

Dodatak J

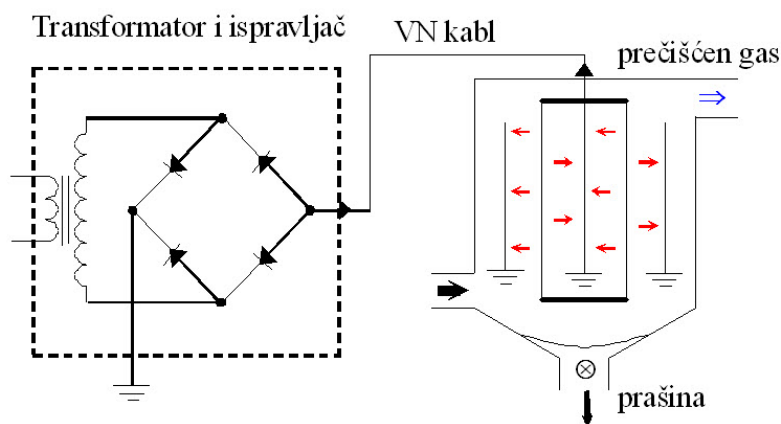
Analiza proboja u postrojenju elektrofiltra

Koautor: Jovan Mikulović

J.1 Princip rada elektrofiltra

Princip elektrostatičkog filtriranja se primenjuje pri odvajanju čvrstih i tečnih čestica iz otpadnih gasova u industrijskim pogonima [118]. Najčešće korišćeni tipovi elektrofiltra su cevasti i pločasti filtri. Elektrostatički filter (skraćeno elektrofilter) se sastoji od jedne ili više uzemljenih elektroda koje se nazivaju kolektorske, odnosno taložne, između kojih struje čestice prašine nošene gasom. Između kolektorskih elektroda su postavljene emisije elektrode na koje je priključen visoki jednosmerni pulsirajući napon (negativan ili pozitivan) dobijen ispravljanjem naizmennog napona industrijske učestanosti, vrednosti 15 do 80 kV. U filtru dolazi do elektrostatičke indukcije i korone usled čega čestice poprimaju određeni električni naboj. Pod delovanjem električnog polja koje vlada u prostoru elektrofiltra naelektrisane čestice skreću i talože se na kolektorskim elektrodama. Povremenim otresanjem specijalnim čekićima (ili ispiranjem) nakupljene čestice se otklanjaju u sabirne prostore. Na slici J.1 je data šema elektrofiltra. Naizmennični napon se dovodi na primarnu stranu visokonaponskog transformatora. Sekundar transformatora je spojen sa monofaznim Grecovim ispravljačem koji se koristi za dobijanje jednosmernog napona. Jedan izvod ispravljača je povezan na masu, a drugi se vodi na emisionu elektrodu filtra.

Efikasnost elektrofiltra zavisi od mnogih parametara kao što su količina i sastav industrijskog gasa, brzina proticanja gasa, temperatura, vlažnost, kvalitet elektroda, [119]. Jedan od problema koji se javlja kod elektrofiltra je u vezi naponom pri kome se po-



