

DOI: [10.46793/CIGRE37.A3.03](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A3.03)**A3.03****ODREĐIVANJE PARAMETARA RC FILTERA ZA ZAŠTITU TRANSFORMATORA
ELEKTROLUČNE PEĆI OD SKLOPNIH PRENAPONA****DETERMINATION OF RC FILTER PARAMETERS FOR PROTECTING THE
ELECTRIC ARC FURNACE TRANSFORMER FROM SWITCHING OVERVOLTAGES****Jovan Mikulović, Milenko Jovanović, Tomislav Rajić***

Kratak sadržaj: U postrojenjima elektrolučnih peći transformatori su izloženi opasnosti od sklopnih prenapona koji nastaju prilikom isključenja vakuumskih prekidača, naročito usled višestrukih proboja između njihovih kontakata. U cilju zaštite transformatora primenjuju se RC filteri koji prigušuju visokofrekventne prenapone. U ovom radu prikazan je postupak određivanja parametara RC filtera na osnovu tehničkih podataka i simulacija, kao i verifikacija njihovog dejstva kroz analizu prelaznih pojava i ponašanja u ustaljenom režimu rada. Dodatno su analizirani efekti prenapona u tranzijentnom periodu, kao i uslovi koje RC filter mora zadovoljiti kako bi obezbedio pouzdanu zaštitu transformatora u realnim radnim uslovima.

Ključne reči: transformatori, elektrolučne peći, RC filter

Abstract: In electric arc furnace plants, transformers are exposed to the risk of switching overvoltages that occur during the disconnection of vacuum circuit breakers, particularly due to multiple contact flashovers. To protect transformers, RC filters are employed to suppress high-frequency overvoltages. This paper presents a procedure for determining the parameters of the RC filter based on technical data and simulations, as well as the verification of their effectiveness through the analysis of transient phenomena and steady-state behavior. Additionally, the effects of overvoltages during the transient period are analyzed, as well as the conditions that the RC filter must meet to ensure reliable protection of the transformer under real operating conditions.

Keywords: transformers, electric arc furnaces, RC filter

1. UVOD

U elektroenergetskim sistemima, manipulacija visokonaponskom opremom – uključenje i isključenje prekidača, promenu režima rada transformatora i ostalih sklopnih aparata prouzrokuje prelazne prenapone. Ovi prenaponi mogu imati veoma kratko trajanje, ali veoma

visoke amplitude. U zavisnosti od frekvencije i trajanja, prenaponi mogu izazvati degradaciju izolacije, prekomerno zagrevanje komponenti, pa čak i trenutna oštećenja opreme [1].

Transformatori koji se koriste u postrojenjima elektrolučnih peći izloženi su posebno zahtevnim radnim uslovima, koji uključuju česte promene režima rada, visoke struje i snažne elektromagnetne smetnje. Jedan od ključnih izazova u radu ovih transformatora jeste pojava sklopnih prenapona, koji se javljaju tokom prekidanja struje vakuumskim prekidačima [2, 3]. Ove prenaponske pojave mogu biti naročito izražene u slučaju višestrukih proboja međukontaktnog prostora prekidača, kada dolazi do oscilatornih prelaznih pojava visokih frekvencija i velikih amplituda. Takvi prenaponi mogu dovesti do oštećenja izolacije transformatora, skraćanja njegovog radnog veka, pa čak i do havarijskih ispada celog postrojenja.

Tradicionalna rešenja za zaštitu transformatora, kao što su odvodnici prenapona, često nisu dovoljna da efikasno priguše visokofrekventne komponente prenapona. Zbog toga se u savremenim elektroenergetskim sistemima sve češće primenjuju RC filteri, čija je osnovna uloga da ograniče porast napona i priguše visoke frekvencije koje nastaju tokom sklopnih operacija. Pravilno dimenzionisanje RC filtera zahteva poznavanje karakteristika postrojenja, parametara transformatora, kao i analizu tipičnih prelaznih režima koji se javljaju pri isključenju struje [4].

