

# Optimiranje izolacije kondenzatorskog tipa od uljem impregniranog papira

---

**Filipović-Grčić, Dalibor**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2010**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:034018>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-10**



*Repository / Repozitorij:*

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA**

Dalibor Filipović-Grčić

**OPTIMIRANJE IZOLACIJE  
KONDENZATORSKOG TIPA OD ULJEM  
IMPREGNIRANOG PAPIRA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Zagreb, 2010.

Doktorska disertacija je izrađena na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Zavodu za osnove elektrotehnike i električka mjerenja te na Zavodu za transformatore Končar – Instituta za elektrotehniku.

Mentor: Prof. dr. sc. Željko Štih, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb

Mentor: dr. sc. Miroslav Poljak, Končar – Institut za elektrotehniku

Doktorska disertacija ima 141 stranicu

Disertacija br.:

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Dr.sc. Josip Butorac, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
2. Dr.sc. Željko Štih, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. Dr.sc. Miroslav Poljak, znanstveni suradnik  
Končar – Institut za elektrotehniku Zagreb
4. Dr.sc. Ivo Uglešić, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
5. Dr.sc. Damir Ilić, izvanredni profesor  
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Dr.sc. Josip Butorac, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
2. Dr.sc. Željko Štih, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. Dr.sc. Miroslav Poljak, znanstveni suradnik  
Končar – Institut za elektrotehniku Zagreb
4. Dr.sc. Ivo Uglešić, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
5. Dr.sc. Damir Ilić, izvanredni profesor  
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva

Datum obrane disertacije: 15. listopada 2010. godine

*Ova disertacija je nastavak istraživanja na području uljno-papirnih izolacijskih sustava kondenzatorskog tipa koja se već dugi niz godina provode u Zavodu za transformatore Končar-Instituta za elektrotehniku.*

*Zahvaljujem se mentorima prof.dr.sc. Željku Štihu i dr.sc. Miroslavu Poljaku na pomoći i savjetima tijekom izrade ovog rada.*

*Prof.dr.sc Josipu Butorcu i dr.sc. Antunu Mikuleckom zahvaljujem na kritičkim napomenama i vrijednim sugestijama.*

*Zahvaljujem se kolegama iz Visokonaponskog laboratorija Končar-Instituta za elektrotehniku na pomoći i podršci te kolegama iz Končar – Mjernih transformatora i Končar-Energetskih transformatora koji su izradili modele izolacije za eksperimentalna istraživanja.*

*Na kraju, zahvaljujem se svojoj obitelji na strpljenju i potpori.*

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Uljno-papirna izolacija kondenzatorskog tipa.....	4
2.1 Visokonaponski provodnici kondenzatorskog tipa .....	6
2.2 Visokonaponski mjerni transformatori.....	10
3. Istraživanja na modelima izolacije .....	18
3.1 Definiranje modela izolacije.....	20
3.2 Ispitivanja na modelima izolacije .....	21
3.3 Obrada rezultata ispitivanja modela .....	26
3.4 Numerički proračun električnog polja za modele .....	29
4. Dielektrička naprezanja izolacijskog sustava .....	33
4.1 Dielektrička naprezanja u zraku .....	34
4.2 Dielektrička naprezanja u ulju.....	38
4.3 Dielektrička naprezanja u uljem impregniranom papiru .....	41
5. Dielektrička naprezanja uljno-papirne izolacije mjernih transformatora.....	50
5.1 Proračun potencijala i jakosti električnog polja .....	51
5.2 Utjecaj radijusa obloga na raspodjelu napona .....	55
5.3 Utjecaj broja obloga na raspodjele polja i potencijala .....	71
5.4 Utjecaj duljina obloga na raspodjele polja i potencijala.....	77
6. Optimiranje parametara obloga mjernih transformatora.....	86
6.1 Program za optimiranje parametara obloga mjernih transformatora .....	86
6.2 Primjena programa za optimiranje parametara obloga .....	91
6.3 Optimiranje duljina obloga primjenom genetskog algoritma.....	99
6.4 Eksperimentalna provjera rezultata optimiranja .....	104
7. Dielektrička naprezanja uljno-papirne izolacije provodnika .....	106
7.1 Proračun parametara obloga.....	107
7.2 Izbor ulaznih podataka za proračun parametara obloga.....	113
7.3 Prilagodba parametara obloga tehnološkim tolerancijama .....	116
7.4 Optimiranje kondenzatorskog tijela 245 kilovoltnog provodnika.....	118
7.5 Izbor ulaznih parametara genetskim algoritmom .....	122
7.6 Eksperimentalna provjera rezultata optimiranja .....	124
8. Zaključak.....	127
Literatura.....	130
Sažetak .....	134
Summary.....	135