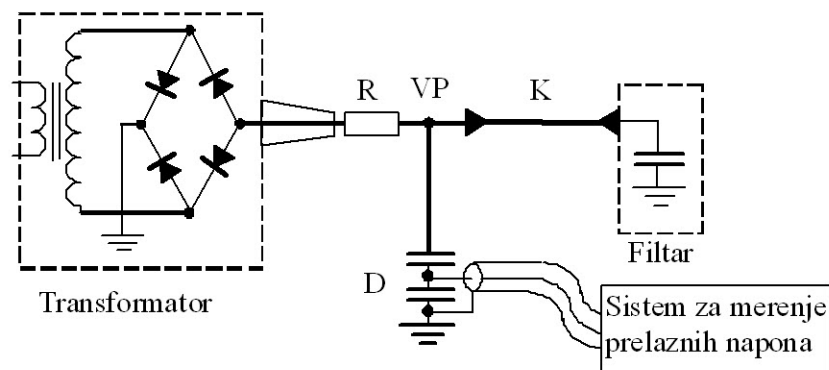
Slika J.1: Princip rada elektrofiltra

javljuje varničenje između elektroda. Optimalan rad elektrofiltra se postiže kada visoki jednosmerni napon prati napon iskrenja. Zbog toga je potrebno da se u svakom trenutku pojave iskre visoki jednosmerni napon naglo smanji da bi se izbegla mogućnost pretvaranja iskre u električni luk pri kome je neefikasno izdvajanje čestica prašine. Cilj je da se iskrenje stalno ponavlja, a da ne pređe u trajni električni luk. Svako iskrenje u elektrofiltru je praćeno pojavom strujnog impulsa. Zbog ovakvog režima rada elektrofiltra postoji mogućnost nastanka visokofrekventnih prelaznih procesa i prenapona koji mogu da oštete elemente za napajanje filterskog postrojenja.

U analiziranom pogonu više puta je dolazilo do kvarova na izolaciji transformatora za napajanje elektrofiltra mlina cementa. Cilj eksperimentalnih i teorijskih istraživanja je bio da se utvrdi da li postoje izraženi prelazni režimi pri pojavi varničenja i električnog luka unutar elektrofiltra i da se predlože mere da se prelazni režimi priguše.

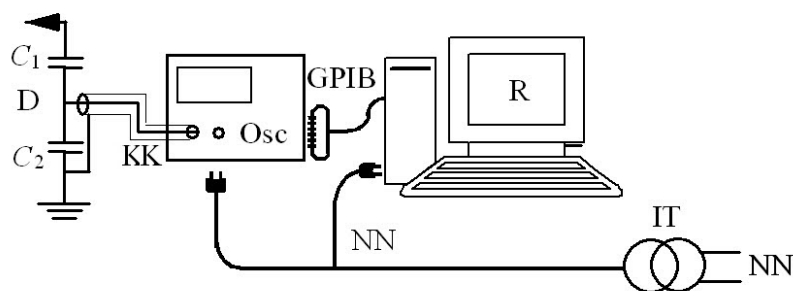
J.2 Opis sistema

Elektrofiltrar se napaja preko visokonaponskog transformatora, nazivnog sekundarnog napona 50 kV, struje 0,75 A i snage 70,3 kVA. Ispravljač u obliku Grecovog spoja nalazi se integralno u posudi transformatora. Na slici J.2 je prikazana zamenska šema postrojenja elektrofiltra i mernog sistema sa oznakom mesta gde je bilo izvršeno merenje. Iza uvodnog izolatora u transformator postavljen je prigušni otpornik $R=40\ \Omega$. Filtarsko postrojenje je povezano preko vazdušnih provodnika VP dužine 10 m i kabla K, dužine oko 60 m. Elektrofiltrar je u zamenskoj šemi predstavljen kondenzatorom koji se u toku rada kratkospaja kada dođe do iskrenja ili pojave električnog luka. D predstavlja kapacitivno delilo napona.



Slika J.2: Zamenska šema postrojenja elektrofiltra i mernog sistema

Merni sistem je sastavljen od kapacitivnog delila napona D, osciloskopa i računara. Detaljna šema mernog sistema je prikazana na slici J.3.



Slika J.3: Detaljna šema mernog sistema

Oznake na slici J.3 imaju sledeće značenje:

C_1 -kondenzator u visokonapornoj grani delila kapacitivnosti $C_1 = 62.5 \text{ pF}$.

C_2 -kondenzator u niskonapornoj grani delila kapacitivnosti $C_2 = 6000 \text{ pF}$.

KK -koaksijalni kabl dužine 20 m

GPIB -oklopljeni komunikacioni kabl GPIB interfejsa.

Osc- Korišćen je digitalni osciloskop koji se sa računarom vezuje preko paralelnog komunikacionog interfejsa GPIB. Za upravljanje i akviziciju podataka korišćen je specijalizovani program sopstvene izrade.

NN -niskonaponski kabl za napajanje oscilskopa i računara.

IT- izolacioni transformator odnosa preobražaja 230/230 V koji služi da galvanski odvoji kolo napajanja instrumenata od napojne mreže zbog moguće pojave razlika potencijala u vidu visokofrekventnih smetnji između uzemljenja delila napona D i napojne mreže NN.

NN-niskonaponsko napajanje mernih uređaja iz lokalne transformatorske stanice.