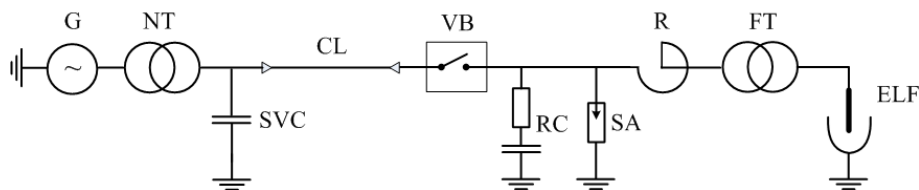
U literaturi postoji više pristupa određivanju optimalnih parametara RC filtera. Neki od njih se zasnivaju na analitičkim formulama koje u obzir uzimaju osnovne parametre sistema, dok drugi uključuju numeričke simulacije u specijalizovanim softverskim paketima. U ovom radu prikazan je postupak određivanja parametara RC filtera za konkretan slučaj transformatora elektrolučne peći snage 160 MVA, uz uvažavanje realnih ograničenja u pogledu dostupnih podataka o sistemu. Takođe, izvršena je verifikacija ponašanja filtera u prelaznim režimima putem analitičkog modelovanja i poređenja sa referentnim vrednostima iz literature. Pored toga, analiziran je i rad filtera u ustaljenom režimu, uzimajući u obzir prisustvo viših harmonika napona, kao i ekstremne vrednosti struja u tranzijentnim uslovima koje RC filter mora da izdrži bez oštećenja [5, 6].

Cilj ovog rada je da se utvrde tehnički opravdani i pouzdani kriterijumi za projektovanje RC filtera koji mogu obezbediti efikasnu zaštitu transformatora u postrojenju elektrolučne peći, i da se na osnovu konkretnih proračuna i simulacija potvrdi njihova primenljivost u praksi.

2. PRORAČUN PARAMETARA RC FILTERA

Za zaštitu transformatora elektrolučnih peći od sklopnih prenapona koriste se RC filteri i odvodnici prenapona. Sklopni prenaponi u postrojenju elektrolučne peći se obično javljaju pri operacijama isključenja vakuumskim prekidačima, a posebno su opasni slučajevi eskalacije napona usled višestrukih ponovnih proboja između kontakata prekidača.

Model postrojenja elektrolučne peći je prikazan na slici 1.



Slika 1: Model postrojenja elektrolučne peći

Oznake na slici 1 imaju sledeća značenja:

G – visokonaponska mreža naznačenog napona 400 kV, snage kratkog spoja 3880 MVA

NT – mrežni transformator 400/33 kV/kV, snage 200 MVA

SVC – postrojenje za regulisanje reaktivne snage i prigušenje harmonika, snage 235 MVA

CL – kablovski vod od SVC postrojenja do vakuumskog prekidača

VB – vakuumski prekidač

RC – RC filter

SA – odvodnik prenapona

R – prigušnica reaktanse 1.8 Ω

FT – transformator elektrolučne peći, snage 160 MVA

ELF – elektrolučna peć impedanse (0.32+j3) mΩ

U [4] je predloženi sledeći izrazi za određivanje parametara RC filtera:

$$C = 90 \cdot \frac{i_{0\%} \cdot A}{f \cdot V_n^2} [\mu F] \quad (1)$$

$$R > 2 \cdot \sqrt{\frac{L_{CL}}{C}} [\Omega] \quad (2)$$

gde su:

$i_{0\%}$ - struja praznog hoda transformatora elektrolučne peći [%]

A – naznačena prividna snaga transformator elektrolučne peći [MVA]

L_{CL} – induktivnost kablovskog voda [H]

V_n – naznačeni primarni napon transformatora elektrolučne peći [kV]

