

DOI: [10.46793/CIGRE37.A1.07](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A1.07)

A1.07

REVITALIZACIJA POLOVA ROTORA GLAVNOG GENERATORA U HE ĐERDAP 1

REVITALIZATION OF THE MAIN GENERATOR ROTOR POLES IN HPP DJERDAP 1

Dragan Belonić*, Dragan Gluvačević

Kratak sadržaj: Pобољшање performansi i produženje radnog veka obrtnih mašina u pogonu kroz njihovu obnovu, побољшање dizajna, zamenu upotrebljenih izolacionih materijala, a radi održavanja sigurnosti, stabilnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sistema, u današnjoj energetskej tranziciji, predstavlja značajan izazov. Revitalizacija hidrogenatora u HE „Đerdap 1“ podrazumevala je zamenu, rekonstrukciju i unapređenje dizajna pojedinih elemenata generatorske opreme. Ugovorom o revitalizaciji predviđeno je bilo izvođenje revitalizacionih radova na polovima rotora glavnog generatora u fabrici proizvođača opreme u Ruskoj Federaciji. Imajući u vidu povećan rizik od nastanka okolnosti više sile, odnosno logističkih ograničenja prema Ruskoj Federaciji, revitalizacija polova rotora glavnog generatora poslednje etape revitalizacije izvršena je u domaćoj fabrici u Srbiji. U ovom radu biće prezentovani organizacioni i tehničko-tehnološki problemi realizacije poslova na revitalizaciji polova rotora glavnog generatora, specifičnosti postupka revitalizacije polova rotora metodom impregnacije pod vakuumom (VPI metod), razlike u odnosu na izvorni dizajn. Tehničkim zadatkom i Planom kontrole kvaliteta definisani su svi neophodni sanacioni radovi, kontrolna merenja i ispitivanja na jezgrima polova, zatim kontrolna merenja i ispitivanja na isporučenim novim namotajima polova rotora i na kraju svi neophodni radovi i ispitivanja prilikom montaže namotaja na jezgro pola VPI metodom.

Ključne reči: Revitalizacija, Pol rotora, Kontrolna ispitivanja, VPI metod

Abstract: Improving the performance and extending the working life of rotating machines in operation through their renovation, improvement of design, replacement of used insulating materials with new ones, and in order to maintain the safety, stability and reliability of the power system, in today's energy transition, represents a significant challenge. The revitalization of the hydro generators in HPP "Derdap 1" meant the replacement, reconstruction and improvement of the design of certain elements of the generator equipment. By the contract of revitalization, it was foreseen to do the revitalization of main generator rotor poles in the factory of the equipment manufacturer in Russian Federation. Bearing in mind the increased risk of force majeure, i.e. logistical restrictions towards the Russian Federation, the revitalization of the rotor poles of the main generator of the last stage of the revitalization was carried out in a domestic factory in Serbia. This paper will present the organizational and technical-technological

* Dragan Belonić, Nikola Tesla Institute of Electrical Engineering, d.belonic73@gmail.com
Dragan Gluvačević, JSC EPS Belgrade, Branch Djerdap, HPP Djerdap 1, dragan.gluvacevic@eps.rs

problems of the realization of works on the revitalization of the rotor poles of the main generator, the specifics of the procedure of revitalization of the rotor poles using the vacuum impregnation method (VPI method) and the differences compared to the original design. The technical task and the Quality Control Plan defined all the necessary renovation work, control measurements and tests on the pole cores, then control measurements and tests on the delivered new rotor pole windings and finally all the necessary work and tests during the assembly of the windings on the pole core using the VPI method.

Key words: *Revitalization, Rotor pole, Control test, VPI method*

1 UVOD

1.1 Opšte informacije o radu

U ovom radu biće prezentovani organizacioni i tehničko-tehnološki problemi realizacije poslova na revitalizaciji polova rotora glavnog generatora br.3, specifičnosti postupka revitalizacije polova rotora metodom impregnacije pod vakuumom (VPI metod) i razlike u odnosu na izvorni dizajn.

Za potrebe izrade ovog rada korišćena je tehnička dokumentacija pripremljena za potrebe realizacije predmetnog posla u domaćoj fabrici i odgovarajući rezultati fabričkih ispitivanja i ispitivanja tokom izvođenja montažnih radova na elektrani.

1.2 Obim revitalizacionih radova

HE „Đerdap 1”, u svojoj mašinskoj zgradi poseduje 6 (šest) hidrogeneratora. Generatori su trofazni, sinhroni, vertikalnog tipa, s nosećim ležištem na poklopcu turbine i jednim vodećim ležištem iznad generatora.



Slika 1: HE “Đerdap 1”

Za potrebe ostvarivanja definisanih parametara hidrogeneratora Ugovorom o revitalizaciji HE „Đerdap 1“ predviđena je:

- Montaža novih kućišta, jezgara i namotaja statora glavnog generatora (GG).
- Revitalizacija kućišta statora, montaža novih lim paketa i namotaja statora pomoćnog generatora.
- Revitalizacija obodnog prstena rotora glavnog generatora sa montažom novih / revitalizovanih polova.