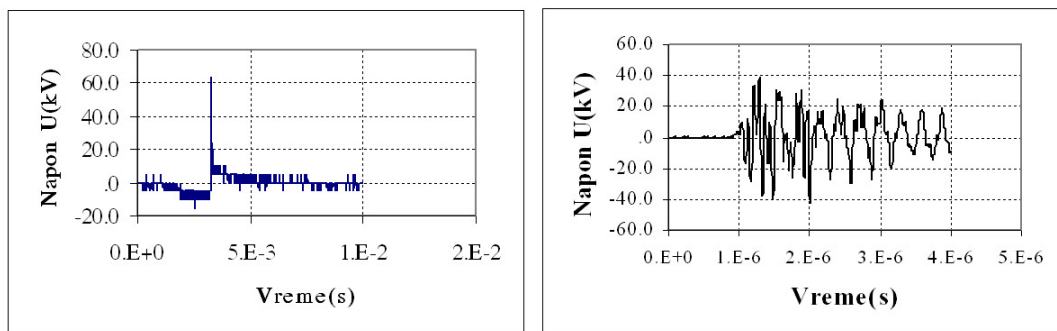
J.3 Rezultati merenja

Merenje prelaznih procesa na napojnom sistemu elektrofiltra rađeno je neposredno pred početak remonta kada je proizvodnja bila zaustavljena. Iz tog razloga je opterećenje filtra bilo značajno smanjeno, pa se očekivalo i da pojave prelaznih procesa u filtru budu znatno manje izražene. Snimanje jednosmernog izlaznog napona rađeno je kapacitivnim delilom napona, koje je pogodno za snimanje brzih prelaznih stanja, ali nije pogodno za snimanje ustaljenih jednosmernih napona. Delilo napona je bilo priključeno na provodnik iza prigušnog otpornika.

Na osnovu snimanja je ustanovljeno da se pri pojavi iskre u filtru pojavljuju oscilatorno prigušeni prelazni režimi veoma visoke frekvencije (reda nekoliko MHz). Amplituda prenapona pri prelaznom procesu se može samo proceniti zbog teškoća oko merenja jednosmernog napona, ali se zato može ustanoviti veoma izražen prelazni režim. Na slici J.4 levo prikazan je tipičan oblik prelaznog režima pri rezoluciji 0.5 ms/podeoku. Može uočiti da se u trenutku pojave varnice javlja izražen pik napona koji pri radnom naponu filtra od 20 kV dostiže čak 61,4 kV. U preostalom intervalu merenja se pojavljuje samo šum usled greške digitalizacije.

Da bi se sagledao tačan oblik brzo-promenljivog napona, izvršeno je snimanje sa velikom rezolucijom. Na slici J.4 desno prikazan je tipičan oblik prelaznog režima pri rezoluciji 500 ns/podeoku. Radni napon filtra je bio 20 kV. Sa snimka se može uočiti da pri prelaznom režimu napon dobija oscilatornu vrednost koja se kreće od -40 kV do + 40 kV. Učestanost prelaznog režima iznosi oko 10 MHz. Snimci levo i desno na slici J.4 odgovaraju različitim registrovanim talasima.

Na osnovu rezultata merenja se može zaključiti da se pri radu filtra, kada se pojavljuje varničenje, događaju prelazni procesi veoma visoke učestanosti, koja se kreće čak do 10 MHz. Amplituda prenapona može višestruko da premaši vrednost radnog napona. Ovakav režim veoma napreže izolaciju, pa je to uzrok pojava kvarova na izolaciji kablova i na ispravljačima. Otežavajuća okolnost je visoka frekvencija prelaznog procesa, koja izaziva dodatna naprezanja usled mogućnosti pojave povećanih dielektričkih gubitaka pri



Slika J.4: Talasni oblik napona prelaznog režima pri rezoluciji 0,5 ms/pod. (levo) i 0,5 μ s/pod. (desno)

visokoj frekvenciji, posebno ako je pojava varničenja česta. Pri velikom opterećenju filtra povećava se učestanost pojave varničenja i prelaznih procesa, čime se može objasniti da se kvarovi uvek pojavljuju na postrojenju koje je najopterećenije.