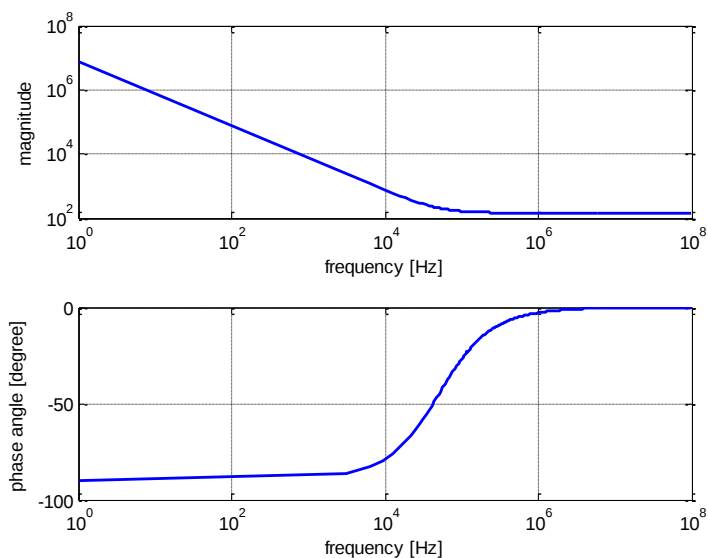
f [Hz] – mrežna frekvencija

Dostupni podaci o transformatoru elektrolučne peći su: naznačena prividna snaga $A=160$ MVA i naznačeni primarni napon $V_n=33$ kV. Može se usvojiti da je struja praznog hoda transformatora $i_{0\%}=10\%$. Takođe, zbog nedostatka podataka, usvaja se da kablovski vod od SVC postrojenja do vakuumskog prekidača ima dužinu 1 km i podužnu induktivnost 0.11551 mH/km. Na osnovu prethodnih podataka dobijaju se sledeće vrednosti za parametre RC filtera:

$$C = 90 \cdot \frac{i_{0\%} \cdot A}{f \cdot V_n^2} = 90 \cdot \frac{0.1 \cdot 160}{50 \cdot 33^2} = 0.0264 \mu F \quad (3)$$

$$R > 2 \cdot \sqrt{\frac{L_{CL}}{C}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0.11551 \cdot 10^{-3}}{0.0264 \cdot 10^{-6}}} = 132,2 \Omega \Rightarrow R = 150 \Omega \quad (4)$$

Na slici 2 su prikazane frekvencijske karakteristike impedanse RC filtera sa izračunatim parametrima $C=0,0264 \mu F$ i $R=150 \Omega$ na osnovu izraza koji su dati u [4].

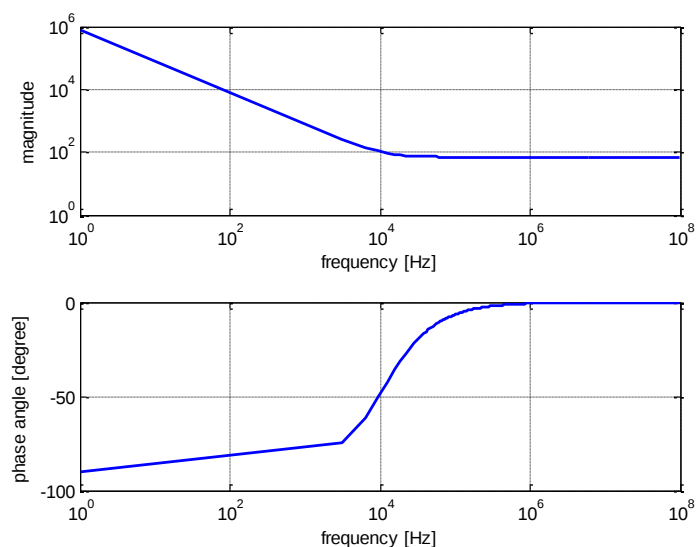


Slika 2: Frekvencijske karakteristike impedanse RC filtera elektrolučne peći sa izračunatim parametrima $C=0,0264 \mu\text{F}$ i $R=150 \Omega$

Na osnovu prikazanih karakteristika na slici 2 može se zaključiti da će filter prigušivati visokofrekventne struje čija je frekvencija veća od $5,05 \cdot 10^4 \text{ Hz}$ („cut off“ frekvencija):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi CR} = 4,02 \cdot 10^4 \text{ Hz} = 40,2 \text{ kHz} \quad (5)$$

I pored izraza (1) i (2) predloženih u [4] za određivanje parametara RC filtera, u [5, 6] su vrednosti parametara korigovane na osnovu izvršenih simulacija i usvojene su sledeće vrednosti: $C=0,2 \mu\text{F}$ i $R=70 \Omega$. Na slici 3 su prikazane frekvencijske karakteristike impedanse RC filtera elektrolučne peći sa korigovanim parametrima.



