у мрежи буде једнако у оба смера. То се постиже коришћењем транспарентних сатова у систему синхронизације времена, тј. коришћењем посебних Етернет *switch*-ева. Они означавају РТР пакете на свом излазу и улазу. Време боравка пакета унутар *switch*-а се прорачунава, и додаје у поље одговарајућег пакета, или се шаље преко *follow-up* поруке.

Стандард ИЕС 61850-9-3 [6] описује неколико типова сатова који имају различите улоге у систему за синхронизацију времена приказаних на слици 2 [7]:

- Транспарентни сат (*transparent clock* – ТС) представљен је као Етернет *switch* са примењеним РТР протоколом. Као што је већ речено он временске ознаке РТР пакета поставља на улазу и излазу пакета из *switch*-а.
- Гранични сат (*boundary clock* - ВС) је сат који има портове у два или више домена. Гранични сат се синхронизује на *grandmaster* сат у једном домену, док у осталим доменима он игра улогу *grandmaster* сата. Користи се за синхронизацију две или више одвојених мрежних инфраструктура без потребе премошћавања пакета података између мрежа.
- *Slave* сат има портове који су увек у *slave* стању и који ће се увек синхронизовати на *grandmaster* сат мреже. У случају да *grandmaster* сат није присутан остаће и даље у *slave* стању.
- *Grandmaster* сат представља најпрецизнији сат у мрежи, који се увек синхронизује на примарну референцу времена.
- *Grandmaster capable* сатови, представљају сатове који су опремљени са прецизним интерним осцилаторима и који могу да обављају улогу *grandmaster* сата (у случају отказа примарног *grandmaster* сата) или по потреби да имају функцију *slave* сата.

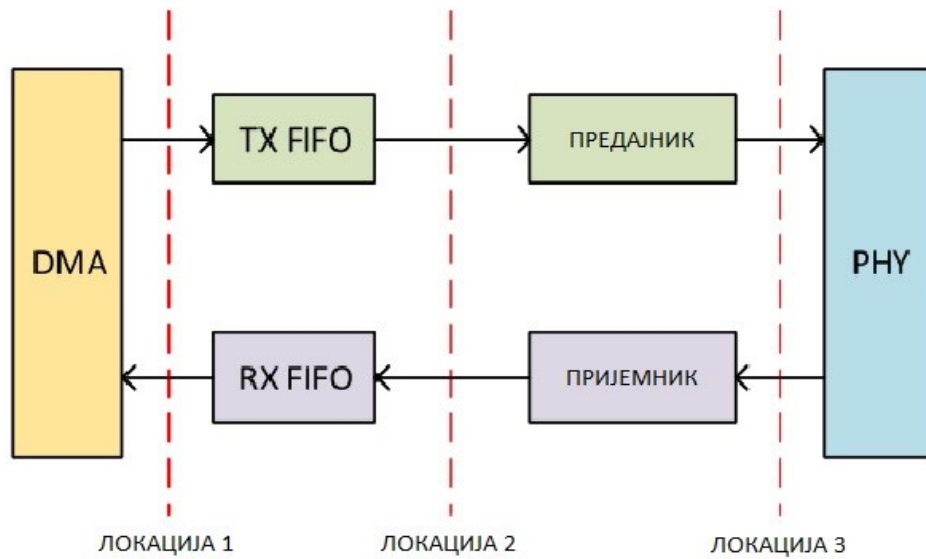
Спојне јединице (*merging unit*) и интелигентни електронски уређаји (*Intelligent Electronic Device* – ИЕД) имају „обичне“ сатове (*ordinary clock* – ОС) и они су синхронизовани преко транспарентног сата (ТС) са *grandmaster* сатом (слика 2). Овај тип сата поседује само један порт преко којег се размењују поруке РТР протокола.



Слика 2 – Компоненте система за синхронизацију времена по PTP протоколу [7]

#### 2.4 Архитектура система са прецизном временском синхронизацијом помоћу PTP протокола

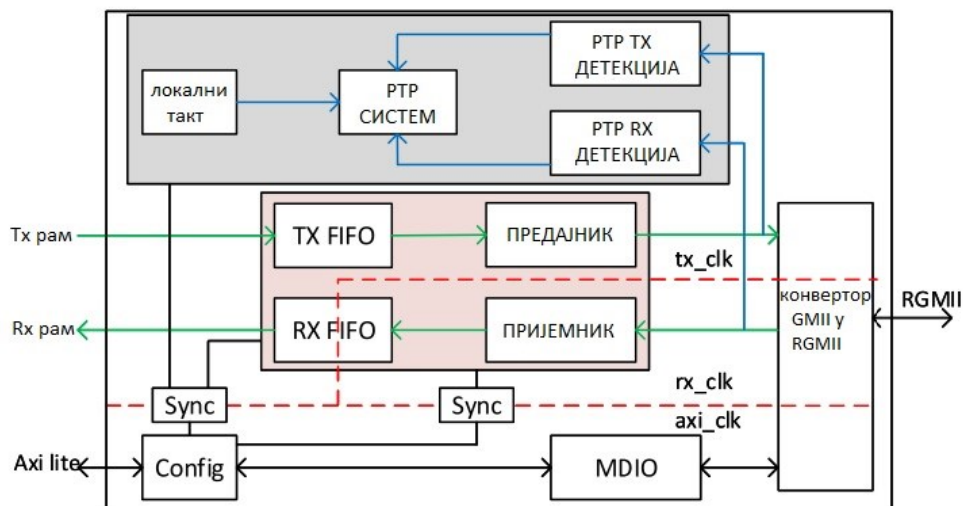
Генерисање прецизних временских маркера је кључ система за временску синхронизацију са PTP протоколом. Они се могу генерисати у сваком слоју OSI модела, али пошто су прва два слоја овог модела (физички и слој података) реализовани хардверски, то значи да ће тако бити генерисани и временски маркери. Остали виши слојеви OSI модела су реализовани софтверски, што аутоматски подразумева и софтверско генерисање временских маркера. Што је виши слој у коме се генеришу временски маркери, прецизност је све мања. За прецизније системе за синхронизацију времена, временски маркери се морају генерисати у физичком слоју или слоју везе података OSI модела. Физички слој је код Етернета имплементиран у РНУ интегрисаном колу, тако да генерисање временских маркера у физичком слоју захтева РНУ који има имплементиран PTP протокол. Овај случај је тестиран на CPU модулу TZ 600 уређаја који је имао прикључену надплочицу са РНУ интегрисаним колом DP83640 [8], [9], а који је приказан у одељку 3 овог рада. Други слој OSI модела има основну функцију контроле приступа медијима (*Media Access Control* – MAC) која се реализује дигитално, па стога може бити релативно једноставно имплементирана у програмабилној логици. Због тога се намеће и опција генерисања временских маркера у оквиру MAC подслоја. Путања података у оквиру MAC подслоја је приказана на слици 3.



Слика 3 – Путања података у оквиру MAC подслоја [4]

Такође, у литератури [4] објашњено је да је најбоља локација за генерисање и пријем временских маркера између PHY и предајника, односно пријемника.

На слици 4 приказан је реализовани систем за прецизну синхронизацију времена у програмабилној логици процесора у виду IP модула [4]. Подразумевана брзина је 1000 Mbps, али је компатибилан и за преношење Етернет порука брзинама 100/10 Mbps. Основни делови овог система су: MAC, део за синхронизацију времена помоћу RTP протокола, интерфејс према PHY и део за конфигурацију PHY.



Слика 4 – Структурни блок дијаграм IP модула за прецизну синхронизацију времена

### 3 ТЕСТИРАЊЕ РАДА RTP ПРОТОКОЛА НА ЦЕНТРАЛНОМ МОДУЛУ ТЕЛЕЗАШТИТНОГ УРЕЂАЈА TZ 600

Пре описа тестирања RTP протокола на централном модулу телезаштитног уређаја TZ-600, укратко ће бити представљена архитектура нове верзије овог модула.