- Izrada i isporuka kompleta novih polova rotora glavnog generatora br. 4-6.
- Revitalizacija jezgara polova, zamena namotaja polova rotora glavnog generatora br. 1-3.
- Revitalizacija polova pomoćnog generatora (preizolovanje polova).

2 REVITALIZACIJA POLOVA ROTORA GLAVNOG GENERATORA

2.1 Uvodne napomene

Početkom septembra 2022. godine započeta je revitalizacija agregata br. 3, poslednjeg od 6 (šest) agregata (Etapu 6) na HE „Đerdap 1“. Ugovorom o revitalizaciji predviđeno je bilo izvođenje revitalizacionih radova na polovima rotora glavnog generatora u fabrici proizvođača opreme što podrazumeva transport polova na revitalizaciju u Rusku Federaciju.

Predstavnici AD EPS, Ogranka HE Đerdap i Isporučioca opreme usaglasili su neophodnost promene mesta izvršenja revitalizacije polova rotora glavnog generatora za Etapu 6 imajući u vidu povećan rizik od nastanka okolnosti više sile, odnosno logističkih ograničenja prema Ruskoj Federaciji. Shodno tome, revitalizacija polova rotora glavnog generatora izvršiće se u domaćoj fabrici u Srbiji.

Tehničkim zadatkom i Planom kontrole kvaliteta definisani su svi neophodni sanacioni radovi, kontrolna merenja i ispitivanja na jezgrima polova, zatim kontrolna merenja i ispitivanja na isporučenim novim namotajima polova rotora i na kraju svi neophodni radovi i ispitivanja prilikom montaže namotaja na jezgro pola VPI metodom

2.2 Polovi rotora glavnog generatora – opšti podaci

Namotaji polova, nakon revitalizacije, biće isti za svih šest generatora. Pri revitalizaciji generatora br. 1-3 koristiće se postojeća jezgra polova sa prigušnim namotajem. Za generatore br. 4-6 isporučeni su novi polovi.

Jezgro pola izrađeno je od čeličnih limova stegnutih pritisnim pločama i steznim brezonima. Pobudni namotaj je izrađen od golih bakarnih šina specijalnog profila. Prigušni namotaj je uzdužno-poprečni i sastoji se od 8 bakarnih šipki i dva krajna bakarna prigušna segmenta. Spojevi između polova su razdvojnivi, izrađeni od paketa tankih elastičnih bakarnih limova i pričvršćivače se za obod pomoću specijalnih držača i izolacionih stezača. Prigušni namotaji između polova spajaće se elastičnim bakarnim vezama.

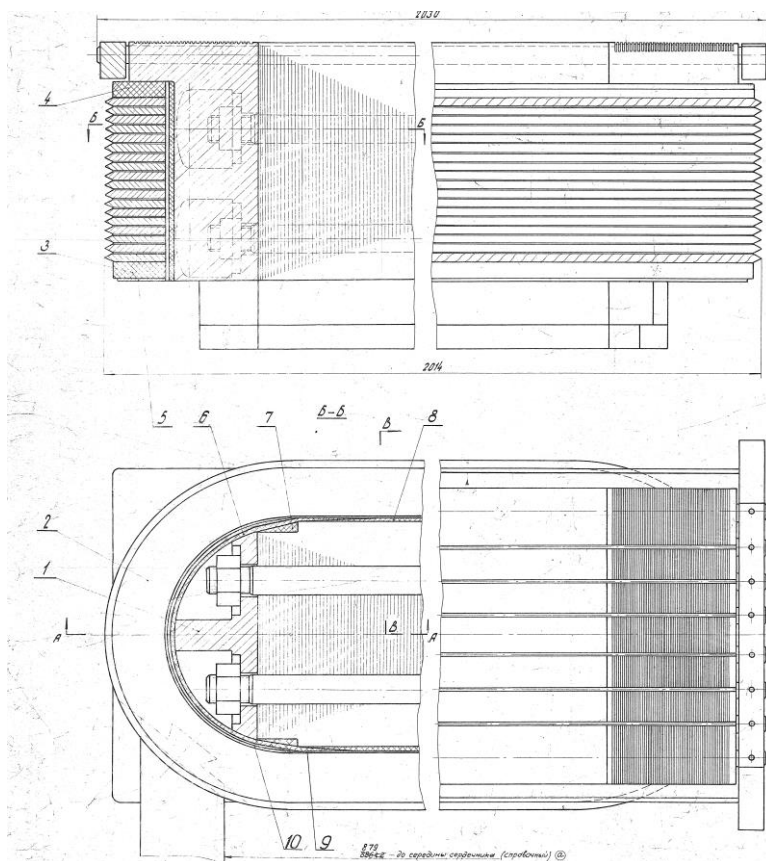
Tabela I: Tehnički karakteristike polova rotora pre i nakon revitalizacije:

	Stari polovi generatora br. 1 – 3	Revitalizovani polovi generatora br.1 – 3
Težina kompletnog pola	1940 kg	1950 kg
Težina kompletnog namotaja pola	515 kg	520,8 kg
Napon pobude, pri nominalnoj snazi, naponu, broju obrtaja i koeficijentu snage	375 V	385 V
Struja pobude, pri nominalnoj snazi, naponu, broju obrtaja i koeficijentu snage	1840 A	1880 A
Poprečni presek bakarne šine specijalnog profila pobudnog namotaja	740 mm ²	740 mm ²
Broj zavoja polnog namotaja	18 ^(+1/7)	18 ^(+1/7)
Klasa izolacije	B	F