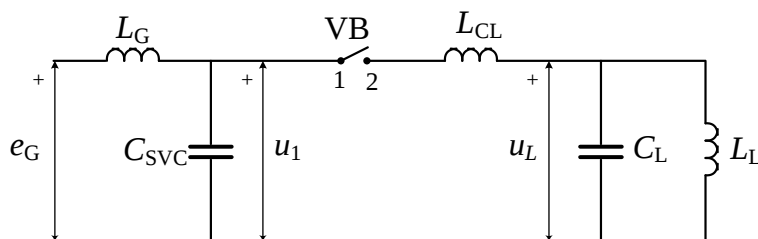
Slika 3: Frekvencijske karakteristike impedanse RC filtera elektrolučne peći sa korigovanim parametrima $C=0,2 \mu\text{F}$ i $R=70 \Omega$

Na osnovu prikazanih karakteristika na slici 3 može se zaključiti da će filter sa korigovanim parametrima prigušivati visokofrekventne struje čija je frekvencija veća od:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi CR} = 1,14 \cdot 10^4 \text{ Hz} = 11,4 \text{ kHz} \quad (6)$$

3. VERIFIKACIJA IZRAČUNATIH PARAMETARA RC FILTERA

Monofazna zamenska šema za analizu sklopnih prenapona pri operaciji isključenja prekidačem VB u postrojenju elektrolučne peći je prikazana na slici 4.



Slika 4: Monofazna zamenska šema za analizu sklopnih prenapona pri operaciji isključenja prekidača u postrojenju elektrolučne peći

Oznake na slici 4 su: e_G elektromotorna sila mreže, L_G ekvivalentna induktivnost mreže i mrežnog transformatora, C_{SVC} kapacitivnost SVC postrojenja, L_{CL} induktivnost kablovskog voda od SVC postrojenja do transformatora elektrolučne peći, C_L ulazna kapacitivnost namotaja transformatora i L_L induktivnost kratkog spoja transformatora uključujući i induktivnost elektrolučne peći.

Nakon prekida struje prekidačem VB, javlja se prelazni proces u konturi koju čine ulazna kapacitivnost namotaja transformatora C_L i ekvivalentna induktivnost transformatora i elektrolučne peći L_L (prelazni proces u LC kolu usled akumulisane energije). Na osnovu raspoloživih podataka ekvivalentna induktivnost iznosi $L_L = 2,18 \text{ mH}$, a za ulaznu kapacitivnost namotaja transformatora usvaja se vrednost $C_L = 5 \text{ nF}$ (preporučene vrednosti su od $0,8 \text{ nF}$ do 10 nF [5, 6]). Frekvencija ovog prelaznog procesa je:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L C_L}} = 4,82 \cdot 10^4 \text{ Hz} = 48,2 \text{ kHz} \quad (7)$$

U slučaju kada je u postrojenju uključena prigušnica R reaktanse $1,8 \Omega$, ekvivalentna induktivnost iznosi $L_L = 7,91 \text{ mH}$, učestanost prelaznog procesa je manja i iznosi:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_L C_L}} = 2,53 \cdot 10^4 \text{ Hz} = 25,3 \text{ kHz} \quad (8)$$

Nakon proboja međukontaktnog prostora u prekidaču VB, javlja se prelazni proces u konturi koju čine kapacitivnost SVC postrojenja C_{SVC} , induktivnost kablovskog voda L_{CL} i ulazna kapacitivnost namotaja transformatora C_L . Frekvencija ovog prelaznog procesa je:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{CL} \frac{C_{SVC} \cdot C_L}{C_{SVC} + C_L}}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{CL} C_L}} = 2,09 \cdot 10^5 \text{ Hz} = 209 \text{ kHz} \quad (9)$$