Ključne riječi - Keywords .....	136
Životopis.....	137
Curriculum Vitae.....	138
Popis oznaka.....	139

## 1. Uvod

Izolacijski sustavi visokonaponskih uređaja izloženi su trajno u pogonu nazivnom izmjeničnom naponu industrijske frekvencije, ali i povremenim prenaponima koji ih mogu ugroziti. Prenapone možemo grubo podijeliti na atmosferske (trajanja do nekoliko desetaka mikrosekundi), sklopne (trajanja do nekoliko milisekundi) i privremene koji mogu trajati i nekoliko minuta, a frekvencija im je bliska nazivnoj. Izolacija treba biti dimenzionirana tako da izdrži dielektrička naprezanja kojima može biti izvrgnuta kako za vrijeme dielektričkih ispitivanja tako i u pogonu. Norme za visokonaponsku opremu definiraju stupanj izolacije koji je određen s maksimalnim naponom za opremu, podnosivim naponom industrijske frekvencije, podnosivim atmosferskim i sklopnim udarnim naponom. Oprema se podvrgava rutinskim i tipskim ispitivanjima pri čemu se rutinskim ispitivanjima podvrgava svaki, dok se tipska ispitivanja provode samo na jednom predstavniku određenog tipa.

Dielektričkih naprezanja uglavnom nemaju ravnomjernu raspodjelu. Zbog toga je redovito jedan manji dio izolacije izvrgnut izrazito jakim naprezanjima dok je ostatak napregnut znatno ispod dozvoljenih. Kako bi se reducirao obujam izolacijskog sustava, a dielektrička naprezanja ostala u okviru dozvoljenih, potrebno je imati uvid u raspodjele potencijala i električnih polja te u mogućnosti njihove kontrole.

U svrhu poboljšanja izolacijskih sustava i povećanja njihove pouzdanosti potrebno je poznavati mehanizme koji uzrokuju kvarenje izolacijskih svojstava te načine njihove kontrole. Glavni uzrok naprezanja svakako je električno polje pod čijim utjecajem kroz izolaciju teče struja, dolazi do polarizacije, moguća je pojava parcijalnih izbivanja, a u konačnici može doći i do proboja čime se u potpunosti gube funkcionalna svojstva uređaja. Jakost električnog polja pri kojoj dolazi do proboja ovisi o čitavom nizu čimbenika kao što su raspodjela potencijala, promjene električnog polja zbog gibanja prostornog naboja, polaritet i valni oblik primjenjenog napona, svojstva izolacijskih materijala ili njihovih kombinacija itd. I danas postoji dosta nepoznanica o fizikalnom mehanizmu gibanja naboja i popratnim pojavama koje to gibanje uzrokuje pa se kriteriji za dimenzioniranje izolacije temelje na rezultatima ispitivanja modela izolacije i iskustvu [1].

Pouzdana izolacijski sustavi visokonaponskih uređaja nužni su za normalan pogon elektroenergetskog sustava. Njihovi kvarovi uzrokuju štetu na samom



uređaju, ali znatno veće štete mogu nastati zbog prekida opskrbe potrošača električnom energijom. Životni vijek električnih uređaja poput energetske i mjernih transformatora, za koje se postavljaju zahtjevi da u pogonu provedu više desetaka godina, gotovo u potpunosti je uvjetovan stanjem izolacije. Stoga ne čude strogi zahtjevi prilikom dielektričkih ispitivanja tijekom kojih se izolacija podvrgava izmjeničnim i udarnim naponima znatno većih vrijednosti od pogonskih.