#### 3.1 Архитектура централног процесорског модула (CPU) телезаштитног уређаја TZ-600

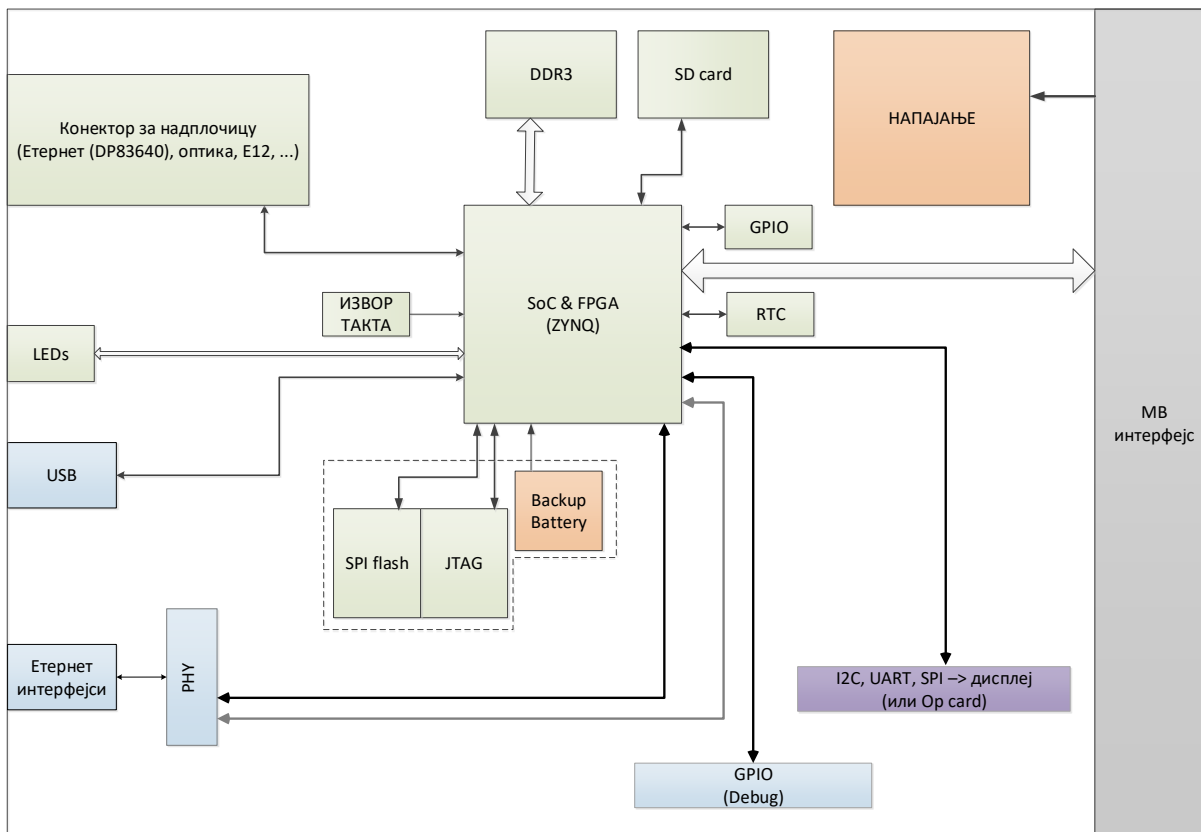
Централни процесорски модул (CPU) телезаштитног уређаја TZ-600, који треба да обезбеди и рад по стандарду IEC 61850, има сложену процесорску архитектуру. Она је заснована на *Xilinx Zynq 7000 SoC (System on Chip)* компоненти, која се састоји од програмабилне логике (PL) и процесорског система (PS) са дуалним ARM Cortex-A9 микропроцесором. На једном језгру Cortex-A9 реализују се временски мање критични сервиси у оквиру *Linux* оперативног система, док се на другом језгру Cortex-A9 реализују *real-time* сервиси под *FreeRTOS* оперативним системом. У програмабилној логици се врши обрада улазних и излазних каналских и линијских сигнала. Флексибилна архитектура омогућава избор жичаног или оптичког Етернет интерфејса. Блок дијаграм архитектуре централне јединице дат је на слици 5, док је расподела функција у процесорском систему приказана на слици 6.

Као што се са слике 6 може видети процесорско језгро означено са језгро 1 је предвиђено да ради под *Linux* оперативним системом и обавља следеће функције:

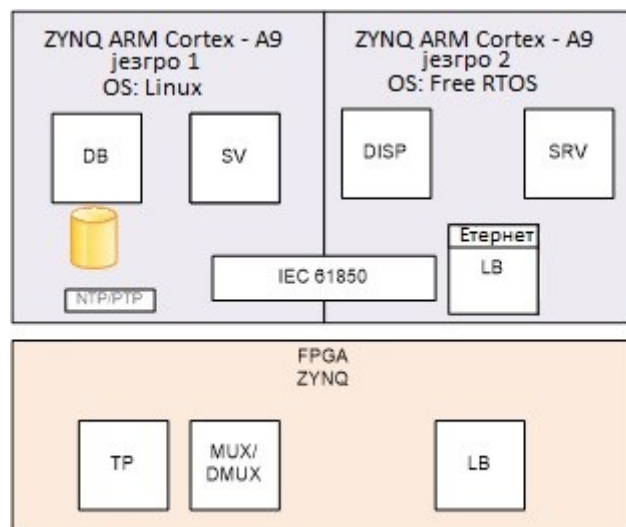
- смештање свих релевантних података у базу и приступ бази,
- надгледање уређаја преко Етернет интерфејса – повезивање на централизоване систем надгледања и локално надгледање,
- конфигурација уређаја преко Етернет интерфејса у складу са стандардом IEC 61850
- синхронизација тачног времена помоћу NTP или RTP протокола.

Процесорско језгро означено са језгро 2 на слици 6, предвиђено је да ради под *FreeRTOS* оперативним системом и обавља следеће функције:

- треба да омогући у целости и заједно са програмибилном логиком реализације нових *real-time* сервиса
- реализација говорног сервисног канала
- имплементација комуникације по IEC 61850 (размена GOOSE порука)
- подршка за рад са графичким, *touch screen* дисплејом



Слика 5 – Архитектура централне јединице унапређеног телезаштитног уређаја



Слика 6 – Распоред реализације функционалних блокова унутар централне јединице

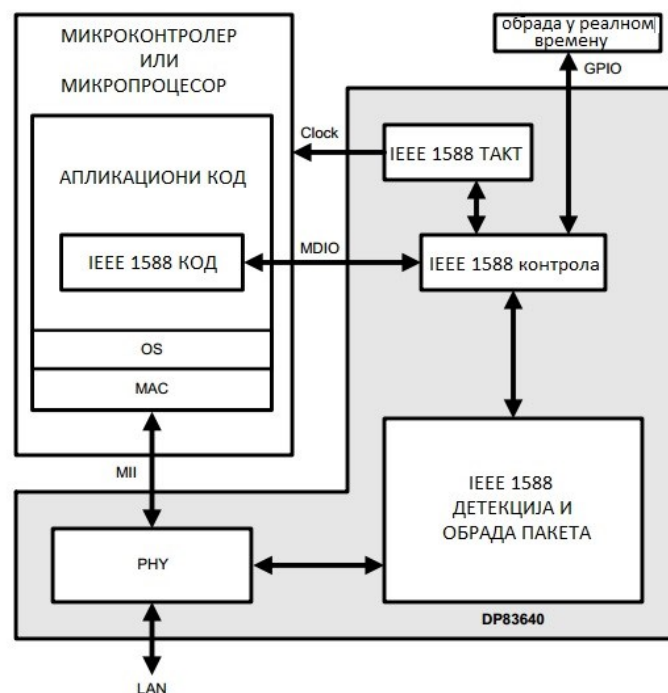
### 3.2 Опис хардверских елемената коришћених за тестирање

Тестирање рада RTP протокола на централном модулу уређаја TZ 600 вршено је коришћењем надплочице специјално пројектоване за поменути модул. На надплочици се налази PHY компонента DP83640 [8] која је преко МП интерфејса повезана са Етернет интерфејсом *eth1 Xilinx Zynq-7000* процесора, а преко диференцијалних предајних и пријемних линија повезана је са SFP модулом. PHY компонента DP83640 има могућност

хардверског генерисања временских маркера за поруке које се размењују у току рада RTP протокола.

DP83640 PHY компонента има интегрисану подршку за рад IEEE 1588v1 и v2 протокола. Поред тога, она подржава пренос пакета по протоколима UDP/IPv4, UDP/IPv6 и Етернет пакета (слој 2 OSI модела), омогућава прецизну синхронизацију времена са главним мастер сатом, поседује могућност генерисања тригер сигнала или тактова на пиновима опште намене, као и детектовање спољних догађаја са временским маркирањем. Интерфејс према MAC подслоју може бити RМII v1.2 или МII типа, и захтева спољашњи референтни такт фреквенције 25 MHz. Такође, компонента подржава рад са жичаним или оптичким интерфејсом у дуплексном или полудуплексном моду са брзинама 10/100 Mbps.

У конкретном случају рада на надплочици за CPU модул телезаштитног уређаја, DP83640 PHY компонента је подешен за рад са оптичким интерфејсом брзином од 100 Mbps, у дуплексном моду рада. На слици 7 приказан је блок дијаграм поменуте компоненте са повезивањем на процесор и Етернет интерфејс. Са слике 7 се може видети да се DP83640 компонента састоји од 4 основна блока: IEEE 1588 сат, контролер сата и догађаја на пиновима опште намене (GPIO), блок за детектовање и обраду IEEE 1588 пакета и PHY блок.



Слика 7 – Блок дијаграм DP83640 PHY модула са повезивањем интерфејса [8]

### 3.3 Интеграција рада модула DP83640 са процесорским системом *Xilinx Zynq-7000*

За повезивање процесорског система *Xilinx Zynq-7000* са осталим деловима CPU модула уређаја TZ-600, као и за креирање тест апликација коришћена су *Xilinx* софтверско развојна окружења *Vivado Design Suite* [10] и *Vitis Software Platform* [11], док су сегменти оперативног система *Linux* развијани у *Petalinux* окружењу. У хардверском *Vivado Design Suite* пројекту DP83640 PHY модул је повезан МII интерфејсом са Етернет процесорским интерфејсом – eth1, као и и MDIO интерфејсом за микропроцесор преко кога се врши конфигурација модула.