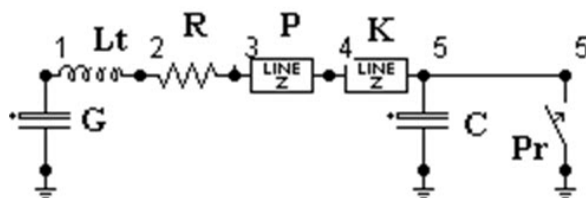
J.4 Računska simulacija prelaznih procesa u elektrofiltru

Izvršena je računarska simulacija prelaznih procesa u elektrofiltrima da bi se sagledali procesi koji dovode do izraženih prenapona i da bi se mogle preduzeti mere za smanjivanje prenapona. Za računarsku simulaciju je korišćen programski paket ATP-EMTP za proračun prelaznih procesa u elektroenergetici, razvijen od Boneville Power Administration, USA, sa predprocesorom za pripremu podataka i upravljanje programom ATPDraw. U programu je kreirano nekoliko ekvivalentnih šema koje su poslužile za modelovanje prelaznih procesa u elektrofiltru.

Na slici J.5 prikazana je ekvivalentna šema u kojoj se napojni transformator modeluje napunjenim kondenzatorom G napona $U_g = -20$ kV. Reaktansa transformatora je usvojena da iznosi $x_t = 0,1\%$. Kada se izračuna induktivnost rasipanja transformatora svedena na visokonaponsku stranu, dobija se $L_t = 1.13$ H. Iza induktivnosti L_t kojom se modeluje transformator nalazi se otpornik čija je otpornost $R = 40 \Omega$. Izvor je modelovan velikim kondenzatorom od $200 \mu\text{F}$ da bi se izbegle teškoće oko modelovanja ispravljača u obliku Grecovog spoja, a efekat je potpuno isti jer se kondenzator tako velike kapacitivnosti ponaša kao idealan naponski generator.

Oznake na slici J.5 imaju sledeće značenje:

G - kondenzator koji zamenjuje elektromotornu silu transformatora temene vrednosti



Slika J.5: Zamenska šema električnog napojnog sistema filtra kao ekranski prikaz iz programa ATPDraw

$E=20$ kV,

L_t - induktivitet transformatora $L_t = 1.13$ H,

R - otpornik otpornosti $R=40$ Ω .

P - vazdušni provodnik dužine $d=20$ m i karakteristične impedanse $Z_c=500$ Ω .

K - izolovan kabl dužine $d=60$ m i karakteristične impedanse $Z_c=40$ Ω .

C - kapacitet filtra čija je vrednost usvojena da iznosi $C=1$ nF. Vrednost kapaciteta ne utiče na prelazni režim jer je u trenutku kada nastupa prelazni režim kondenzator C premošćen prekidačem.

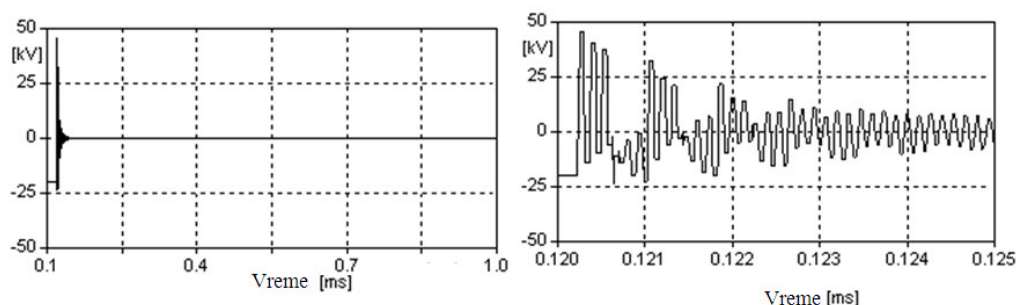
Pr - prekidač koji simulira svojim zatvaranjem nastanak kratkog spoja u filtru usled varnice.

Registracija napona vršena je u tačkama 2 koja se nalazi na izlazu iz ispravljača unutar transformatora, tački 3 koja se nalazi iza otpornika i tački 4 koja se nalazi na početku kabla, kao i tački 5 koja se nalazi iza kabla ispred filtra.