Uljno - papirni izolacijski sustavi kondenzatorskog tipa u upotrebi su dugi niz godina i imaju široku primjenu u visokonaponskim uređajima kao što su mjerni transformatori, provodnici, visokonaponski kondenzatori i sl. Papir predstavlja jedan od najboljih i najjeftinijih izolacijskih materijala, odlikuje se velikom dielektričkom čvrstoćom i malim gubitcima. U kombinaciji s transformatorskim uljem tvori izolacijsko sredstvo izuzetnih svojstava. Unutar uljno-papirne izolacije umeću se kondenzatorske obloge (elektrostatski zaslони, ekrani) koje čine sustav cilindričnih kondenzatora, a zadatak im je ujednačiti dielektrička naprezanja. Geometrijski parametri obloga, tj. njihova duljina, aksijalni razmaci među njima i radijus na koji se umeću, određuju vrijednosti kapaciteta unutar izolacijskog sustava pa time direktno utječu na raspodjele polja i potencijala. Noviji programski paketi za numerički proračun električnih polja temeljeni na metodi konačnih elemenata omogućuju detaljno modeliranje i analizu naprezanja ovakvih sustava. Prikladnim izborom parametara kondenzatorskih obloga moguće je ujednačiti naprezanja duž sustava i smanjiti vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja te ostvariti određene uštede izolacijskih materijala.

Tradicionalni pristup dimenzioniranju izolacijskih sustava kondenzatorskog tipa pažnju posvećuje ujednačenju aksijalnih i radijalnih naprezanja, ne uzimajući u obzir polja na rubovima obloga. Međutim, pokazat će se kako su kritična mjesta unutar uljno-papirne izolacije upravo rubovi kondenzatorskih obloga na kojima se javljaju jaka lokalna električna polja. Jakost polja na rubu obloge pri kojoj je vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja dovoljno mala u vremenu od jedne minute je novi kriterij korišten za dimenzioniranje izolacije umjesto starog koji uzima u obzir dozvoljena radijalna naprezanja.

Tema ove radnje je ujednačenje raspodjela napona i električnih polja duž uljno-papirnih izolacijskih sustava kondenzatorskog tipa s pomoću kondenzatorskih obloga. Obrađeni su izolacijski sustavi visokonaponskih mjernih transformatora i transformatorskih provodnika. Cilj je odrediti novi kriterij za naprezanja na rubovima obloga te utvrditi postupke izbora parametara obloga koji će omogućiti redukciju

obujma izolacijskog sustava i/ili povećanje pouzdanosti kroz smanjenje vjerojatnosti pojave parcijalnih izbijanja. Ako je vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja pri ispitivanju podnosivim naponom industrijske frekvencije dovoljno mala, smatra se kako je tada pouzdanost izolacijskog sustava visoka kroz njegov vijek trajanja.

## **2. Uljno-papirna izolacija kondenzatorskog tipa**

U uljno-papirnoj izolaciji papir razdvaja ulje u više tankih slojeva onemogućujući stvaranje lanaca nečistoća koje se orijentiraju u smjeru električnog polja. Izrađuje se od natronsko-sulfatne celuloze debljine od 0,05 mm do 0,150 mm. Relativna dielektričnost ulja iznosi približno 2,2 i znatno je manja od dielektričnosti krutih izolacijskih materijala pa se u njihovoj kombinaciji napon raspodijeli tako da veći dio otpada na ulje. Ujedno je probojna čvrstoća ulja manja od one krutih izolacija pa se povećava opasnost od proboja.

Da bi se napon što ravnomjernije raspodijelio nužno je da dielektričnost krute izolacije bude što bliža dielektričnosti ulja, a tom zahtjevu najbolje odgovara natron papir. Papir mora biti što homogeniji, kemijski čist i porozan kako bi što bolje upijao ulje. Neki od nedostataka uljno-papirne izolacije su zapaljivost i opasnost od istjecanja ulja.