2.3 Specifičnosti postupka revitalizacije polova rotora VPI metodom i razlike u odnosu na izvorno stanje

2.3.1 Izvorno stanje polova rotora

Međuzavojna izolacija namotaja „starih“ polova rotora glavnog generatora sastojala se od podloški izrađenih od staklomikanita, azbestnog papira i staklene trake. Korpusna izolacija namotaja bila je izrađena od odgovarajućih elemenata izrađenih od tekstolita i impregnirane stakloplastike i azbestnog papira.



Slika 2: Pol rotora glavnog generatora – izvorno stanje

(poz. 1. – jezgro pola; poz. 2. – namotaj pola; poz. 3.÷4. – izolacioni prsten; poz. 5. – metalni prsten; poz. 6.÷10. – elementi korpusne izolacije namotaja pola)

Namotaj pola na jezgro pola je fiksiran umetanjem odgovarajućih zaptivki/umetaka izrađenih od tekstolita. Namotaj i jezgro pola ne predstavljaju monolitnu celinu. Namotaj starih polova je moguće lako skinuti sa jezgra pola.

2.3.2 Revitalizacija polova rotora VPI metodom

Impregnacija pod vakuumom (VPI) [1] je proces kojim se kompletan namotaj statora ili rotora potapa u smolu ili lak. Kombinacijom suvog i vlažnog vakuuma i ciklusa odgovarajućih pritisaka, smola ili lak u potpunosti prodire u ceo izolacioni sistem i popunjava sve praznine i šupljine. Nakon odgovarajućeg termičkog tretmana, impregnirani namotaj postaje monolitna i homogena celina.

Postupak revitalizacije polova rotora glavnog generatora VPI (Vaccum Pressure Impregnation) metodom obezbeđuje značajna poboljšanja:

- **Poboljšana izolaciona svojstva** - poboljšana dielektrična čvrstoća namotaja.
- **Poboljšana otpornost na vlagu** - VPI proces stvara zatvoreno okruženje koje pomaže u zaštiti namotaja od prodora vlage, smanjujući rizik od kratkih spojeva i korozije tokom vremena.
- **Povećana toplotna provodljivost** - Smola koja se koristi u VPI može poboljšati disipaciju toplote iz namotaja, omogućavajući efikasniji rad i potencijalno produžavajući životni vek namotaja.
- **Smanjen rizik od kontaminacije** - Proces vakumiranja minimizira uvođenje vazдушnih mehurića i zagađivača, što dovodi do konzistentnijeg i pouzdanijeg izolacionog sloja.
- **Veća otpornost na mehanička naprezanja** - Namotaji tretirani VPI su često otporniji na vibracije i mehanička naprezanja, što ih čini pogodnim za zahtevne primene u teškim uslovima rada.
- **Duži vek trajanja** - Zbog poboljšane izolacije, otpornosti na vlagu i mehaničke čvrstoće, VPI-tretirani namotaji imaju duži radni vek.
- **Manji zahtevi za održavanje** - Povećana izdržljivost i pouzdanost namotaja tretiranih VPI može dovesti do smanjenih potreba za održavanjem i zastoja, što je posebno korisno u pogonima gde neplanirani zastoji predstavljaju problem i mogu uzrokovati značajne finasijske gubitke.



Slika 3: Posuda za vakumiranje i impregnaciju

VPI metod/proces podrazumeva sledeće aktivnosti [2]:

Pripremu kompletiranog pola za impregnaciju:

- a. Postavljanje alata za fiksiranje/pritiskanje namotaja pola;
- b. Predgrevanje pola u peći;
- c. Kontrolisano hlađenje pola pre ubacivanja u posudu za vakumiranje i impregnaciju.

Impregnacija namotaja pola:

- a. Ciklus „suvog“ vakuum – radi uklanjanja svog vazduha i vlage iz izolacije;
- b. Ciklus „vlažnog“ vakuum – ubacivanje smole u impregnacionu komoru pod vakuumom;
- c. Ciklus pod pritiskom - Vakuum se oslobađa i dovodi se impregnaciona komora pod odgovarajući pritisak kako bi smola ili lak u potpunosti prodrli u sve praznine u izolaciji namotaja;
- d. Ciklus ukidanja pritiska – vraćanje neiskorišćene smole ili laka u rezervoar.

Čišćenje pola nakon impregnacije:

- a. Čišćenje izvoda namotaja i priključaka prigušnih segmenata od smole;
- b. Zaštita kontaktnih površina pre ubacivanja pola u peć.

Zagrevanje (pečenje) pola u peći

2.3.3 Razlike u odnosu na izvorni dizajn

Dimenzioni parametri i težine starih i revitalizovanih polova su gotovo identični (Tabela I).

Namotaj polova rotora nakon revitalizacije je sada monolitna i homogena celina i ne može se jednostavno „svući“ sa jezgra pola.