J.4.1 Prelazni procesi pri uspostavljanju iskre

Prelazni proces pri uspostavljanju iskre se modeluje kontaktima prekidača koji premošćuju kondenzator koji modeluje filter. Na slici J.6 prikazan je izračunati prelazni napon registrovan ispred otpornika R u tački 2 pri uspostavljanju iskre, sa malom vremenskom rezolucijom (levo) i velikom vremenskom rezolucijom (desno).

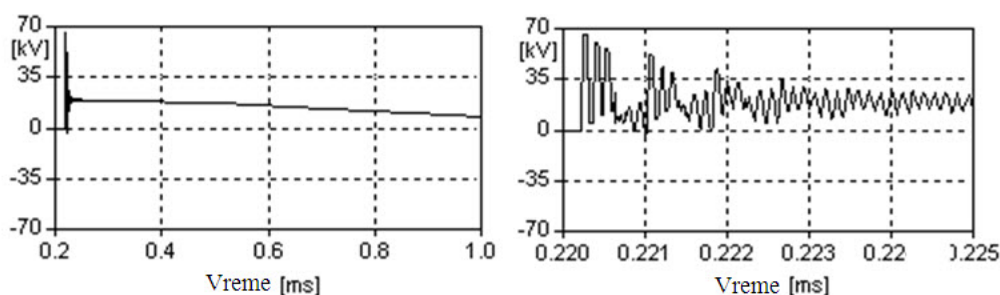
U ovom primeru došlo je do izraženih oscilacija, pri kojima je napon varirao do $U_{max}=48.6$ kV. Napon u tački 3 ima veoma sličan oblik. Napon teži sa vrednosti -20 kV da padne na nulu pri uspostavljanju iskre i tom prilikom zaosciluje oko nulte vrednosti koju postiže posle završetka prelaznog režima.



Slika J.6: : Izračunati napon u tački 2 na šemi sa slike 5 (levo sa manjom vremenskom rezolucijom, desno sa većom vremenskom rezolucijom)

J.4.2 Prelazni procesi pri prekidanju iskre

Prekidanje iskre se modeluje isključenje prekidača koji prespaja kondenzator. Proračuni su rađeni prema zamenskoj šemi na slici J.5. Modelovanje isključenja vršeno je u ustaljenom stanju kada kroz kolo sa prespojenim elektrofiltrom protiče jednosmerna struja. Na slici J.7 prikazana je vremenska promena u tački 2 sa malom (levo) i velikom rezolucijom (desno). U tačkama 2 i 3 dobijena je gotovo identična promena napona. Maksimalni napon iznosi u tački 2 $U_{\max}=65.6$ kV, u tački 3 $U_{\max}=65.5$ kV.

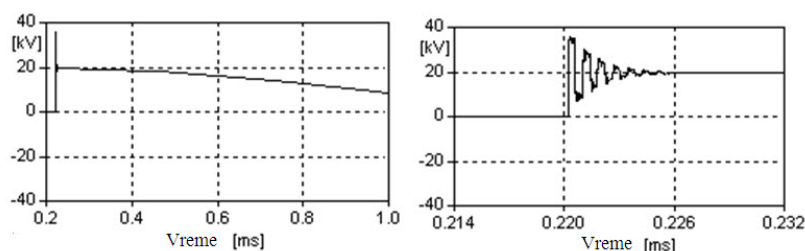


Slika J.7: Vremenska promena napona u tački 2 pri prekidanju varnice (mala vremenska rezolucija - levo, velika - desno)

U tački 4 na kablovskoj glavi oblik napona prikazan je na slici J.8, levo sa malom rezolucijom i desno sa velikom vremenskom rezolucijom. Maksimalni prenapon u čvoru 4 je 34.7 kV.

Može se uočiti da i pri uspostavljanju i pri prekidanju varnice dolazi do izraženog prelaznog procesa, koji se odvija sa visokom učestanošću.