S obzirom da filter sa korigovanim parametrima $C=0,2 \mu\text{F}$ i $R=70 \Omega$ prigušuje visokofrekventne struje čija je frekvencija veća od 11,4 kHz, može se zaključiti da ovaj RC filter prigušuje prelazni proces koji se javlja nakon prekida struje i prelazni proces nakon proboja međukontaktnog prostora u prekidaču VB. Zbog su RC parametri filtera elektrolučne peći koji se preporučuju isti kao u [5, 6]:

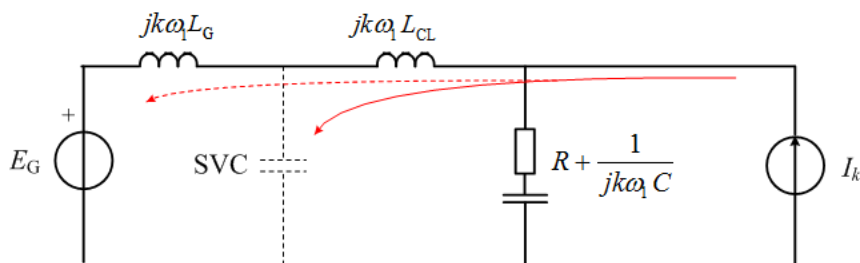
$$C = 0,2 \mu\text{F}$$

$$R = 70 \Omega$$

U slučaju livne peći snage 28 MVA, na osnovu izraza (3) i (4) dobijaju se vrednosti $C=0,0046 \mu\text{F}$ i $R=316 \Omega$. Međutim, i u ovom slučaju se preporučuje filter sa parametrima $C=0,02 \mu\text{F}$ i $R=70 \Omega$.

4. PRORAČUN STRUJE I SNAGE RC FILTERA U USTALJENOM REŽIMU RADA ELEKTROLUČNE PEĆI

U nedostatku mernih podataka o vrednostima viših harmonika struja elektrolučne peći, za potrebe proračuna snage RC filtera usvaja se da napon na mestu priključenja RC filtera ima isti harmonijski sadržaj kao napon na sabirnicama gde je priključeno SVC postrojenje. Ova pretpostavka se zasniva na činjenici će viši harmonici struja većim delom ponirati u SVC postrojenje koje sadrži harmonijske filtere. Čak i kada bi SVC postrojenje bilo isključeno, viši harmonici struja do 50. reda bi imali znatno manju impedansu prema mreži nego kroz RC filtersku granu. Prethodne konstatacije su izvedene na osnovu modela za analizu prostiranja harmonika u postrojenju elektrolučne peći koji je prikazan na slici 5.



Slika 5: Model za analizu prostiranja harmonika u postrojenju elektrolučne peći

Impedanse na slici 5 su izražene u funkciji reda harmonika k :

$$jk\omega_1 L_G = jk \left(\frac{400^2}{3880} \cdot \frac{33^2}{400^2} + 0,13 \frac{33^2}{200} \right) \Omega = jk0,988 \Omega$$

$$jk\omega_1 L_{CL} = jk \cdot 100\pi \cdot 0.11551 \cdot 10^{-3} \Omega = jk0.0363 \Omega$$

$$R + \frac{1}{jk\omega_1 C} = \left(70 - j \frac{15915}{k} \right) \Omega$$

gde su j imaginarna jedinica i ω_1 osnovna kružna učestanost, $\omega_1 = 2\pi f$, $f = 50$ Hz.

Na osnovu podataka o efektivnim vrednostima harmonika napona i poznate impedanse otočne grane RC filtera, mogu se odrediti efektivne vrednosti harmonika struja u otočnoj grani RC filtera koji su posledica izobličenja napona:

$$I_k = \frac{\frac{U_k}{\sqrt{3}}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{k\omega_1 C} \right)^2}} \quad (10)$$

pri čemu je osnovni harmonik napona $U_1 = 33$ kV. Procentalne vrednosti harmonika napona i odgovarajuće struje kroz RC filter su date u tabeli 1.