Od uljno-papirne izolacije zahtijeva se da ima velik otpor izolacije te što manje gubitke. Otpor izolacije određuje se UI-metodom, a mjeri se tisuću ili više sekundi nakon uključanja istosmjernog napona kako bi se smanjio učinak polarizacije. Gubitci u izolaciji mogu se podijeliti na konduktivne i one uzrokovane polarizacijom.

Kada se na izolaciju narine izmjenični napon poteći će struja koja ima dvije komponente, radnu i jalovu, a njihov omjer definiran je kao faktor dielektričkih gubitaka  $\tan\delta$ . Za nove uljno-papirne izolacije on iznosi otprilike od 0,002 do 0,005 i znatno raste s povećanjem udjela vlage, temperature i produkta starenja, zbog čega je relevantan dijagnostički parametar za određivanje stanja izolacije.

Dielektrička čvrstoća papira impregniranog uljem uvelike se smanjuje s porastom sadržaja vode pa je stoga nužno izolacijski sustav što je moguće bolje osušiti, ali isto tako i onemogućiti prodor vlage za vrijeme pogona što se postiže hermetičkim poklopcima i kvalitetnim brtvilima. Sušenje izolacijskog sustava (Slika 2.1) dugotrajan je proces koji se odvija sve dok se ne ustali otpor izolacije i faktor dielektričkih gubitaka [2].



*Slika 2.1 – Kondenzatorska tijela provodnika u peći za sušenje*

Uljno-papirni izolacijski sustavi izloženi su u pogonu brojnim dielektričkim naprezanjima koja ih mogu oštetiti ili u potpunosti uništiti. Nužno je stoga pri dimenzioniranju izolacije voditi računa o jakosti električnog polja koja ne smije prekoračiti kritičnu vrijednost i dovesti u opasnost električki uređaj i opskrbu potrošača. Jakost električnog polja jednaka je negativnom gradijentu potencijala pa je poželjno ostvariti što linearniju raspodjelu potencijala duž izolacijskog sustava.

Probojna čvrstoća uljno-papirne izolacije u smjeru okomitom na slojeve papira (radijalni smjer) višestruko je veća od klizne čvrstoće uzduž slojeva papira (aksijalni smjer). Zato je potrebno osigurati da slojevi papira što bolje slijede ekvipotencijalne linije kako klizna naprezanja ne bi premašila maksimalne dozvoljene vrijednosti. Izolacija od papirne bandaže namotana strojno ili ručno iz uskih traka papira (mjerni transformatori) ili bala (provodnici) najbolje odgovara tom zahtjevu. U bandažu se umeću vodljive ili poluvodljive obloge koje ujednačavaju naprezanje izolacije pri izmjeničnim i udarnim naponima. U ovom radu razmatrat će se dielektrička naprezanja izolacijskih sustava:

- visokonaponskih provodnika kondenzatorskog tipa koji su namijenjeni upotrebi na energetskim transformatorima,
- visokonaponskih mjernih transformatora

U narednim poglavljima dan je kratak pregled konstrukcije i primjene navedenih uređaja.

## **2.1 Visokonaponski provodnici kondenzatorskog tipa**

Provodnik definiramo kao napravu koja omogućava prolazak vodiča kroz barijeru, npr. kroz kotao energetskog transformatora. Njegova zadaća je prijenos energije unutar ili van zatvorenog prostora vodičem koji može biti sastavni dio provodnika ili se vodič provlači kroz njegov centralni dio. Za potrebe tržišta proizvode se provodnici za nazivne izmjenične napone do 1100 kV i istosmjerne do 800 kV te struje do nekoliko desetaka kiloampera. Rutinska i tipska ispitivanja provodnika definirana su međunarodnom normom IEC 60137:2008 [3], a ona koja se odnose na ispitivanje izolacijskog sustava su:

- ispitivanje podnosivim naponom industrijske frekvencije u suhom ili na kiši,
- dugotrajno ispitivanje podnosivim naponom industrijske frekvencije,
- ispitivanje udarnim atmosferskim i sklopnim naponom,
- mjerenje kapaciteta i kuta dielektričkih gubitaka,
- mjerenje parcijalnih izbijanja,
- ispitivanje izolacije mjernog/naponskog priključka.