Upotrebljeni su novi izolacioni materijali za korpusnu i međuzavojnu izolaciju, adekvatni VPI procesu impregnacije (staklena tkanina, liskunska ploča, epoksidna staklena podloška, ...)

Poboljšana klasa izolacije i strujna opteretivost namotaja bez promene poprečnog preseka (Tabela I).

Neznatna promena parametara pobudnog sistema.

2.4 Neophodnost promene mesta izvršenja revitalizacije polova

Ugovorom o revitalizaciji, zaključenim sa firmom iz St. Peterburga, Ruska Federacija, bilo je predviđeno izvođenje revitalizacionih radova na polovima rotora glavnog generatora br.3 u fabrici proizvođača opreme što podrazumeva transport polova na revitalizaciju u Rusku Federaciju.

Protokolom od 12.08.2022. godine, predstavnici AD EPS, Ogranka HE Đerdap i Isporučioca opreme usaglasili su neophodnost promene mesta izvršenja revitalizacije polova rotora glavnog generatora za Etapu 6, a imajući u vidu povećan rizik od nastanka okolnosti više sile, odnosno logističkih ograničenja prema Ruskoj Federaciji (sankcije EU).

Shodno tome, revitalizacija polova rotora glavnog generatora izvršiće se u domaćoj fabrici u Srbiji.

Kako je za potrebe izvođenja montažnih radova na hidrogeneratoru br. 3 HE „Đerdap 1“ već imao zaključen

Ugovor sa odgovarajućom domaćom firmom, firmom koja ima tehničke mogućnosti za izvođenje predmetnih radova, to je izvršeno ugovaranje dodatnih radova na revitalizaciji polova rotora glavnog generatora, a prema usvojenoj tehnologiji i uz nadzor ruskih stručnjaka.

Za potrebe realizacije ovih radova izvršena je hitna doprema namotaja polova rotora glavnog generatora sa pripadajućim izolacionim i montažnim materijalom iz fabrike Isporučioca opreme, a u cilju očuvanja rokova revitalizacionih radova.

2.5 Varijante revitalizacije polova rotora glavnog generatora

2.5.1 Varijanta 1 - zadržavanje starih polova rotora GG (bez revitalizacije)

Nedostaci primenjenog rešenja:

- Nemogućnost kontrole stanja pritisnih ploča jezgara polova i kontrole stanja osiguravajućih varova na navrtkama i brezonima za stezanje jezgara polova;
- Nemogućnost otklanjanja uočenih nedostataka/odstupanja na elektrani:
 - Korekcija dimenzija i oblika pojedinih polova koji ne zadovoljavaju norme.
 - Izrada oštećenih delova koji su za zamenu (izolacioni pritisni prstenovi, delovi korpusne izolacije, ...).
 - Sanacija međuzavojne izolacije.
 - Sanaciju labavosti prigušnih štapova i dopunsko lemljenje prigušnih segmenata moguće je izvesti tek nakon montaže polova na obod rotora jer okretanjem polova dolazi do spadanja namotaja sa jezgra.
- Prilikom izvođenja odgovarajućih električnih ispitivanja postoji velika verovatnoća da dođe do proboja međuzavojne i/ili korpusne izolacije namotaja polova.
- Na elektrani ne posedujemo aparaturu za ispitivanje međuzavojne izolacije namotaja polova.
- Potencijalno neostvarivanje definisanih parametara za revitalizovane agregate (smanjena trajno dozvoljena pobudna struja, prekoračenje porasta temperature delova generatora, neostvarivanje deklarisanog stepena korisnosti, ...).
- Ostaje stari način spajanja međupolnih veza (bočno spajanje lemljenjem).

Ukoliko se naknadno isporuče NOVI polovi potreban je novi zastoј od 100-120 dana za zamenu polova.

2.5.2 Varijanta 2 - revitalizacija polova rotora GG u domaćoj fabrici uz isporuku i zamenu namotaja

Predviđeni obim kontrolnih i sanacionih radova, u ovoj varijanti, bio bi isti kao i u fabrici proizvođača opreme, te bi ova varijanta odgovarala svim zahtevima definisanim Ugovorom i odgovarajućim specijalnim tehničkim uslovima (STU).

2.5.3 Varijanta 3 - zadržavanje starih polova rotora GG sa revitalizacijom u domaćoj fabrici bez isporuke novih namotaja

Nedostaci primenjenog rešenja:

- Upitna je mogućnost korekcije nedostataka na jezgrima polova ili izrade novih jezgara ukoliko bude potrebe u domaćoj fabrici (nepostojanje odgovarajućih alata i opreme za izradu delova).
- Potencijalni problemi prilikom demontaže starih izvoda i montaže novih izvoda polova.

Predviđeni obim kontrolnih i sanacionih radova odgovara predviđenom obimu radova u fabrici proizvođača opreme, ali uz konstataciju da se zadržava stari namotaj uz korekciju položaja izvoda.

Poprečni presek namotaja polova rotora na starim i novim generatorima je približno isti ($q_a \approx 740 \text{ mm}^2$) te zamenom izolacije možemo očekivati da neće biti značajnih razlika u strujnoj opteretivosti i porastu temperatura namotaja rotora u nominalnom režimu.