У *Petalinux* окружењу у конфигурационом фајлу су извршена подешавања Етернет интерфејса процесора, *eth1*, као и активирање драјвера за DP83640 PHY модул. На слици 8 се може уочити исправно подигнут драјвер за DP83640 модул у оквиру *Ubuntu Linux* оперативног система.

```
macb: macb_mii_init: Prosao bez greske registraciju mdiobus
libphy: PHY sw.1:00 not found
macb: macb_sw_chk: posle provere sw_is_switch-rezultat je 0
macb: Pronasao phy-handle
macb: macb_mii_probe: Pronasao phy_node, Ispred konektovanja sa PHY
of_phy_connect: Ispred phy_connect_direct
libphy: phy_attach_direct: Pronasao driverski modul
libphy: phy_attach_direct: Setovao stanje phy na PHY_READY, interface=3
dp83640: dp83640 driver: Omogucen broadcast
libphy: phy_init_hw: Prosao config_init ret=0
libphy: phy_attach_direct: Prosao bez greske phy_init_hw
libphy: phy_attach_direct: Povratna vrednost phy_resume=0
macb: Uspesno konektovanja sa PHY
macb: macb_mii_init: Prosao bez greske macb_mii_probe
macb: macb_probe greska iz macb_mii_init err=0
macb: macb_probe greska iz macb_sw_chk err=0
NatSemi DP83640 e000c000.ethernet-ffffffff:01: attached PHY driver [NatSemi DP83640] (mii_bus:phy_addr=e000c000.ethernet-ffffffff:01, irq=POLL)
macb e000c000.ethernet eth1: Cadence GEM rev 0x00020118 at 0xe000c000 irq 29 (6e:4f:bb:ad:a9:c8)
e1000e: Intel(R) PRO/1000 Network Driver - 3.2.6-k
e1000e: Copyright(c) 1999 - 2015 Intel Corporation.
ehci_hcd: USB 2.0 'Enhanced' Host Controller (EHCI) Driver
ehci-pci: EHCI PCI platform driver
usbcore: registered new interface driver usb-storage
chipidea-usb2 e0002000.usb: e0002000.usb supply vbus not found, using dummy regulator
ULPI transceiver vendor/product ID 0x0424/0x0009
```

Слика 8 – *Ubuntu Linux* оперативни систем са драјвером за модул DP83640

### 3.4 Тестирање рада RTP протокола

Тестирање имплементираниог RTP протокола спроведено је помоћу тестног уређаја *Albedo* [11], који је повезан оптичким каблом преко SFP интерфејса надплочице са DP83640 модулом. Уређај *Albedo* је конфигурисан као активни IEEE1588 ентитет са следећим параметрима:

- *Clock emulation*: *Master*
- транспортни протокол: *Ethernet*
- *Addressing mode*: *Multicast*
- *Path delay mechanism*: *End-to-end*
- *Domain*: 0
- *Priority1* и *Priority2*: 127.

У конфигурационом фајлу апликације за примену RTP протокола у фајл систему CPU модула подешени су параметри, између осталих:

- *Priority1* и *Priority2*: 127
- *Step\_threshold*: 0.0000008
- *First\_step\_threshold*: 0.0000005
- *Ptp\_dst\_mac*: *Multicast*
- MAC: 01:1b:19:00:00:00
- *Clock\_type*: OC
- *Network\_transport*: L2
- *Delay\_mechanism*: E2E.

На *Albedo* уређају покреће се тест „*Master emulation G.8275.1 PTP master emulation with ITU-T time profile with full timing support*“, а на CPU модулу тест апликација (прилагођена *open source* апликација *PTP4l* софтверског пакета *linuxptp*):

```
sudo ./TestPTP4lOnDP83640.elf -i eth1 -f default.cfg -m &
```

Испис на терминалу након покретања тест апликације (слика 9) приказује резултат теста RTP протокола на CPU модулу са корекцијом фреквенције и времена на RTP хардверском



сату који се налази на DP83640 модулу. *Rms* колона представља средњу квадратну вредност вредности офсета сатова *slave* – на DP83640 модулу, и *grandmaster* сата – на *Albedo* уређају. Сматра се да је синхронизација постигнута уколико је ова вредност реда величине 100 ns.

```

vitis : sudo — Konsole
File Edit View Bookmarks Settings Help

buntu@arm:~/TestPTP$ sudo ./TestPTP41OnDP83640.elf -i eth1 -f default.cfg -m &
[1] 3191
buntu@arm:~/TestPTP$ Hello World
avrslc config_create
rosao pozive print funkcija
estiranje tipa sata
estPTP41OnDP83640.elf[569.099]: selected /dev/ptp1 as PTP clock
lockid=-37
radio clock_gettime
radio clock_adjtime
lock_create posle phc_open
estPTP41OnDP83640.elf[569.190]: driver rejected most general HWTSTAMP filter
estPTP41OnDP83640.elf[569.190]: port 1 (eth1): INITIALIZING to LISTENING on INIT_COMPLETE
estPTP41OnDP83640.elf[569.191]: port 0 (/var/run/ptp4l): INITIALIZING to LISTENING on INIT_COMPLETE
estPTP41OnDP83640.elf[569.191]: port 0 (/var/run/ptp4lro): INITIALIZING to LISTENING on INIT_COMPLETE
lock created err=0
estPTP41OnDP83640.elf[569.266]: port 1 (eth1): new foreign master 00db1e.ffff.0019ce-1
estPTP41OnDP83640.elf[569.524]: selected best master clock 00db1e.ffff.0019ce
estPTP41OnDP83640.elf[569.525]: port 1 (eth1): LISTENING to UNCALIBRATED on RS_SLAVE
estPTP41OnDP83640.elf[570.949]: port 1 (eth1): minimum delay request interval 2^-4
estPTP41OnDP83640.elf[571.256]: port 1 (eth1): UNCALIBRATED to SLAVE on MASTER_CLOCK_SELECTED
estPTP41OnDP83640.elf[572.016]: rms 318 max 638 freq -28003 +/- 16 delay 84 +/- 0
estPTP41OnDP83640.elf[573.126]: rms 5 max 11 freq -27992 +/- 6 delay 85 +/- 1
estPTP41OnDP83640.elf[574.237]: rms 3 max 8 freq -27991 +/- 5 delay 84 +/- 1
estPTP41OnDP83640.elf[575.347]: rms 2 max 4 freq -27994 +/- 4 delay 85 +/- 0
estPTP41OnDP83640.elf[576.466]: rms 2 max 4 freq -27994 +/- 3 delay 84 +/- 0
estPTP41OnDP83640.elf[577.576]: rms 2 max 5 freq -27998 +/- 3 delay 84 +/- 0
estPTP41OnDP83640.elf[578.686]: rms 4 max 6 freq -28000 +/- 5 delay 85 +/- 0
estPTP41OnDP83640.elf[579.792]: rms 3 max 4 freq -27998 +/- 4 delay 84 +/- 1

```

Слика 9 – Покретање рада апликације за синхронизацију времена помоћу PTP протокола на CPU TZ600 модулу

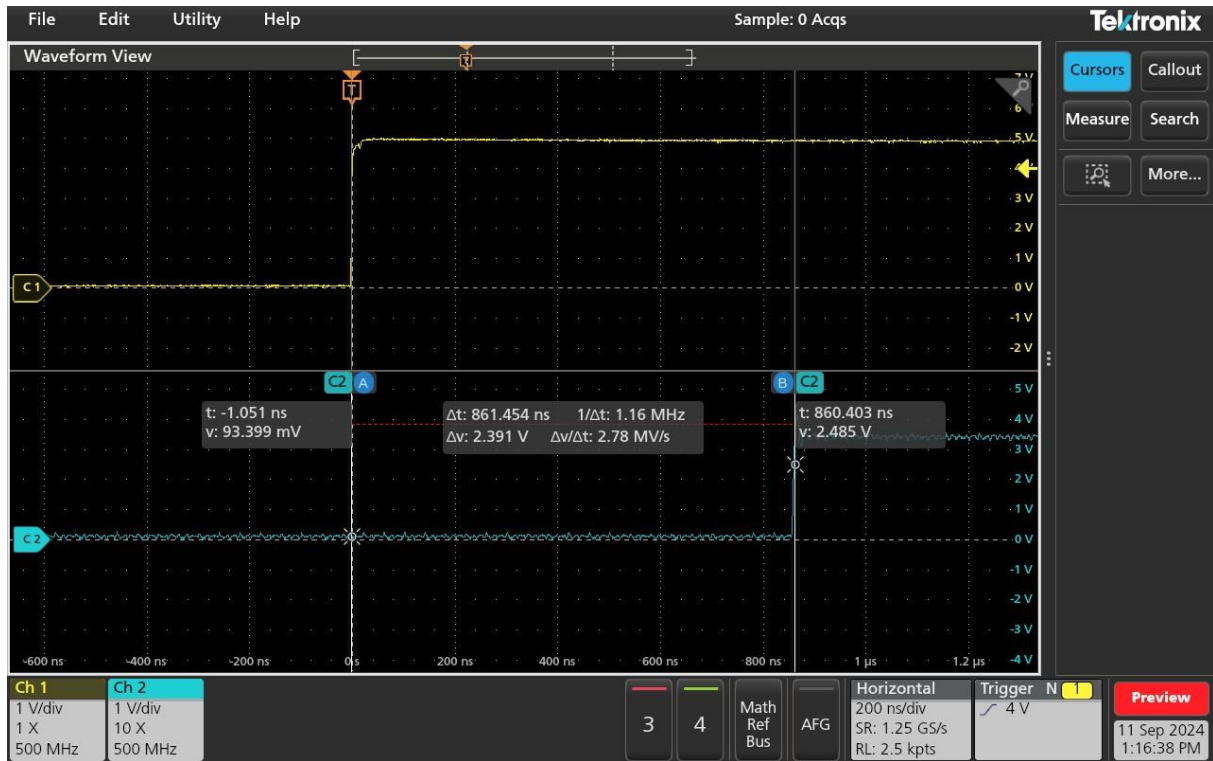
### 3.5 Провера тачности синхронизације системског времена CPU модула