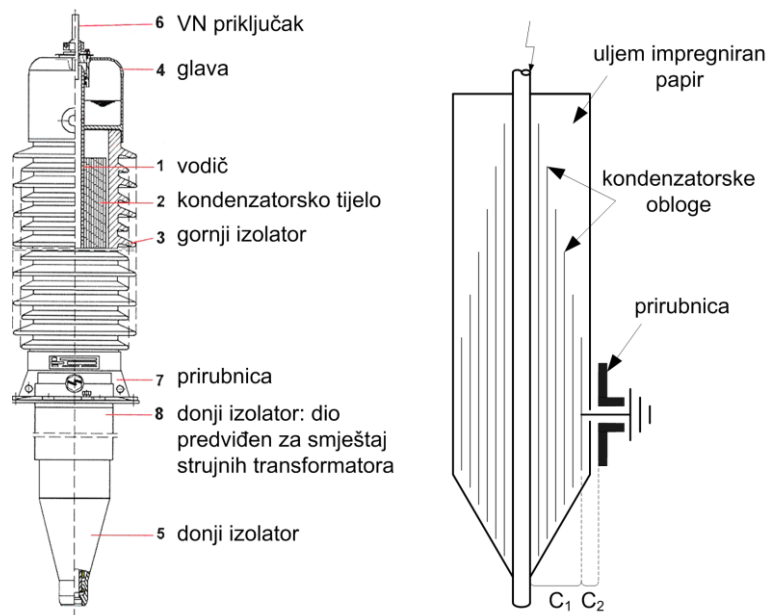
*Slika 2.2 – Energetski transformator 350 MVA s provodnicima za  $U_m = 420$  kV*

Slika 2.2 prikazuje energetski transformator 350 MVA na kojem su u prvom planu vidljiva tri provodnika za najviši napon opreme  $U_m = 420$  kV s porculanskim izolatorima.

Provodnike možemo klasificirati:

- Prema izolacijskim materijalima u prostoru koje povezuju (npr. zrak-ulje, zrak-zrak, SF<sub>6</sub>-ulje itd).
- Prema izvedbi izolacijskog sustava razlikujemo provodnike čija se izolacija sastoji od jednog ili više dielektrika (*solid bushing*), a nisu kondenzatorskog tipa i provodnike čiji je izolacijski sustav kondenzatorskog tipa (*capacitance-graded bushing*). Prvi su najčešće keramički provodnici načinjeni od porculana za upotrebu u distribucijskim mrežama.
- Prema materijalima od kojih su izrađeni. Npr. svi se kondenzatorski provodnici proizvode motanjem papira i obloga na središnju cijev, a papir može biti obložen smolom (RBP – *resin-bonded paper*), impregniran uljem (OIP – *oil-impregnated paper*) ili impregniran smolom (RIP – *resin-impregnated paper*). RPB provodnici s obzirom na korištenu tehnologiju smatraju se zastarjelim, a karakteriziraju ih visoke vrijednosti parcijalnih izbijanja koja se javljaju u zraku zaostalom između slojeva papira pa su ih neki proizvođači odavno prestali proizvoditi.

Glavni dijelovi (Slika 2.3) provodnika kondenzatorskog tipa su središnja metalna cijev ili središnji vodič (1) na kojeg se namata kondenzatorsko tijelo (2) od natron papira.



Slika 2.3 - Dijelovi kondenzatorskog provodnika

Gornji izolator (3) povezan je glavom provodnika (4) sa središnjom cijevi. Donji izolator (5), koji se najčešće izrađuje od porculana ili epoksidne smole, učvršćuje donji dio i odjeljuje izolacijski medij provodnika od okolnog medija tj. transformatorskog ulja u kotlu. Visokonaponski priključak (6) smješten je na vrhu provodnika dok je niskonaponski priključak, koji se ovisno o izvedbi koristi za dijagnostička ispitivanja (mjerni priključak) ili kao naponski izvor (naponski priključak), izveden kroz prirubnicu (7). Prirubnica služi prvenstveno kako bi se provodnik montirao na svoju radnu poziciju, npr. kupolu energetskog transformatora. Obično je izrađena od aluminijske legure, naročito za provodnike koji imaju velike nazivne struje, kako bi se smanjili gubici poradi djelovanja magnetskog polja. Dio donjeg izolatora (8) predviđen je za smještaj strujnih transformatora [4]. Slika 2.4 prikazuje umetanje kondenzatorskih obloga u papirnu izolaciju za vrijeme namatanja.