2.6 Revitalizacija polova GG (saglasno varijanti 2) – obim radova

Za potrebe izvođenja neophodnih radova na revitalizaciji polova rotora glavnog generatora br.3 u HE „Đerdap 1“ neophodno je bilo da Izvođač radova:

2.6.1 Izradi neophodnu tehničku dokumentaciju za izvođenje predmetnih radova, u skladu sa tehničkim opisom i tehničkim zadacima proizvođača opreme, a koja podrazumeva izradu:

- Tehničkog zadatka/tehnološkog procesa za revitalizaciju polova rotora glavnog generatora VPI metodom.
- Plana kontrole kvaliteta.

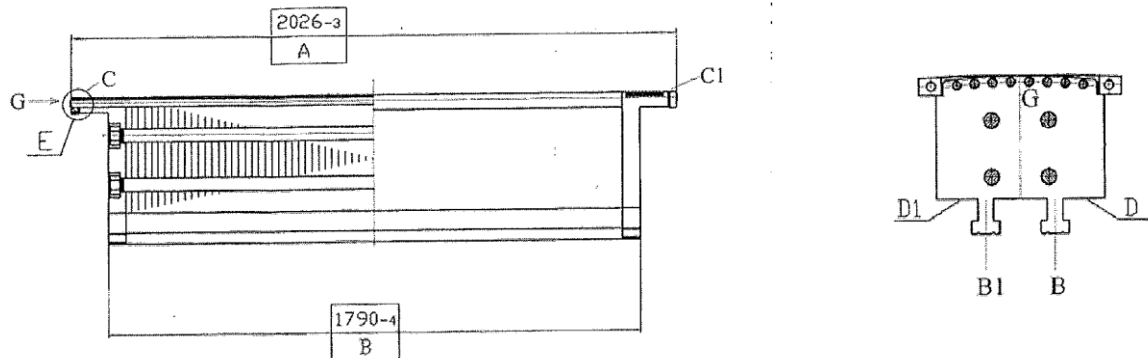
2.6.2 Izvrši odgovarajuće transportne aktivnosti sa predmetnom opremom, a koja podrazumeva:

- Transport izrađenih namotaja polova rotora glavnog generatora, sa pripadajućim izolacionim materijalom, iz fabrike proizvođača opreme (Sankt Petersburg, Ruska Federacija) i transport u fabriku Izvođača radova – 84 kom.
- Transport jezgara polova rotora glavnog generatora sa objekata HE „Đerdap 1“ Kladovo u fabriku Izvođača radova na revitalizaciju – 84 kom.
- Transport revitalizovanih polova rotora glavnog generatora iz fabrike Izvođača radova na objekat HE „Đerdap 1“ Kladovo – 84 kom.

2.6.3 Izvrši revitalizaciju jezgara polova rotora glavnog generatora br.3 koja podrazumeva sledeće aktivnosti:

- Izvođenje kontrolnih radova na jezgrima polova:
 - Vizuelna kontrola jezgara polova.
 - Dimenziona kontrola jezgara polova.
 - Kontrola linearnosti/ravnosti jezgara polova.

- Vizuelna kontrola varova i kontrola metodom „čekićanja“ labavosti prigušnih štapova u jezgru pola.
- Kontrola magnetnim fluksom ili obojenim penetrantima osnovnog materijala na spoljašnjoj površini pritisnih ploča.



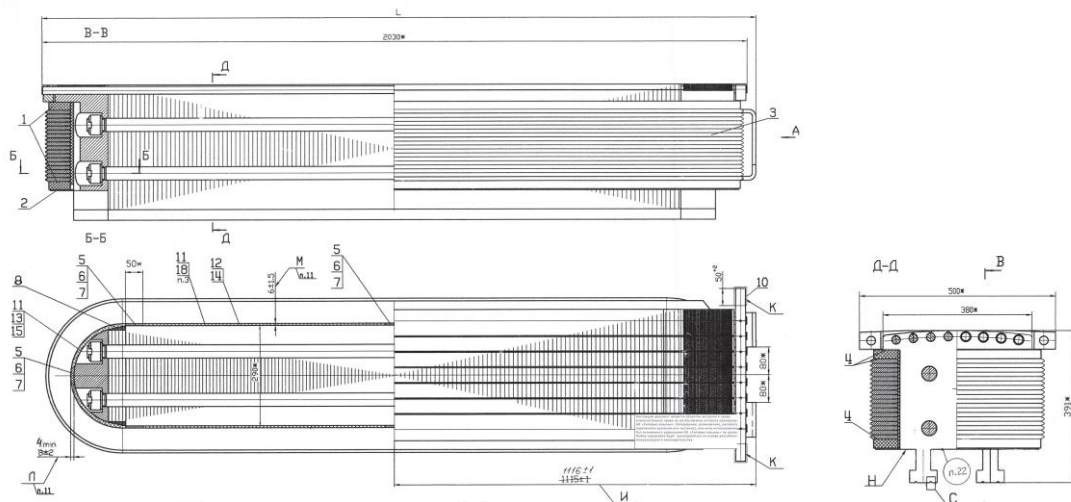
Slika 4: Jezgro rotora glavnog generatora (sa definisanim kontrolnim tačkama)