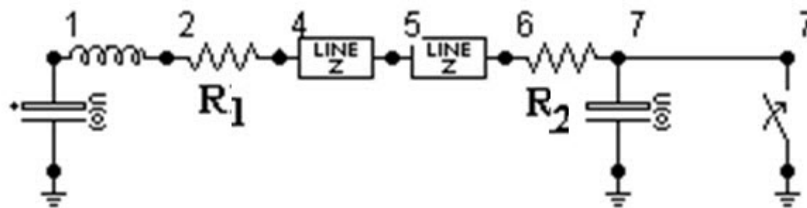
Pri prekidanju varnice napon teži da sa nulte vrednosti dostigne vrednost od 20 kV, što pistiže kroz prelazni režim.



Slika J.8: Napon u čvoru 4 na kablovskoj glavi pri prekidu varnice (levo - mala vremenska rezolucija, desno - velika vremenska rezolucija)

J.5 Mogućnost prigušenja prelaznih procesa u elektro-filtru

Veoma brzi prelazni procesi na elektrofiltru mogu se prigušiti ugradnjom dodatnih elemenata. Najjednostavniji način je postavljanje dodatnih prigušnih otpornika. Na slici J.9 prikazana je zamenska šema sa dodatnim prigušnim otpornikom R_2 koji je postavljen između kablovske završnice sa strane filtra i samog filtra.



Slika J.9: : Ekvivalentna šema po kojoj je vršen proračun sa dodatnim prigušnim otpornikom R_2

Oznake na slici J.9 imaju sledeće značenje: R_1 -prigušni otpornik iza transformatora, R_2 - prigušni otpornik ispred filtra.

J.5.1 Uspostavljanje iskre

Proračun je vršen sa više vrednosti otpora R_1 i R_2 . Na slici J.10 prikazan je slučaj prelaznog napona kada je $R_1 = 40 \Omega$ i $R_2 = 40 \Omega$. Može se uočiti da je došlo do značajnog smanjenja prenapona. Upoređivanjem slike J.6 na kojoj su prikazani naponi kada postoji samo otpornik R_1 sa napojne strane sa slikom J.10, na kojoj je prikazan prelazni napon kada postoji i otpornik R_2 sa strane filtra, može se uočiti veoma značajno smanjivanje prenapona uvođenjem dodatnog otpornika sa maksimalne vrednosti prenapona od 48.6 kV

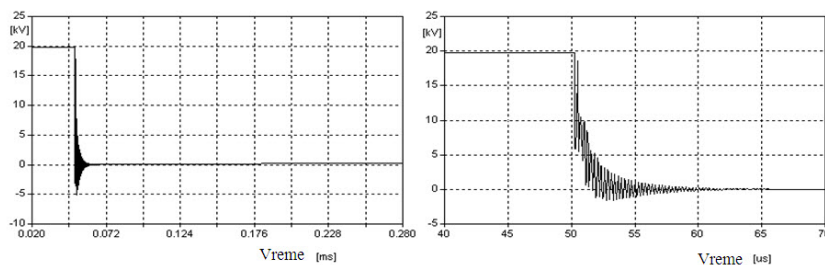
u slučaju samo jednog otpornika, napon je opao na $U_{min}=5.1$ kV. Upoređujući slike J.10 i J.6 može se takođe uočiti da u slučaju primene samo jednog otpornika oscilacije imaju znatno višu amplitudu nego što je napojna vrednost napona i odvijaju se na obe strane u odnosu na inicijalnu vrednost napona. Postavljanjem dodatnog otpornika oscilacije se događaju samo posle kratkog spoja usled iskre oko nulte vrednosti napona. Izvršena je varijacija vrednosti dodatnih otpornika R_1 i R_2 da bi se sagledao njihov uticaj. U tabeli J.1 prikazani su rezultati kada je varirana otporost otpornika R_1 , a otpornik R_2 nije postojao.

Tabela J.1: Maksimalni prenapon pri prelaznom režimu za različite vrednosti otpora R_1 , kada je $R_2 = 0$

R_1 (Ω)	40	100	200
R_2 (Ω)	0	0	0
U_{Max2} (kV)	54.6	54.6	54.6
U_{Max3} (kV)	54.6	54.6	54.6
U_{Max4} (kV)	15.7	15.7	15.7

Može se uočiti da vrednost otpornika R_1 apsolutno nema nikakvog uticaja na visinu prenapona.