*Slika 2.4 - Umetanje aluminijskih obloga za vrijeme namatanja*

Oblikovanje provodnika nije se znatnije mijenjalo tijekom godina, a danas se na visokim naponima najčešće susreću OIP i RIP provodnici koji imaju niske vrijednosti parcijalnih izbijanja na naponima znatno višim od pogonskog.

Energetski transformatori su najskuplje komponente elektroenergetskog sustava, a kvarovi transformatorskih provodnika su među najčešćim uzročnicima ispada transformatora iz pogona. Takvi kvarovi često uzrokuju velike štete, a osim transformatora ugrožena je okolna oprema u postrojenju. Provodnik treba pouzdano obavljati zadaću pri prijenosu energije dok je izložen dielektričkim, termičkim i mehaničkim naprezanjima. Njegov vodič mora provoditi nazivnu struju bez pregrijavanja okolne izolacije. S obzirom na dielektrička naprezanja, zahtijeva se

pouzdanost njegova unutarnjeg i vanjskog izolacijskog sustava pri čemu važnu ulogu imaju kondenzatorske obloge. One su obično načinjene od aluminijske i tvore, ukoliko se zanemare parazitni kapaciteti, sustav serijski povezanih cilindričnih kondenzatora pri čemu je cijev na koju je namotano kondenzatorsko tijelo na punom naponu, a posljednja obloga u sustavu je uzemljena. Glavni kapacitet provodnika  $C_1$  definiran je kao kapacitet između visokonaponskog vodiča i mjernog ili naponskog priključka i određen je serijskim spojem kondenzatora između obloga, a kapacitet između mjernog priključka i prirubnice označava se s  $C_2$  (Slika 2.3). Ujednačena dielektrička naprezanja moguće je ostvariti ukoliko se napon jednoliko raspoređi po oblogama, što je ostvareno u slučaju kad su kapaciteti među njima približno jednaki, tj.  $C_{0,1} \approx C_{1,2} \approx \dots \approx C_{n-1,n}$ . Kapacitet cilindričnog kondenzatora između obloga s rednim brojem  $i-1$  i  $i$  računa se približno prema izrazu za kapacitet cilindričnog kondenzatora:

$$C_{i-1,i} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l_i}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}, \quad (2.1)$$

gdje su  $r_i$  i  $r_{i-1}$  radijusi susjednih obloga, a  $l_i$  duljina preklopa među njima. U nastavku, kada je riječ o radijusu obloge, uvijek se misli na radijus na koji se obloga umeće u papirnu izolaciju. Kapaciteti će biti jednaki ukoliko vrijedi:

$$\frac{l_i}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} = konst. \quad (2.2)$$

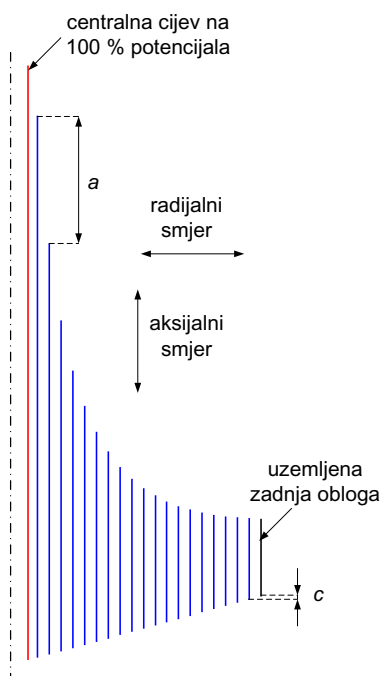
Pretpostavimo li jednake razmake među oblogama i dovoljno velik broj obloga, čime je razmak među njima kraći, izraz (2.2) prelazi u jednostavniji