Tabela 1: Procentalne vrednosti harmonika napona i odgovarajuće struje kroz RC filter

k	U_k [%]	I_k [A]
1	100	1,197
2	4	0,096
3	8	0,287
4	2.5	0,120
5	4	0,239
6	1,5	0,108
7	2,5	0,209
8	1	0,096
9	1,4	0,151
10	1	0,120
11	1	0,131

Efektivna vrednost struja kroz otočne grane RC filtera koja uvažava harmonike do 11. reda je:

$$I = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{11} I_k^2 \right)} = 1,310 \text{ A} \quad (11)$$

Trofazna prividna snaga RC filtera je:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{11} U_k^2 \right)} \cdot \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{11} I_k^2 \right)} = \sqrt{3} \cdot 33190 \cdot 1,310 = 75291 \text{ VA} \approx 75,3 \text{ kVA} \quad (12)$$

Trofazna aktivna snaga RC filtera je:

$$P = 3 \cdot R \cdot \sum_{k=1}^{11} I_k^2 = 3 \cdot 70 \cdot 1,310^2 = 360,2 \text{ W} \approx 0,4 \text{ kW} \quad (13)$$

Totalna reaktivna snaga (neaktivna snaga) RC filtera je:

$$Q_{\text{tot}} = \sqrt{S^2 - P^2} = 75290 \text{ var} \approx 75,3 \text{ kvar} \quad (14)$$

S obzirom da je pri frekvencijama harmonika do 11. reda reaktansa RC filtera znatno veća od njegove rezistansa (aktivne otpornosti), RC filter se ponaša kao kapacitivni element.

Trofazna prividna, aktivna i reaktivna snaga RC filtera pri frekvenciji osnovnog harmonika su:

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot 33000 \cdot 1,197 = 68423 \text{ VA} \approx 68,4 \text{ kVA} \quad (15)$$

$$P_1 = 3 \cdot R \cdot I_1^2 = 3 \cdot 70 \cdot 1,197^2 = 300,9 \text{ W} \approx 0,3 \text{ kW} \quad (16)$$

$$Q_1 = \sqrt{S^2 - P^2} = 68422 \text{ var} \approx 68,4 \text{ kvar} \quad (17)$$

Za određivanje uticaja izvoda napona du/dt na strujno opterećenje RC filtera neophodno je poznavati talasne oblike napona i struja, što zahteva merenje faznih uglova harmonika (pored efektivnih vrednosti).

5. PRORAČUN NAPONA I STRUJE U TRANZIJENTOM PERIODU NAKON ISKLJUČENJA STRUJE

Napon na mestu priključenja RC filtera u tranzijentnom periodu može da se odredi na osnovu slike 4 izjednačavanjem elektromagnetske i elektrostatičke energije pre i posle gašenja električnog luka. Elektromagnetska energija na ekvivalentnoj induktivnosti transformatora i elektrolučne peći L_L neposredno pre “sečenja” struje je:

$$W_L = \frac{1}{2} L_L I_{L0}^2 \quad (18)$$

gde je I_{L0} vrednost struje u trenutku “sečenja”.

Elektrostatička energija na ulaznoj kapacitivnosti namotaja transformatora neposredno pre “sečenja” struje je:

$$W_C = \frac{1}{2} C_L U_{L0}^2 \quad (19)$$

gde je U_{L0} vrednost napona u trenutku “sečenja” struje.