За проверу тачности синхронизације системског времена TZ-600 CPU модула са *grandmaster* сатом на *Albedo* уређају, генерисана је корисничка апликација *GeneratePPSv3.elf* која обухвата покретање тест апликације *TestPTP41OnDP83640.elf* за синхронизацију хардверског *slave* сата са *grandmaster* сатом на *Albedo* уређају, а затим и покретање апликације *TestPHC2SYSOnDP83640.elf* (прилагођена *open source* апликација *PHC2SYS* софтверског пакета *linuxptp*) за синхронизацију системског времена CPU модула са хардверским *slave* сатом. Пошто се оствари успешна синхронизација системског времена и времена хардверског сата, добија се да њихова разлика у секундама износи 37 s, тј. UTC време је за поменути износ мање од TAИ времена. Софтверска петља у којој се процењује вредност офсета системског времена и хардверског сата се не прекида док офсет у секундама не постане једнак 37 s, и офсет у наносекундама не постане мањи од 100 ns. Процењена вредност офсета се исписује на терминалу, а затим се врши још једна провера генерисањем PPS сигнала на пину GPIO9 DP83640 модула. Као што је познато, PPS сигнал се генерише на почетку сваке секунде системског времена, али да би се одредио тренутак генерисања на пину хардверског сата, мора се урачунати офсет у наносекундама између њега и системског времена. Такође се може опционо вршити корекција офсета за вредност кашњења податка са хардверског сата због преноса по серијској MDIO магистрали [13]. Након тога врши се задавање



команде драјверу DP83640 модула за генерисање PPS сигнала. На слици 10 приказана је измерена разлика временских тренутака генерисаног PPS сигнала (канал 2) и PPS сигнала који се прима помоћу *Albedo* уређаја који поседује GNSS пријемник (канал 1).

Са слике 10 се види да је измерена разлика два PPS сигнала, тј. офсет између системског времена и времена на *grandmaster* сату испод 1  $\mu$ s. Генерално се вредности офсета крећу око 1  $\mu$ s.



Слика 10 – Измерене вредности разлике почетка узлазних ивица два PPS сигнала

## ЗАКЉУЧАК

Због једноставности извођења у новије време се уместо традиционалних система за синхронизацију времена, као што је IRIG-B временски код, користе системи синхронизације времена у мрежама са комутацијом пакета. Услед све већег броја апликација у електропривреди које захтевају веома прецизну синхронизацију времена, поред давно присутне NTP синхронизације, која омогућава тачност до 1 ms, све чешће се користи синхронизација времена по стандарду IEEE 1588v2, што се нарочито односи на трафостанице пројектоване по IEC 61850 стандарду. Због тога се и у телезаштитним уређајима морала, поред NTP протокола (који обезбеђује довољну тачност за надгледање рада система телезаштите), омогућити алтернативна примена IEEE 1588v2 протокола. У раду је приказано хардверско-софтверско решење које омогућава тачност реда величине око 1  $\mu$ s. С обзиром да централни модул телезаштитног уређаја омогућава рад са програмибилном логиком, у случају потребе преноса сервиса који захтевају већу тачност, могуће је користити друга хардверска решења за синхронизацију времена помоћу PTP протокола [4] (реализација у програмабилној логици).

## ЗАХВАЛНИЦА

Рад је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] "IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems," in IEEE Std. 1588-2019 (Revision of IEEE Std. 1588-2008), vol., no., pp.1-499, 16 June 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9120376.
- [2] D. L. Mills: "COMPUTER NETWORK TIME SYNCHRONIZATION The Network Time Protocol on Earth and in Space", Second Edition, CRC Press, Boca Raton, London, New York, 2011
- [3] IEC 61850 Communication Networks and Systems for Power Utility Automation Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models, 2003.
- [4] Zhang B., Tao T., Zhu J.: "Design considerations for hardware implementation of nanoseconds time synchronization low-cost system based on precise time protocol", Journal of Instrumentation, 2022.
- [5] Han M.: „IEEE 1588 Time Synchronization and Data Flow Assessment for IEC 61850 based Power Transmission Substations”, The University of Manchester, 31 Aug 2021.
- [6] IEC/IEEE 61850-9-3:2016 Communication Networks and Systems for Power Utility Automation—Part 9-3: Precision Time Protocol Profile for Power Utility Automation, 2016
- [7] Alexander Apostolov: „IEC 61850: Digitizing the Electric Power Grid“, Artech House, 2023.
- [8] DP83640 Precision PHYTER – IEEE 1588 Precision Time Protocol Transceiver, Datasheet, SNOSAY8F, Texas Instruments, September 2007, revised april 2015
- [9] AN-1963 IEEE 1588 Synchronization Over Standard Networks Using DP83640, Application Report, Texas Instruments, SNLA116A-May 2009-Revised April 2013
- [10] <https://www.amd.com/en/products/software/adaptive-socs-and-fpgas/vivado.html>
- [11] <https://www.amd.com/en/products/software/adaptive-socs-and-fpgas/vitis.html>
- [12] xGenius, Zeus Ethernet & IP Testing Guide, User's Manual, UM-XGENIUS-ETH-2020-10, Albedo, Telecom, 2020.
- [13] R. Cochran, C. Marinescu and C. Riesch, "Synchronizing the Linux system time to a PTP hardware clock," *2011 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication*, Munich, Germany, 2011, pp. 87-92, doi: 10.1109/ISPCS.2011.6070158.

**APPLICATION OF THE TIME SYNCHRONIZATION IEEE 1588  
USING IEC 61850 STANDARD IN TELEPROTECTION DEVICES**

**ANKA KABOVIĆ, MILENKO KABOVIĆ, VLADIMIR ČELEBIĆ, IVA SALOM  
INSTITUTE “MIHAJLO PUPIN”**

**SRĐAN MITROVIĆ  
JSC EMS**

**BELGRADE**

**SERBIA**

*Abstract*— Electric power systems use precise timing to monitor the network, to coordinate work and integrate different parts of the network, as well as to protect the network, i.e. in order to analyze the resulting disturbances and prevent the eventual breakdown of the system. There is also an increasing share of distributed energy resources (DER - Distributed Energy Resources), which requires better insight into the status of the system, as well as faster identification and elimination of errors. Due to the mentioned reasons, and the increasing application of the IEC61850 standard in devices, synchronization of their time with a precision better than 1ms is required, which enables the application of the IEEE 1588v2 protocol (PTP - Precision Time Protocol). The paper presents the possibilities of implementing the PTP protocol within the CPU module of the TZ-600 teleprotection device adapted to work according to the IEC 61850 standard. It also presents testing of the protocol within one implementation.

*Key words* — PTP protocol, teleprotection, CPU module, Zynq 7000, processor system, time synchronization, system time

**ПРИМЕНА ВРЕМЕНСКЕ СИНХРОНИЗАЦИЈЕ IEEE 1588  
ПРИ КОРИШЋЕЊУ СТАНДАРДА IEC 61850 У ТЕЛЕЗАШТИТНИМ  
УРЕЂАЈИМА**

**APPLICATION OF THE TIME SYNCHRONIZATION IEEE 1588  
USING IEC 61850 STANDARD IN TELEPROTECTION DEVICES**

**АНКА КАБОВИЋ\*, МИЛЕНКО КАБОВИЋ, ВЛАДИМИР ЧЕЛЕБИЋ,  
ИВА САЛОМ  
ИНСТИТУТ “МИХАЈЛО ПУПИН”**

**СРЂАН МИТРОВИЋ  
ЕМС А.Д.**

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

*Кратак садржај- Електроенергетски системи користе прецизно одређивање времена за надгледање мреже, за координацију рада и интеграцију различитих делова мреже, као и за заштиту мреже, тј. да би се анализирали настали поремећаји и спречио евентуални распад система. Због географске удаљености компонента електроенергетског система пожељно је имати заједнички извор тачног времена.*

*Услед растуће забринутости због глобалног загревања све је већи удео дистрибуираних енергетских извора (DER – Distributed Energy Resources) што захтева бољи увид у статус система, као и бржу идентификацију и отклањање грешака. Тако да се при коришћењу стандарда IEC 61850 увећава број апликација које захтевају прецизну синхронизацију времена коришћењем протокола IEEE 1588v2 (PTP – Precision Time Protocol), који омогућава синхронизацију времена са повећаном тачношћу бољом од 1ms, коришћењем софтверског и хардверског одређивања временске ознаке IEEE 1588v2 протокола.*

*У раду је приказана основна архитектура CPU модула телезаштитног уређаја TZ-600 прилагођеног за рад по стандарду IEC 61850. Процесорска јединица CPU*

---

\* Волгина 15, Београд, anka.kabovic@pupin.rs

*модула је заснована на Xilinx Zynq 7000 SoC (System on Chip) компоненти, која се састоји од програмабилне логике FPGA (PL) и процесорског система (PS) са дуалним ARM Cortex-A9 микропроцесором. На једном језгру Cortex-A9 Zynq-7000 SoC-а се реализују временски мање критични сервиси у оквиру Linux оперативног система (нпр. конфигурација и надгледање урађаја, рад са базама података). На другом језгру Cortex-A9 Zynq-а се реализују real-time сервиси под Free RTOS оперативним системом (нпр. рад са GOOSE порукама, реализација преноса команди преко Етернет интерфејса, рад са графичким дисплејом, реализација сервисног говорног канала). Оваква архитектура омогућава више различитих решења за РТР синхронизацију времена различите прецизности, у зависности од начина одређивања временске ознаке (софтверско или хардверско). У раду су приказани основни принципи реализације решења за РТР временску синхронизацију, као и начини мерења и остварене прецизности (на основу почетних мерења).*

**Кључне речи** - РТР протокол, телешахтита, CPU модул, Zynq 7000, процесорски систем, синхронизација времена, системско време.