- Sanacioni radovi na jezgrima polova (saglasno usvojenoj tehnologiji definisanoj u Tehničkom zadatku):
 - Uklanjanje ostataka korpusne izolacije sa jezgra pola.
 - Čišćenje jezgra peskarenjem/bakarnom sačmom od korozije, premaza i ostataka izolacije.
 - Sanacija uočenih nedostataka na zavarenim spojevima.
 - Sanacija varova i labavosti prigušnih štapova u jezgru pola.
 - Sanacija zavarenih spojeva na veznim delovima („T četvrtke“) jezgara polova saglasno zahtevima.
 - „Kalaisanje“ površine „K“ lemom saglasno zahtevima na crtežu.
 - Čišćenje površine jezgra pola pre nanošenja premaza.
 - Farbanje jezgra pola.

2.6.4 Izvrši revitalizaciju polova rotora glavnog generatora – izolovanje jezgra pola i montažu namotaja (saglasno usvojenoj tehnologiji definisanoj u Tehničkom zadatku) što podrazumeva sledeće aktivnosti:

- Pripremu kompleta korpusne izolacije za montažu na jezgro pola.
- Montažu korpusne izolacije saglasno definisanom tehnološkom procesu.
- Montažu namotaja na jezgro pola.
- Fiksiranje i zaptivanje namotaja u skladu sa zahtevima crteža.
- Električna ispitivanja (do impregniranja) saglasno usvojenom Planu kontrole kvaliteta.
- Pripremu pola za impregnaciju saglasno definisanom tehnološkom procesu.
- Impregnaciju polova po VPI metodi.
- Čišćenje polova nakon impregnacije.

- Završne radove na polu:
 - Popuna praznina i pukotina između gornje izolacione podloške i jezgra saglasno zahtevima crteža.
 - Provera visinskog položaja metalne podloške u odnosu na jezgro pola i eventualna korekcija debljine izolacione podloške.
 - Farbanje kompletnog pola.
- Električna ispitivanja (nakon impregniranja i nanošenja elektroizolacionih premaza) saglasno usvojenom Planu kontrole kvaliteta.
- Merenje težine i markiranje polova u skladu sa crtežom.



Slika 5: Pol rotora glavnog generatora

2.6.5 Izvrši sva neophodna međufazna i završna ispitivanja saglasno usvojenom Planu kontrole kvaliteta – što podrazumeva minimalno sledeće aktivnosti:

- Proveru dimenzija jezgara polova.
- Vizuelnu kontrolu stanja jezgara polova.
- Proveru linearnosti/ravnosti jezgara polova.
- Proveru labavosti i stanja zalemljenosti štapova prigušnog kaveza.
- Kontrolu magnetnim fluksom ili obojenim penetrantima osnovnog materijala na spoljašnjoj površini pritisnih ploča.
- Proveru dimenzija namotaja.
- Ispitivanje međuzavojne izolacije namotaja prilikom dopreme u fabriku Izvođača.
- Ispitivanja na završenom polu:
 - Ispitivanje međuzavojne izolacije.
 - Merenje otpora izolacije pola pre i posle dielektričnih ispitivanja.
 - Dielektrična ispitivanja izolacije polova.
 - Dimenziona kontrola polova.

3 PROBLEMI U PROCESU REALIZACIJE REVITALIZACIJE POLOVA ROTORA

Za potrebe izvršenja revitalizacije polova rotora glavnog generatora HE „Đerdap 1“ je, sa već angažovanom domaćom firmom za izvođenje radova na montaži statora i rotora glavnog i pomoćnog generatora agregata br.3, zaključio odgovarajući Aneks osnovnog Ugovora kojim je povećan obim radova i usluga, na način da su ugovoreni dodatni radovi na revitalizaciji polova rotora glavnog generatora, prema usvojenoj tehnologiji i uz nadzor ruskih stručnjaka, kao i preuzimanje izrađenih namotaja iz fabrike proizvođača opreme (St. Peterburg, Ruska Federacija).

3.1 Transport namotaja i montažnog materijala

Za potrebe realizacije radova na revitalizaciji polova rotora glavnog generatora, u domaćoj fabrici, neophodna je bila hitna doprema namotaja polova rotora glavnog generatora sa pripadajućim izolacionim i montažnim materijalom iz fabrike proizvođača opreme (St. Peterburg, Ruska Federacija), a u cilju očuvanja rokova revitalizacionih radova.

Novim paketom sankcija EU prema Ruskoj Federaciji, od 06.10.2022. god. većina ovih proizvoda, koji su neophodni za nastavak radova na revitalizaciji opreme hidrogeneratora Etape 6, podležu sankcijama EU, te nije bilo moguće ovu opremu dopremiti kroz zemlje EU drumskim ili vodenim transportom.

Kao jedino moguće rešenje dopreme neophodne opreme, u novonastalim okolnostima, preostao je direktan avionski transport (St. Peterburg, Istambul, Beograd).