$$l_i r_i = konst. \quad (2.3)$$

Dakle, zadržavanjem stalnog umnoška duljina i radijusa obloga ostvarit će se linearna raspodjela potencijala i ujednačena raspodjela električnog polja u radijalnom smjeru. Kako se udaljavamo od vodiča potrebno je umetati sve kraće obloge pa zbog prekratih aksijalnih razmaka dolazi do najvećeg aksijalnog naprezanja između posljednje i pretposljednje obloge. Slika 2.5 prikazuje izolacijski sustav s oblogama za koji je umnožak radijusa i duljina obloga stalan. Aksijalni razmaci s uljne strane  $c$  su stalni, ali zato aksijalni razmaci sa zračne strane  $a$  opadaju s porastom radijusa obloga. Klizna čvrstoća uzduž slojeva papira je znatno manja od probojne čvrstoće u radijalnom smjeru što ovakav izbor parametara



obloga čini neprikladnim. Zato se obično parametri obloga biraju tako da aksijalne raspodjele polja budu jednolike, a da pritom radijalna polja ne prelaze dozvoljene vrijednosti. Jednolika aksijalna naprezanja ostvaruju se približno jednakim aksijalnim razmacima među rubovima obloga te jednolikom raspodjelom napona po oblogama.



Slika 2.5 – Izolacijski sustav s parametrima obloga koji zadovoljavaju uvjet  $l \cdot r = konst.$

Kako ne bi došlo do vanjskog preskoka duž gornjeg i donjeg izolatora potrebno je ostvariti dovoljne razmake između uzemljenih dijelova tj. pribornice i priključaka provodnika. U ovoj radnji obrađeni su transformatorski provodnici čiji je donji kraju uronjen u transformatorsko ulje, a gornji za vanjsku izolaciju ima zrak. Aksijalni razmaci među oblogama sa zračne strane su znatno veći od onih s uljne strane iz razloga što je dielektrička čvrstoća zraka višestruko manja od dielektričke čvrstoće ulja. Pribornica je zakriljena posljednjom oblogom, tj. onom koja ima najveći radijus i uzemljena je pa treba voditi računa da su razmaci od rubova zadnje obloge do dijelova pod naponom dovoljno veliki.

## 2.2 Visokonaponski mjerni transformatori

Mjerni transformatori su električni uređaji koji se koriste se za transformiranje napona i struja na vrijednosti prikladne za rad mjernih instrumenata i zaštitnih uređaja. Na taj se način izbjegava izravno priključenje navedenih uređaja na visokonaponsku mrežu i njihovo posebno izoliranje te se smanjuje opasnost za

pogonsko osoblje. Glavna izolacija visokonaponskih mjernih transformatora načinjena je u pravilu od izolacijskog papira impregniranog transformatorskim uljem koje se otplinjuje i dehidrira pod visokim vakuumom čime se postižu izvrsna dielektrička svojstva. Izoliranje mjernih transformatora za visoke napone čini najveći dio troškova u njihovoj izradi. Postoje tri vrste mjernih transformatora i to naponski, strujni i kombinirani.

Međunarodna norma [5] definira rutinska, tipska i posebna ispitivanja mjernih transformatora. Rutinskim se ispitivanjima podvrgava svaki mjerni transformator, a za izolacijski sustav važno je ispitivanje podnosivim naponom industrijske frekvencije i mjerenje parcijalnih izbijanja. Ispitivanja udarnim atmosferskim i sklopnim naponom pripadaju tipskim ispitivanjima i provode se samo na jednom predstavniku određenog tipa transformatora. Od posebnih ispitivanja izdvajamo ispitivanje odrezanim naponom te mjerenje prenesenih prenapona.