DOI broj: [10.46793/CIGRE21S.414L](https://doi.org/10.46793/CIGRE21S.414L)

D2 13

## ПРИМЕНА IP MPLS МРЕЖЕ ЕПС-А ЗА ОБЕЗБЕЂИВАЊЕ КОМУНИКАЦИОНИХ ПОТРЕБА

ДАНИЛО ЛАЛОВИЋ\*, ВЕСНА ВУКИЋЕВИЋ, ИВАН ВУКАДИНОВИЋ,  
ЗЛАТКО МИТРОВИЋ  
АКЦИОНАРСКО ДРУШТВО ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА СРБИЈЕ, БЕОГРАД  
МИОДРАГ ЈЕВТИЋ, ДАЛИБОР МИТИЋ  
САГА ДОО БЕОГРАД

БЕОГРАД

СРБИЈА

*Кратак садржај* — Имајући у виду да је већ протекао значајан период експлоатације IP MPLS мреже ЕПС-а, може се рећи да пракса потврђује да је примењени дизајн мреже омогућио флексибилност и скалабилност мреже, као и њен даљи развој у погледу прикључења нових објеката и корисника. Са појавом нових захтева који су се постављали пред телекомуникациони систем растао је број нових сервиса који се пропуштао кроз IP MPLS мрежу омогућавајући реализацију ових захтева. Рад ће обрадити примере из праксе у погледу коришћења IP MPLS мреже за решавање различитих комуникационих потреба који се појављују у раду информационог и телекомуникационог система ЕПС-а и ЕДС-а. Приказаће се флексибилност IP MPLS мреже кроз представљање решења која се примењују користећи јединствену комуникациону платформу. Оптичка повезаност објекта је довољан услов да се направи и примени ефикасно комуникационо решење користећи IP MPLS и DWDM мреже чија скалабилност омогућава једноставно прикључење нових корисничких локација и пружање захтеваних сервиса.

*Кључне речи* — IP MPLS мрежа, DWDM мрежа, Телекомуникациони систем.

---

\* Царице Милице 2, 11000 Београд, тел.:2024-769 email:danilo.lalovic@eps.rs

## 1. УВОД

Телекомуникациони систем се интензивно развијао претходних година како би одговорио на захтеве техничког и пословног система управљања ЕПС-а. Било је важно применити техничко решење које ће омогућити флексибилно и скалабилно проширење IP MPLS мреже и једноставно увођење нових чворова. Основни примењени концепт је да се сви телекомуникациони сервиси пропуштају кроз IP MPLS мрежу. Транспортне мреже обезбеђују сервисе потребног протока са заштитом за потребе повезивања чворова IP MPLS мреже. Изграђена телекомуникациона мрежа преноса заснована на DWDM технологији има велику распрострањеност на територији целе државе тако да њена чворишта омогућавају једноставно и ефикасно прикључивање нових објеката који постају чворишта оптичке мреже и IP MPLS мреже. Правовременом фазном заменом IP MPLS опреме у циљу обезбеђивања техничке подршке произвођача опреме, обезбеђена је довољна количина IP MPLS опреме у резерви која се може иницијално користити за ефикасно и брзо решавање техничких захтева који се појављују у пракси. Користећи расположиви хардвер који постоји у резерви и примењено флексибилно техничко решење у мрежи, омогућено је да се сви захтеви који се постављају пред телекомуникациони систем реализују брзо на једноставан и флексибилан начин.

Показује се у пракси да је од значаја да се поред новоизграђене DWDM мреже преноса, IP MPLS мрежа ослања за обезбеђивање критичних сервисе и на SDH мрежу преноса. У неколико ситуације је долазило до прекида DWDM оптичких веза због проблема са оптичким влакнима што је резултовало да DWDM везе према једном делу приступне равни IP MPLS мреже постану недоступне. Конкретно због прекида ADSS кабла између ПДЦ Лесковац и ЕД Лесковац дошло је до прекида DWDM везе ка XE Врла 3 и ЕД Врање. У овом случају је расположивост SDH веза одиграла важну улогу у омогућавању континуитета сервиса за IP MPLS чвориште у XE Врла 3. Досадашњи период експлоатације мреже потврђује највиши степен расположивости за критичне IP MPLS сервисе с обзиром да није долазило до отказа сервиса у условима прекида оптичких влакана или проблема у раду транспортног чвора.

## 2. ЕЛЕМЕНТИ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

IP MPLS технологија је у употреби у телекомуникационом систему ЕПС-а још од пре 15 година. Први сервис који је пропуштен кроз IP MPLS мрежу је био сервис IP телефоније, који је омогућио комуникацију између оперативног дела електропривреде одговорног за управљање, експлоатацију и одржавање електроенергетског система, као и између административних целина задужених за пословно управљање у оквиру електропривреде.

Након увођења сервиса IP телефоније, уследило је пропуштање сервиса за пренос пословних података. IP MPLS мрежа се даље развијала према захтевима који су се постављали телекомуникационом систему у погледу пропуштања нових сервиса и увођења нових чворишта у мрежу. У току експлоатације мреже је уследило пропуштање следећих сервиса: SCADA за потребе пројекта ПРОТИС и Централног диспечерског система ЦДС, SCADA за потребе Електродистрибуције Србије, видео надзор, надзор техничких система и сервис централизованог интернет приступа. Саобраћај у мрежи се организује у оквиру различитих класа сервиса. Примењују се различите политике рутирања у зависности од класе саобраћаја. По правилу се на основу VLAN-а из ког је стигао пакет на приступни рутер или PE рутер сетује DSCP поље у IP пакету. Политика рутирања се извршава у зависности од класе сервиса којој

пакет припада и DSCP (Differentiated Service Code Point) поље се даље мапира у EXP поље MPLS лабеле, на основу које се одређује класа у окосници мреже и врши даље прослеђивање.

Voice саобраћај користи класу за real time саобраћај највишег приоритета (*Expedited Forwarding*). SCADA сервис припада класи критичних сервиса. Након тога, према приоритету, долазе сервиси за пренос пословних података, видео надзора, надзора техничких система и интернет саобраћај.

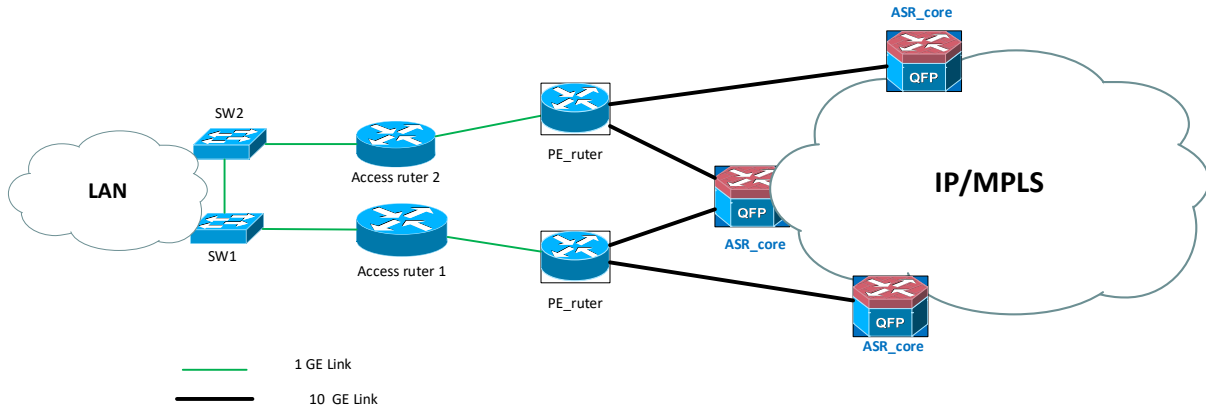
## Основни концепт реализације Интернет сервиса