3.2 Nabavka zamenskog montažnog materijala

Tokom ugovaranja obima isporuke opreme i montažnog materijala za potrebe revitalizacije polova rotora glavnog generatora, a shodno načinu transporta ove opreme (avionski transport) javio se problem za određeni broj komponenti koje nije moguće preneti bez dodatnih odobrenja i adekvatnih sertifikata o bezbednosti za transport. Iz tih razloga, nabavka dela montažnog materijala i opreme ugovorena je sa domaćom fabrikom u kojoj će se izvoditi revitalizacioni radovi, a uz saglasnost i odobrenje proizvođača ove opreme.

Iz fabrike proizvođača opreme nije bilo moguće dopremiti odgovarajući „srebrni lem“ tipa „Пер 45“, kao ni smolu za impregnaciju namotaja polova tipa „Компаунд ПК 11“, pa je sa proizvođačem opreme je usaglašeno da Izvođač radova u Srbiji nabavi adekvatne zamene.

3.3 Tehnička opremljenost Izvođača radova i izrada alata za potrebe revitalizacije polova rotora glavnog generatora

Osnovni uslovi za dodeljivanje predmetnog posla domaćoj fabrici je njena tehnička opremljenost i stručni kadar za izvođenje definisanih radova. Neophodna tehnička opremljenost je podrazumevala da fabrika mora imati:

- Adekvatan uređaj za vakumiranje i impregnaciju namotaja polova.
- Adekvatnu „presu“ za montažu namotaja na jezgro pola.
- Potrebne alate za montažu namotaja na jezgro pola.
- Ispitnu laboratoriju.

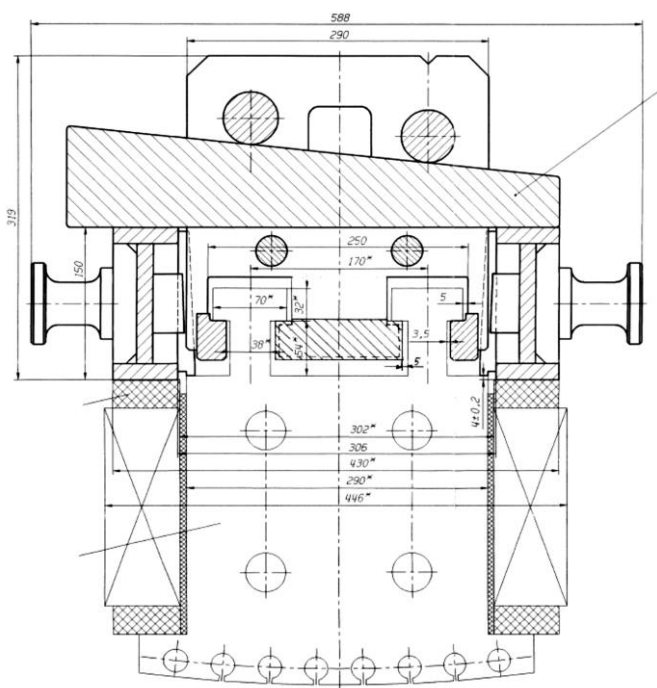
U trenutku ugovaranja ovog dopunskog posla Izvođač, naravno, nije imao adekvatne alate za potrebe montaže, ispitivanja i impregnacije namotaja polova.

Radi očuvanja rokova završetka revitalizacionih radova na Etapi 6 revitalizacije HE „Đerdap 1“ bilo je neophodno hitno pristupiti izradi adekvatnih alata za potrebe definisanih električnih ispitivanja i impregnacije namotaja VPI metodom.

Izvođač radova je izradio odgovarajuće alate za montažu namotaja na jezgro pola i alat za potrebe električnih ispitivanja međuzavojne i korpusne izolacije namotaja pod pritiskom.

HE „Đerdap 1“ je izradio odgovarajuće alate za presovanja namotaja na jezgru pola za potrebe impregnacije.

Svi alati su izrađeni na osnovu instrukcija proizvođača opreme.



Slika 6: Alat za presovanje i impregnaciju namotaja pola

3.4 Uočeni problemi u procesu revitalizacije polova

Nakon isporuke novih namotaja polova rotora glavnog generatora izvršeno je raspakivanje opreme i vizuelni pregled iste.

Tom prilikom je konstatovano sledeće:

- Vizuelnim pregledom namotaja polova zapaženo je mehaničko oštećenje na 13 namotaja sa unutrašnje strane navojaka. Izvršena su ispitivanja ovih namotaja u cilju provere ispravnosti, metodom merenja pada napona između navojaka. Ispitivanjem je konstatovano da namotaji br. 13, 21, 30 i 40 imaju odstupanja koja ukazuju na eventualno postojanje međuzavojnog spoja.

- Vizuelnim pregledom namotaja br. 37 uočeno je postojanje bakarnih opiljaka između navojaka, na namotaju br.11 uočeno je nagnječenje na donjem zavojku, dok je na namotajima br. 10 i 50 uočen neadekvatan položaj međuzavojne izolacije (uvučena izolacija). Izvršena su ispitivanja ovih namotaja u cilju provjere ispravnosti, metodom merenja pada napona između navojaka. Ispitivanjem nisu konstatovana odstupanja koja ukazuju na postojanje međuzavojnog spoja na ovim namotajima.

Uočeni nedostaci su otklonjeni. Izvršeni su odgovarajući reparacioni radovi na ovim polovima koji su podrazumevali određenu mehaničku obradu, dopunsko čišćenje uočenih zona između navojaka, a po potrebi i zamenu dela međuzavojne izolacije.