Na slici J.10 prikazan je slučaj kada je vrednost otpora $R_2 = 80 \Omega$. Može se uočiti da je prelazni proces u ovom slučaju gotovo potpuno prigušen. Napon posle uspostavljanja iskre varira oko nule i veoma se brzo prigušuje. Maksimalno previšenje napona na suprotnu stranu od vrednosti napojnog napona, koji je 20 kV, iznosi svega $U_{min}=-1.5$ kV. Proračun je ponovljen kada je otpornik otpornosti $R_1 = 40 \Omega$, a vrednost otpornosti otpornika R_2 je varirana. Rezultati proračuna previšenja na suprotnu stranu od napojnog napona su dati u tabeli J.2 za tačku 3 sa šeme.



Slika J.10: : Prelazni procesi pri uspostavljanju iskre kada je kada je $R_1=40$ i $R_2=80$ (levo veliki korak proračuna, desno mali korak)

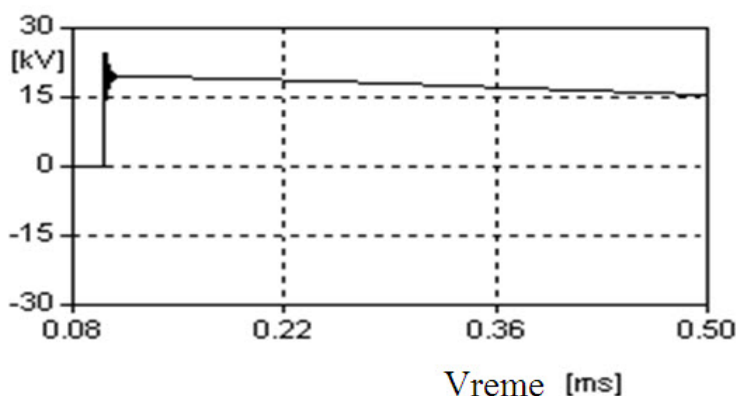
Naponi u tačkama 2 i 3 se veoma malo razlikuju. Na osnovu Tabele J.2 se može zaključiti da otpornik R_2 postavljen između kablovske završnice i filtra ima veoma pogodno dejstvo na prigušenje prenapona.

Tabela J.2: Vrednost previšenja napona na suprotnu stranu od napojnog napona u čvorovima 2, 3 i 4

R_1 (Ω)	40	100	200
R_2 (Ω)	40	80	120
U_{Max2} (kV)	5.06	1.528	0.58
U_{Max3} (kV)	5.06	1.531	0.56
U_{Max4} (kV)	0.975	0.376	0.321

J.5.2 Prekid iskre

Proračuni su urađeni u slučaju prekida iskre za više vrednosti otpora R_1 i R_1 . Na slici J.11 prikazan je slučaj prekida iskre kada je $R_1 = 40 \Omega$ i $R_2 = 40 \Omega$.

Slika J.11: Prelazni proces u tački 3 pri prekidu iskre kada je $R_1 = 40 \Omega$ i $R_2 = 40 \Omega$ Tabela J.3: Maksimalni prenaponi u tačkama 2, 3 i 4 za različite vrednosti otpornika R_2 pri prekidu iskre

R_1 (Ω)	40	40	40
R_2 (Ω)	40	80	120
U_{Max2} (kV)	24.6	20.8	20.0
U_{Max3} (kV)	24.7	20.8	20.1
U_{Max4} (kV)	19.5	18.5	19.3

Ba osnovu tabele J.3 može se zaključiti da pri prelaznom režimu napon vrlo malo osciluje oko ustaljene vrednosti od 20 kV za bilo koju vrednost otpornika R_2 . Usvaja se da je optimalna vrednost otpornika $R_2 = 40 \Omega$ iz praktičnih razloga jer je jednaka otporniku R_1 . Optimalna vrednost otpornika je jednaka karakterističnoj impedansi kabla jer sprečava višestruke refleksije.

J.6 Zaključak

Sprečavanje oscilacija pri radu elektrofiltra može se postići postavljanjem prigušnih otpornika ispred i iza napojnog kabla za filter identične otpornosti kao što je karakteristična impedansa kabla.

Zahvalnica

Primer je nastao na zahvaljujući istraživanja uzroka čestih kvarova na kablju za napajanje elektrofiltra u Fabrici cementa "Lafarge" u Beočinu 2005 god.