Интернет је један од последњих реализованих сервиса кроз IP MPLS мрежу са циљем да се постојећа инфраструктура са великим саобраћајним капацитетима искористи за потребе преноса интернет саобраћаја. Идеја Пројекта је била да се консолидују постојећи излази на Интернет, с обзиром да је у складу са ранијом организацијом предузећа било више посебних привредних субјеката који у свом саставу имају такође више производних објеката/погона на различитим локацијама. Након снимања стања, а узимајући у обзир постојећу топологију и конфигурацију мреже, као и број корисника по појединачним локацијама, направљен је план рутирања и расподеле интернет саобраћаја кроз IP MPLS мрежу. Водило се рачуна да се постојећи ресурси мреже што равномерније користе и географски расподеле ресурси два активна интернет приступа. Примењен је концепт редундантног решења и за овај сервис са две географске тачке за интернет приступ и редундантним, физички независним линковима, у свакој од тачака. Цела IP MPLS мрежа је реализована на овај начин, јер се ради о телекомуникационим сервисима електропривреде чија инфраструктура спада у категорију критичне инфраструктуре. Техничко решење за реализацију интернет сервиса се базира на успостављању два VRF-а (Virtual Routing and Forwarding) кроз које се рутира интернет саобраћај у мрежи. Тиме је омогућено да кроз један VRF, независно од локације Интернет приступа, свако од чворишта IP MPLS мреже (која су географски распоређена на територији целе Србије) може постати чвориште са директним приступом интернету, док се кроз други VRF сваком чворишту може обезбедити контролисан приступ интернету у некој од централних тачака. За рутирање саобраћаја између интернет рутера, који су повезани са интернет провајдерима, и IP MPLS мреже ЕПС-а креиран је за ту намену VRF BGP. На овај начин се остварује веза између интернет провајдера и централних тачака предузећа за излазак на интернет. Кроз овај VRF се прослеђује дифолтна рута која се добија од интернет провајдера и оглашавају јавне IP адресе ЕПС-а. VRF Интернет се користи за потребе преноса дифолтне руте и приватних IP опсега крајњих корисника кроз IP MPLS мрежу. Кроз овај VRF се рутира дифолтна рута претходно добијена кроз VRF BGP. Поред дифолтне руте, кроз VRF Интернет се оглашавају и VPN (Virtual Private Network) скуп адреса и адресни опсеги корисничких LAN-ова. Искористили смо примењени MP-BGP протокол и на тај начин једну дифолтну руту у оквиру VPNv4 фамилије дефинисали као две различите VPNv4 адресе које смо означавали различитим community вредностима. Овим смо обезбедили да се применом BGP параметра Local Preference може на нивоу ПЕ рутера дефинисати по ком редоследу ће сваки ПЕ рутер преферирати дифолтну руту и изабрати примарни интернет линк. На тај начин ће сви корисници који су повезани на конкретан ПЕ рутер на јединствен начин излазити на интернет преко истог преферираног интернет линка. Примењено решење са успостављеним VRF BGP обезбеђује флексибилност, тако да ће се у случају отказа примарног интернет линка, комплетан интернет саобраћај одвијати користећи географски редундантан интернет линк.



У случају потпуног хардверског отказа једног интернет чворишта комплетан интернет саобраћај ће се у том случају несметано рутирати користећи VRF Интернет и VRF BGP у оквиру IP MPLS мреже и интернет линк који користи тренутно активна комуникациона опрема која је повезана са интернетом провајдером.

Наводимо пример начина реализације интернет сервиса за потребе једног крајњег LAN корисника. Приликом реализације IP MPLS мреже је коришћен принцип редувантности, што се може видети на слици 1, која приказује начин повезивања једног крајњег LAN корисника на IP MPLS мрежу. Између централног LAN уређаја и приступног рутера IP MPLS мреже, односно агрегационог ПЕ рутера, зависно о којој врсти повезивања се ради у конкретном случају, подигнута је нова L3 (Layer 3) веза за потребе рутирања интернет саобраћаја. На страни централног LAN уређаја се оглашавају опсежи у LAN-у који треба да излазе на интернет, док се са стране IP MPLS чворишта оглашавају дифолтна рута и опсежи VPN pool-а за потребе удаљеног VPN приступа. Ова L3 веза је мапирана у VRF Internet кроз који се рутира интернет саобраћај између редувантних интернет чворишта у предузећу и објекта крајњег корисника. Примењено решење обезбеђује највиши ниво расположивости интернет сервиса. Свако приступно чвориште, за које постоји двострука оптичка веза, се повезује редувантно на нивоу IP MPLS опреме и независних физичких путања са два независна ПЕ рутера у мрежи као што је приказано на слици 1. Као што пракса потврђује овај концепт повезивања обезбеђује највиши ниво расположивости интернет сервиса, јер не постоји јединствена тачка отказа у систему што је већ потврђено у пракси за друге сервисе који се пружају, као што су пренос SCADA података за потребе техничких информационих система, IP телефонија и пренос пословних података.



Слика 1. Модел повезивања приступног чворишта

Након пропуштања интернет сервиса, може се констатовати пораст саобраћаја у IP MPLS мрежи. Интернет саобраћај има значајан удео у оптерећењу линкова IP MPLS мреже. Реализовани капацитети линкова у IP MPLS мрежи су велики тако да наведени пораст саобраћаја у мрежи није утицао на и даље велике расположиве капацитете мреже.

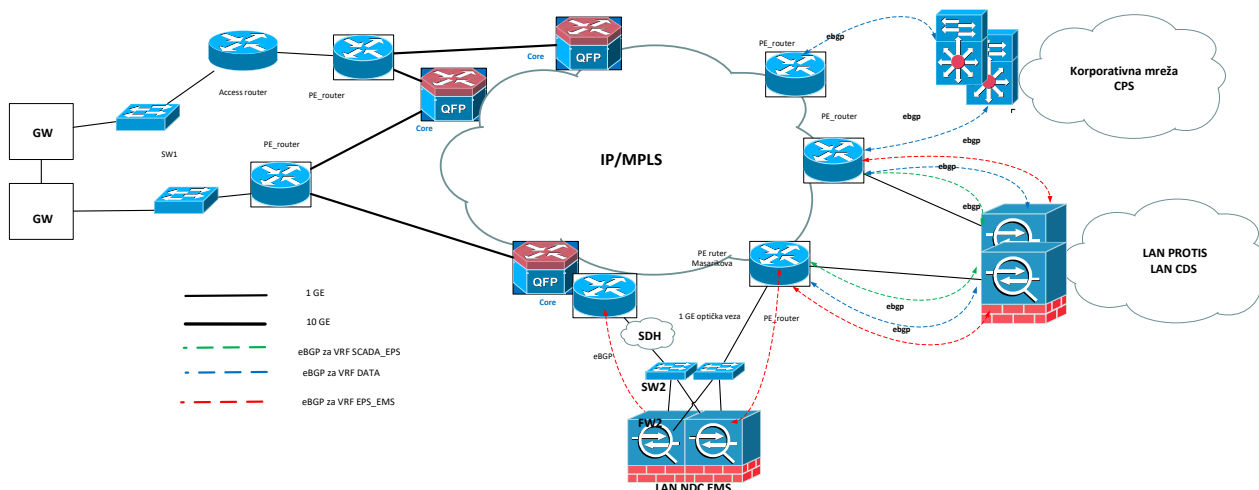
### Обезбеђивање ограничене комуникације између појединих опсега VRF-ова

У овом одељку ћемо описати како се постојећи примењени концепт приказан на слици 2, за обезбеђивање комуникације у оквиру техничких система може, у основи, применити и шире за неке специфичне потребе, као што је то обезбеђивање ограничене

комуникације између појединих опсега/учесника у оквиру различитих VRF-ова, за шта се у пракси јавља потреба, иако су VRF-ови организовани као посебне логичке целине.

Наиме, током реслизације решења за ПРОТИС и ЦДС системе које је приказано на слици 2, поставио се захтев да се обезбеди комуникација SCADA ПРОТИС и ЦДС система са ЦПС системом, системом за планирање производње, који се налази у корпоративној мрежи. Накнадно се поставио и захтев за комуникацијом између SCADA система ПРОТИС и ЦДС са SCADA системом EMC-а у НДЦ-у за потребе пројекта Централизоване аутоматске регулације напона ЕЕС. Иначе, комуникација унутар система ПРОТИС и ЦДС је реализована користећи VRF SCADA\_EPS, док је ЦПС систем повезан у корпоративну мрежу у оквиру VRF Data. За потребе комуникације са SCADA системом EMC-а је направљен посебан VRF. У циљу реализације свих захтеваних токова комуникације између наведених система направљене су посебне L3 везе између редуваног фајарвола, који ради у active standby режиму, и 2 ПЕ рутера на различитим локацијама у циљу обезбеђивања редувансе. Ове посебне L3 везе су мапиране у одговарајуће горепоменуте VRF-ове за сваки од наведених типова комуникације, кроз које се даље рутира саобраћај у IP MPLS мрежи у оквиру посебних логичких целина. За рутирање саобраћаја између ПЕ рутера и фајарвола се користи BGP протокол. Наведени токови комуникације су контролисани преко редуваног фајарвола. Дефинисана су правила на фајарволу којим се омогућава приступ појединим L3 везама које одговарају појединим VRF-овима.