Na polu br. 22 bilo je neophodno izvršiti brušenje donje izolacione podloške radi obezbeđivanja zahtevanog položaja namotaja u odnosu na jezgro pola.

U toku završnih električnih ispitivanja na revitalizovanom polu br. 11 i 82 došlo je do proboja međuzavojne izolacije. Izvršena je odgovarajuća sanacija u fabrici.

Na jednom polu je došlo do proboja međuzavojne izolacije nakon sprovedenih električnih ispitivanja nakon montaže istog na obod rotora. Pol je vraćen u fabriku na reparaciju.

4 ZAKLJUČAK

Ugovorom o revitalizaciji hidroagregata u HE „Đerdap 1“, za hidrogeneratore br.4, br.5 i br.6 izvršena je isporuka NOVIH polova rotora glavnog generatora, dok je za hidrogeneratore br.1, br.2 i br.3 definisana revitalizacija postojećih polova koja je podrazumevala zadržavanje starih jezgara polova uz odgovarajuću sanaciju i montažu novih namotaja u fabrici proizvođača opreme u St. Peterburgu, Ruska Federacija.

Uzimajući u obzir tadašnju, situaciju u svetu konstatovan je ozbiljan rizik da se polovi rotora glavnog generatora pošalju u Rusku Federaciju na revitalizaciju.

Predstavnici AD EPS, Ogranka HE Đerdap i Isporučioca opreme usaglasili su neophodnost promene mesta izvršenja revitalizacije polova rotora glavnog generatora za Etapu 6 imajući u vidu povećan rizik od nastanka okolnosti više sile, odnosno logističkih ograničenja prema Ruskoj Federaciji. Shodno tome, revitalizacija polova rotora glavnog generatora izvršena je u domaćoj fabrici u Srbiji.

Dogovorena je i realizovana, tada jedino moguća solucija transporta neophodne opreme za završetak revitalizacije agregata br.3 (isporuka novih namotaja i montažnog materijala) – avionski transport (St. Peterburg, Istanbul, Beograd).

Izvršeno je usaglašavanje Tehničkog zadatka i Plana kontrole kvaliteta kojim su definisani svi neophodni sanacioni radovi, kontrolna merenja i ispitivanja na jezgrima polova, zatim kontrolna merenja i ispitivanja na isporučenim novim namotajima polova rotora i na kraju svi neophodni radovi i ispitivanja prilikom montaže namotaja na jezgro pola VPI metodom. Kontrolu ovih radova u domaćoj fabrici vršili su kontinuirano predstavnici proizvođača opreme, a radi očuvanja svih ugovorenih garancija na predmetnoj opremi nakon izvršene revitalizacije.

Revitalizacija polova rotora glavnog generatora u domaćoj fabrici, saglasno usaglašenoj tehnologiji sa proizvođačem opreme, predstavljala je značajan izazov kako za domaćeg Izvođača radova, tako i za HE „Đerdap 1“.

Izrada odgovarajućih alata za potrebe revitalizacije polova rotora glavnog generatora, u veoma kratkom roku, predstavljao je jedan značajan izazov u realizaciji ovog posla. HE „Đerdap 1“ je sopstvenim resursima izradio neophodan broj alata za presovanja namotaja na jezgru pola za potrebe impregnacije istih (slika 6.).

U toku izvođenja revitalizacionih radova na polovima nije bilo značajnijih problema. Neophodno je bilo sanirati manja oštećenja na isporučenim namotajima nastala, najverovatnije u procesu skladištenja i pakovanja za transport istih iz fabrike proizvođača opreme. Tokom revitalizacije polova došlo je do proboja međuzavojne izolacije na tri pola, što i nije neuobičajeno.

Glavne brige u pripremi i realizaciji ovog posla su bile sledeće:

- Nije izvršena prethodna kontrola i ispitivanje namotaja pre isporuke.
- Isporučen je tačan broj namotaja, bez rezerve.
- Nije bila predviđena isporuka rezervnih jezgara polova.
- Obezbeđivanje potrebnog tehničkog osoblja za realizaciju ovog posla.
- Poštovanje veoma kratkih rokova.
- Tehnički kapacitet domaće fabrike.

Na kraju, može se konstatovati da je domaća fabrika izvršila posao revitalizacije polova rotora glavnog generatora kvalitetno i u roku. Domaća fabrika je obezbedila neophodnu ispitnu i montažnu opremu i angažovala dodatni tehnički i stručni kadar kako bi svi radovi bili izvedeni shodno usvojenom Tehničkom zadatku i Planu kontrole kvaliteta. Nadzor isporučioca opreme nije imao primedbe na kvalitet i dinamiku izvedenih radova, što potvrđuje da je domaća fabrika posedovala odgovarajući kapacitet za izvođenje ovih revitalizacionih radova.

LITERATURA

- [1] Avonmore Electrical, <https://www.avonmore-electrical.com/workshop/our-equipment-processes/vpi/>
- [2] Godfrey & Wing, <https://www.godfreywing.com/blog/understanding-how-vacuum-pressure-impregnation-vpi-works>