Posle “sečenja” struje elektromagnetska energija iz induktivnosti se pretvara u elektrostatiku energiju. Ukupna elektrostatika energija na ulaznoj kapacitivnosti namotaja transformatora nakon “sečenja” struje je:

$$W_c = \frac{1}{2} C_L U_{L\max}^2 \quad (20)$$

Na osnovu bilansa energija pre i posle “sečenja” struje je:

$$\frac{1}{2} C_L U_{L\max}^2 = \frac{1}{2} C_L U_{L0}^2 + \frac{1}{2} L_L I_{L0}^2 \quad (21)$$

Maksimalni napon na namotaju transformatora nakon “sečenja” struje je:

$$U_{L\max} = \sqrt{U_{L0}^2 + \frac{L_L}{C_L} I_{L0}^2} \quad (22)$$

U najkritičnijem slučaju “sečenja” struje pri maksimumu struje u kolu pri radu elektrolučne peći, odnosno kada je $U_{L0}=0$ i $I_{L0} = \sqrt{2} \cdot 83,4 = 118$ kA (na osnovu podataka proizvođača), maksimalni napon na namotaju transformatora nakon “sečenja” struje, uz zanemarenje otpornosti u kolu, je:

$$U_{L\max} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \cdot I_{L0} = \sqrt{\frac{2.18 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-9}}} \cdot 118 = 77916 \text{ kV} \quad (23)$$

Ovako visoka vrednost napona sa frekvencijom $f_1=48,2$ kHz bi izazvala veliku struju u RC granama filtera vrednosti oko 100 kA. Međutim, izračunata vrednost napona je teorijske prirode, s obzirom da će otpornosti kola uticati na prigušenje prenapona. Osim toga, povećanje napona iznad praga reagovanja odvodnika prenapona dovodi do reagovanja odvodnika i ograničenja prenapona. U slučaju prikidanja struje u trenutku kada je radni napon blizu svoje maksimalne vrednosti, zbog male vrednosti faktora snage mala je i vrednost struje u trenutku “sečenja”, tako da je teško proceniti amplitudu i trajanje oscilatornih komponenti napona i struje, a samim tim je teško proceniti toplotni impuls I^2t i struju koju RC filter može da podnese bez oštećenja. U svakom slučaju, RC filtere treba predvideti za veće strujno opterećenje od izračunatog za ustaljeni režim rada elektrolučne peći.

6. ZAKLJUČAK

RC filteri predstavljaju efikasno rešenje za zaštitu transformatora elektrolučne peći od visokofrekventnih sklopnih prenapona. Na osnovu izvršenih proračuna i simulacija, potvrđeno je da filteri sa parametrima $C=0,2$ μF i $R=70$ Ω obezbeđuju zadovoljavajuću zaštitu transformatora elektrolučne peći u prelaznim režimima, kao i u uslovima ustaljenog rada. Posebna pažnja posvećena je analizi prenapona u trenutku prekida struje, pri čemu su uočene moguće visoke amplitude prenapona koje mogu izazvati kratkotrajno, ali ekstremno

naprezanje opreme. RC filtere treba predvideti za veće strujno opterećenje od izračunatog za ustaljeni režim rada elektrolučne peći. Rezultati ukazuju na to da RC filteri, uz pravilno dimenzionisanje, mogu značajno doprineti produženju radnog veka transformatora i povećanju pouzdanosti rada celog postrojenja.

LITERATURA

- [1] M. Savic, Visokonaponska oprema, Akademska misao, Beograd 2004.
- [2] M. Đurić, V. Ilić, Visokonaponska razvodna postrojenja, AGM Knjiga, Beograd 2017.
- [3] J. Nahman, V. Mijailović, Razvodna postrojenja – drugo izdanje, Akademska misao, Beograd 2015.
- [4] ABB Technical standard 1ZIT 5680–101, Sistemi di protezione dalle sovratensioni durante i transitori di manovra
- [5] R. Faranda, M. Giussani, G. Testin, RC filter to protect industrial arc furnace transformers during switching–off, Proceedings of the 2nd IASME / WSEAS International Conference on Energy & Environment (EE'07), Portoroz, Slovenia, May 15-17, 2007
- [6] S. Cundeva, M. Digalovski, “Calculation of electric arc furnace secondary circuit – analytical and numerical approach, 6TH SAEM and 26th PTZE Symposia, Wroclaw, Poland, June 2016