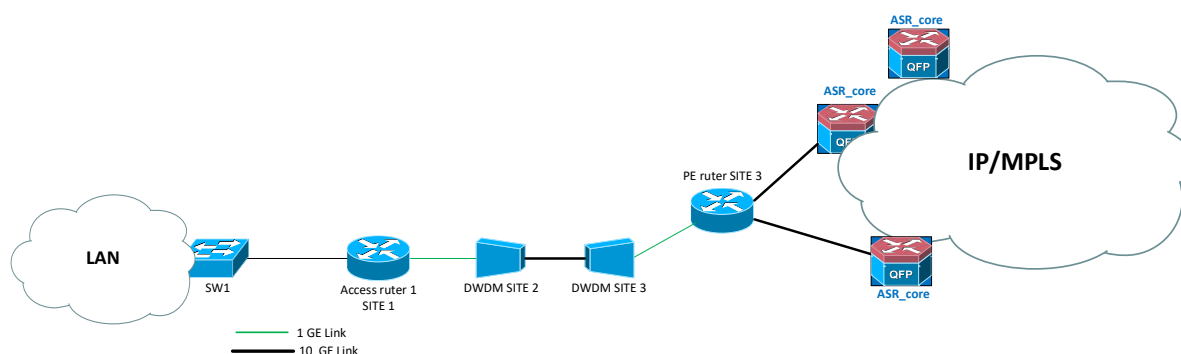
На основу гореописаног конкретног захтева за обезбеђивањем токова информација у пројектима ПРОТИС, ЦДС и Централизоване аутоматске регулације напона ЕЕС, дошло се до приказаног решења на слици 2, које се може даље примењивати и на друге случајеве када је потребно обезбедити контролисану и ограничену комуникацију. На основу специфичних захтева који се јављају у току експлоатације IP MPLS мреже долази до потреба да се омогући комуникација између појединих опсега/учесника који припадају различитим VRF-овима. Спрегом засебног редуваног фајарвола у оквиру IP MPLS мреже са два ПЕ рутера и креирањем L3 веза, које се мапирају у одговарајуће VRF-ове, омогућила би се контролисана комуникација између опсега/учесника у оквиру различитих VRF-ова. Фајарвол би као L3 уређај обезбедио контролисану видљивост између појединих мрежа које припадају различитим VRF-овима. Ово би био модел како би се решавали на сигуран начин специфични и важни захтеви, који се постављају од стране корисника у мрежи, за омогућавањем комуникације која се одвија у два различита VRF-а. Примери примене овог концепта су обезбеђивање ограниченог приступа наменским системима надзора и управљања у оквиру телекомуникационог система.



Слика 2. Концепт обезбеђивања ограничене комуникације између појединих опсега различитих VRF-ова користећи фајарвол

### 3. ПРИМЕРИ РЕАЛИЗАЦИЈЕ ПРИКЉУЧЕЊА НОВИХ ЧВОРИШТА У МРЕЖИ И ПОВЕЗИВАЊА НОВИХ КОРИСНИКА

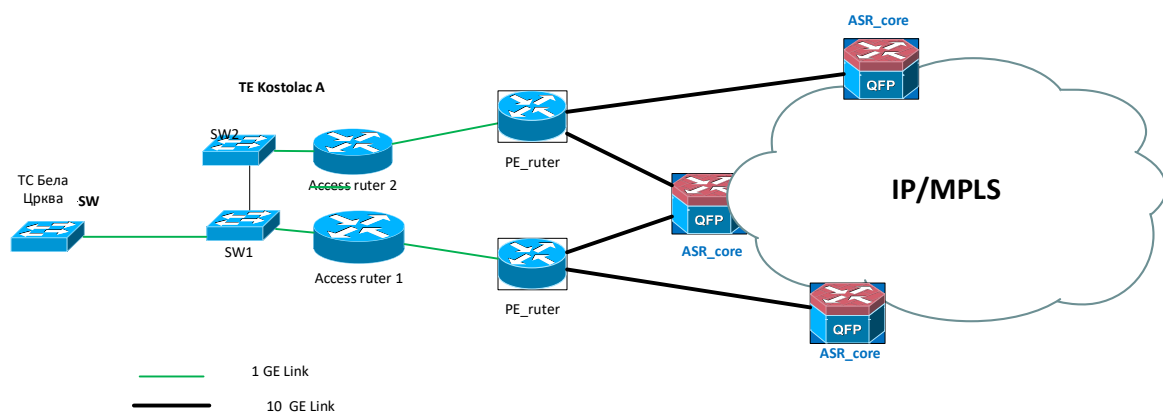
Флексибилност примењеног решења у мрежи омогућава да се брзо и ефикасно повезују нова чворишта. У овом одељку ћемо приказати начине повезивања и реализације сервиса IP MPLS мреже за објекте који су недавно прикључени на оптичку мрежу. Као први пример наводимо примењени начин повезивања објекта ЕД Велика Плана у коме је формирано приступно чвориште IP MPLS мреже. Приликом инсталације IP MPLS опреме било је потребно поставити оптички кабл између просторије где се налази оптички разделник и телекомуникационе просторије где је смештена IP MPLS опрема у дужини од око 60m. Веза приступног чворишта ЕД Велика Плана користи приступну оптичку везу до DWDM уређаја у ТЕ Морава, која је успостављена са преспајањем следећих оптичких деоница: ЕД Велика Плана – ТС Велика Плана 3 – ТС Велика Плана 2 – ТС Велика Плана – ТЕ Морава. Користе се 1000 Base Ex интерфејси с обзиром да је дужина оптичке деонице ЕД Велика Плана - ТЕ Морава око 25km. Реализован је сервис 1 GE кроз DWDM мрежу са заштитом између ТЕ Морава и ЕД Крагујевац, чиме је обезбеђено повезивање на ПЕ рутер у ЕД Крагујевац. На следећој слици бр.3 је приказан начин повезивања у овом случају:



Слика 3. Повезивање приступног чворишта директном оптичком везом и DWDM линком

За рутирање саобраћаја између приступног рутера и опреме у LAN-у се користи се користи BGP (Border Gateway Protocol) протокол.

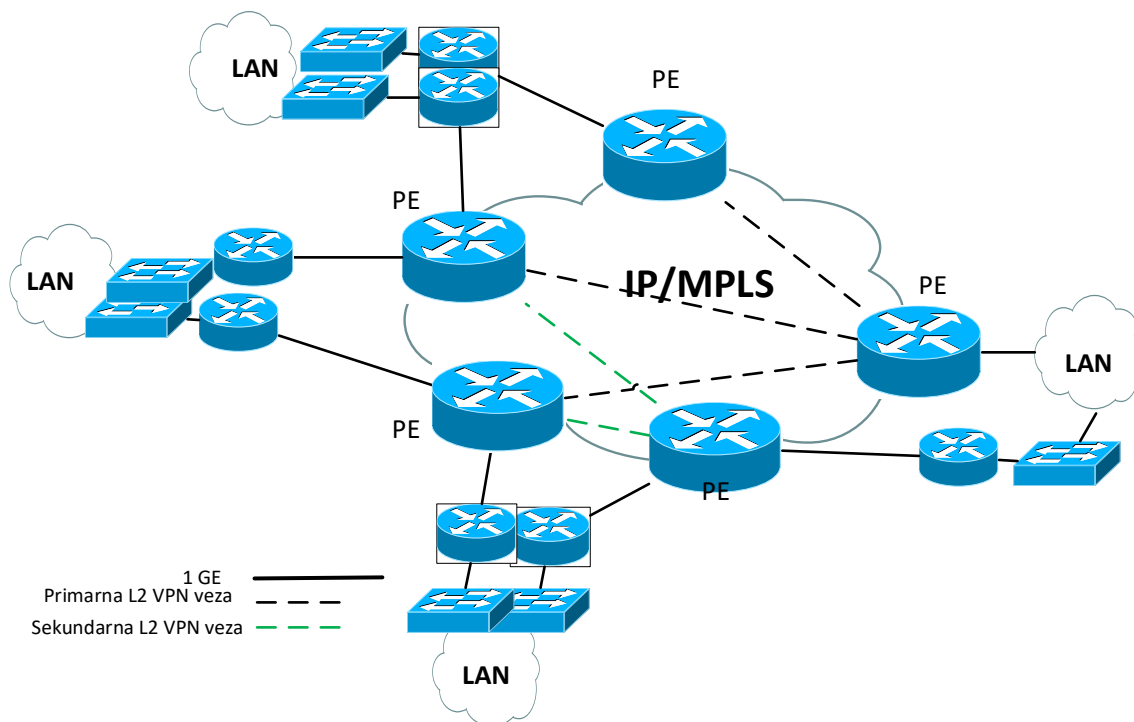
Следећи пример који наводимо је решење за повезивање ТС Бела Црква у циљу обезбеђивања комуникације са надређеним центром управљања у ЕД Панчево. Захтев који треба реализовати јесте да се обезбеди SCADA комуникација између ТС Бела Црква и ЕД Панчево. Поред тога треба реализовати пренос видео сигнала између камера за видео надзор у ТС Бела Црква и сервера који се налази у ЕД Панчево, као и пренос управљачких и надзорних информација за локалне телекомуникационе системе (радио системи, локални свичеви...). У ТС Бела Црква се предвиђа инсталација приступног L2 свича на који ће се повезати локални рутер ЕДС-а. Приступни свич у ТС Бела Црква ће се даље оптичким везама повезати на приступно IP MPLS чвориште у ТЕ Костолац А уз неопходна преспјања оптичких влакана како би се формирала оптичка деоница: ТС Бела Црква – ТС Велико Градиште – ТС Рудник 3 – ТС Рудник 2 – ТЕ Костолац А. Користиће се 1000 Base Zx интерфејси с обзиром да је дужина оптичке деонице ТС Бела Црква - ТЕ Костолац А преко 60 km. Између приступних рутера у ТЕ Костолац А, који раде у HSRP режиму, и локалног рутера у ТС Бела Црква ће се подићи три L3 везе које ће служити за рутирање SCADA опсега, опсега за видео надзор и опсега надзор и управљање локалним телекомуникационим уређајима. Ова три L3 линка ће се мапирати у три VRF-а, VRF SCADA ODS, VRF Video Nadzor ODS и посебан VRF за пренос информација за надзор и управљање телекомуникационим уређајима, кроз које ће се ова три типа саобраћаја рутирати у IP MPLS мрежи. У перспективи постоји могућност да ЕДС успостави радио релејни линк између ТС Бела Црква и Пословнице Бела Црква, У том случају идеја је да се путем будућег радио линка обезбеди веза између LAN-а пословнице и приступног свича у ТС Бела Црква. Ова веза би се даље искористила да се преко приступне оптичке везе направи L3 веза између приступних рутера у ТЕ Костолац А и рутера у пословници. L3 веза би се мапирала у VRF Дата како би се кроз IP MPLS мрежу обезбедио сервис за пренос пословних података за корисике у Пословници.



Слика 4. Повезивање трафо станице на приступно чвориште директном оптичком везом

Поред захтева за повезивањем корисника на нивоу L3 веза, појавио се и одређени број захтева за обезбеђивањем комуникације на нивоу L2 веза, које се односе пре свега на ЕДС и посебно област која припада Дистрибутивном подручју Ниш. Првенствено је било потребно повезати главне објекте овог дистрибутивног подручја, седишта ЕД Зајечар, ЕД Пирот, ЕД Прокупље, ЕД Лесковац и ЕД Врање са седиштем ДП Ниш на L2 нивоу. Обезбеђивање веза на нивоу L2 је омогућено коришћењем L2 VPN сервиса кроз IP MPLS мрежу за потребе функционисања техничке и пословне мреже ДП Ниш. Принцип повезивања је био point to multipoint. За сваку L2 везу између централне локације у Нишу и удаљене локације је подигнут одговарајући VLAN. L2 VPN

сервиси су се реализовали између ПЕ рутера на који је повезана удаљена локација и ПЕ рутера Ниш. На централној локацији су сви линкови агрегирани и успостављена је веза између ПЕ Ниш и LAN Ниш. Принцип повезивања је приказан на слици 5. За приступне IP MPLS локације, на које се повезао LAN огранка електродистрибуције, конфигурисана је L2 веза (bridge) између приступног рутера и надређеног агрегационог ПЕ рутера са одговарајућим VLAN-ом. Између ПЕ рутера на који је повезана удаљена локација и централног агрегационог рутера ПЕ Ниш је конфигурисан L2 VPN сервис. На овај начин је значајно унапређен постојећи систем веза ДП Ниш преласком на L2 VPN сервисе кроз IP MPLS мрежу који обезбеђује протоке на нивоу 1 Gbit/s и висок ниво квалитета сервиса. У циљу обезбеђивања редундансе омогућена је редундантна веза LAN-а сваког огранка према другом свичу и приступном рутеру на локацији, који је повезан на други надређени агрегациони ПЕ рутер у мрежи. На централној локацији је омогућена редундантна веза LAN-а преко DWDM мреже на ПЕ рутер у ПДЦ Крушевац. Редундантни L2 VPN сервис су конфигурисани између ПЕ рутера на редундантној локацији и одговарајућих ПЕ рутера на којима је омогућено редундантно повезивање LAN-ова огранака електродистрибуција.



Слика 5. Модел повезивања коришћењем L2 VPN сервиса за потребе ДП Ниш

Након унапређења система веза у окосници ДП Ниш, по истом моделу се наставило са пружањем сервиса по дубини мреже. По описаном моделу пружања L2 VPN сервиса обезбеђена је комуникација кроз IP MPLS мрежу за потребе ЕД Кладово, ЕД Неготин, ТС Владичин Хан 110 kV, ТС Владичин Хан 35 kV и Пословницу Владичин Хан. Удаљене локације се повезују директним оптичким везама користећи SFP модуле, напуштајући раније примењени приступ коришћења медија конвертора на страни опреме ДП Ниш. План је да се даље по овом моделу настави повезивање објеката по дубини и миграција постојећег саобраћаја са SDN веза на IP MPLS везе које обезбеђују веће протоке, виши квалитет сервиса, као и перспективу у погледу унапређења и техничке подршке.

#### **4. ЗАКЉУЧАК**

У раду приказана решења прикључивања нових чворишта и пропуштања нових сервиса потврђују флексибилност и скабилност реализоване IP MPLS мреже кроз њихову једноставну и брзу примену користећи јединствену комуникациону платформу. Мрежа се лако адаптира и прилагођава новим захтевима. Досадашњи период експлоатације потврђује највиши степен расположивости за критичне IP MPLS сервисе с обзиром да није долазило до отказа сервиса у условима прекида оптичких влакана или проблема у раду транспортног чвора.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Cisco Systems Inc, “Implementing IP MPLS“, Cisco Guide, 2019.
- [2] Diane Teare, Bob Vachon, Rick Graziani, “Implementing Cisco IP Routing“ , 2015.
- [3] Cisco Systems Inc., “Multiprotocol Label Switching for the Utility Wide Area Network”, White Paper, 2016.

# APPLICATION OF IP MPLS NETWORK OF EPS TO PROVIDE COMMUNICATION NEEDS

DANILO LALOVIĆ, VESNA VUKIĆEVIĆ, IVAN VUKADINOVIĆ,  
ZLATKO MITROVIĆ  
JOINT STOCK COMPANY ELECTRIC POWER INDUSTRY OF SERBIA,  
BELGRADE  
MIODRAG JEVTIĆ, DALIBOR MITIĆ  
SAGA

BELGRADE

SERBIA

*Abstract* — Taking into account that a significant period of exploitation of the IP MPLS network of EPS has already passed, it can be said that practice confirms that the applied network design enabled the flexibility and scalability of the network, as well as its further development in terms of connecting new facilities and users. With the appearance of new requirements that were placed before the telecommunications system, the number of new services that were provisioned through the IP MPLS network increased, enabling the realization of these requirements. The paper will deal with practical examples regarding the use of the IP MPLS network to solve various communication needs that arise in the operation of the information and telecommunication system of EPS and EDS. The flexibility of the IP MPLS network will be demonstrated by presenting solutions implemented using a single communication platform. The facility's optical connectivity is a sufficient condition to create and implement an efficient communication design using IP MPLS and DWDM networks, whose scalability enables easy connection of new customer locations and provision of required services.

*Key words* — IP MPLS network, DWDM network, Telecommunications system

**ПРИМЕНА IP MPLS МРЕЖЕ ЕПС-А ЗА ОБЕЗБЕЂИВАЊЕ  
КОМУНИКАЦИОНИХ ПОТРЕБА**

**APPLICATION OF IP MPLS NETWORK OF EPS TO PROVIDE  
COMMUNICATION NEEDS**

**ДАНИЛО ЛАЛОВИЋ\*, ВЕСНА ВУКИЋЕВИЋ, ИВАН ВУКАДИНОВИЋ,  
ЗЛАТКО МИТРОВИЋ  
АКЦИОНАРСКО ДРУШТВО ЕЛЕКТРОПРИВРЕДА СРБИЈЕ, БЕОГРАД  
МИОДРАГ ЈЕВТИЋ, ДАЛИБОР МИТИЋ  
САГА ДОО БЕОГРАД**

**БЕОГРАД**

**СРБИЈА**

*Кратак садржај* - Имајући у виду да је већ протекао значајан период експлоатације IP MPLS мреже ЕПС-а, може се рећи да пракса потврђује да је примењени дизајн мреже омогућио флексибилност и скалабилност мреже, као и њен даљи развој у погледу прикључења нових објеката и корисника. Са појавом нових захтева који су се постављали пред телекомуникациони систем растао је број нових сервиса који се пропуштао кроз IP MPLS мрежу омогућавајући реализацију ових захтева. Рад ће обрадити примере из праксе у погледу коришћења IP MPLS мреже за решавање различитих комуникационих потреба који се појављују у раду информационог и телекомуникационог система ЕПС-а и ЕДС-а. Приказаће се флексибилност IP MPLS мреже кроз предствалање решења која се примењују користећи јединствену комуникациону платформу. Оптичка повезаност објекта је довољан услов да се направи и примени ефикасно комуникационо решење користећи IP MPLS и DWDM мреже чија скалабилност омогућава једноставно прикључење нових корисничких локација и пружање захтеваних сервиса. Рад детаљно описује концепт увођења новог Интернет сервиса и начин прикључења два нова објекта у мрежу, ЕД Велика Плана и ТС Бела Црква. Приказан је и концепт реализације L2VPN сервиса на примеру једног дистрибутивног подручја. На крају се констатује да досадашњи период експлоатације потврђује највиши степен расположивости за критичне IP MPLS сервисе.

*Кључне речи* — IP MPLS мрежа, DWDM мрежа, Телекомуникациони систем.