*Slika 2.6 - Strujni transformator  $U_m = 420$  kV, ispitivanje udarnim naponima*

Kod naponskih transformatora sekundarni je napon proporcionalan primarnom u normalnim pogonskim uvjetima. Razlikujemo jednopolno i dvopolno izolirane naponske transformatore. Prvima je nazivni primarni napon jednak nazivnom faznom, a drugima nazivnom linijskom naponu mreže. Normirane vrijednosti sekundarnih napona su 100 V, 110 V i 200 V za dvopolno, odnosno

$100/\sqrt{3}$  V,  $110/\sqrt{3}$  V i  $200/\sqrt{3}$  V za jednopolno izolirane transformatore. U mrežama s  $U_m < 123$  kV koriste se većinom induktivni, a za više napone i kapacitivni naponski transformatori.

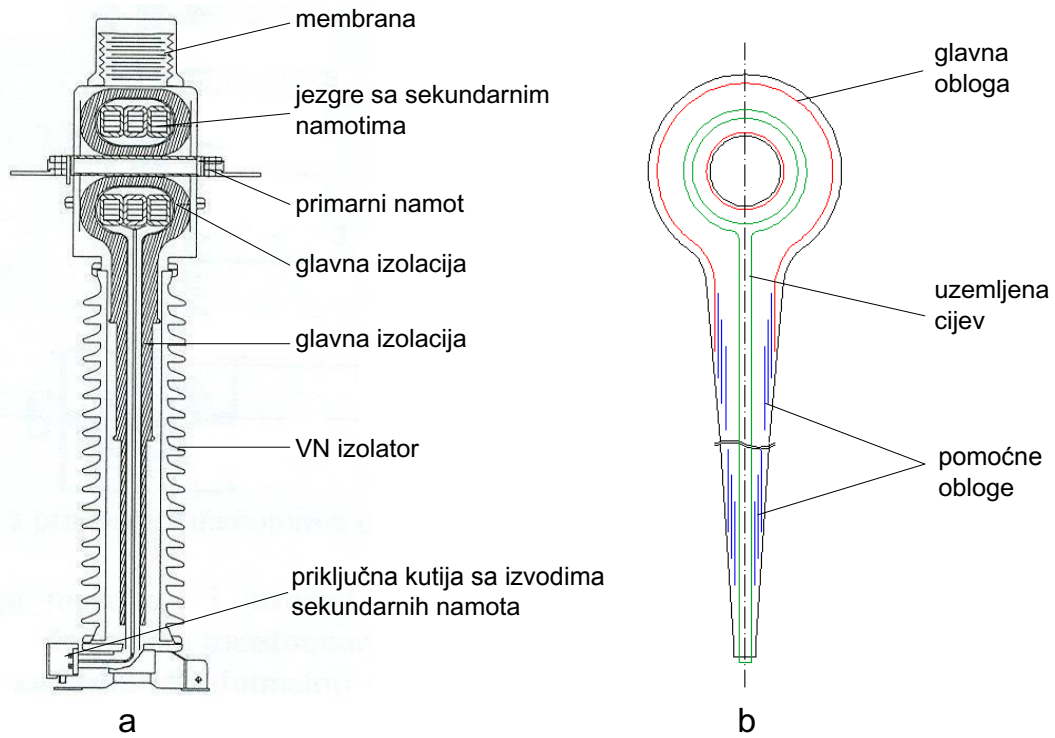
Strujni transformatori transformiraju mjerenu struju u omjeru brojeva zavoja sekundarnog i primarnog namota i bez faznog pomaka izuzme li se struja magnetiziranja. Primarni im se namot spaja serijski u električni krug čiju je struju potrebno mjeriti. Normirane vrijednosti nazivne sekundarne struje su 1 A i 5 A te rijetko 2 A. Ukoliko su razmaci između mjesta ugradnje strujnog transformatora i mjesta ugradnje sekundarne opreme veliki, tada se u pravilu odabire struja od 1 A. Razlog tomu je snaga koja se troši na spojnim vodovima, a koja je proporcionalna kvadratu struje. Jezgre strujnih transformatora izrađuju se od hladno-valjanog orijentiranog magnetskog lima ili mekog magnetskog materijala, ovisno o zahtijevanom razredu točnosti. Naime, kod hladno valjanih limova ne može se dovoljno smanjiti struja magnetiziranja koliko je to potrebno za strujne transformatore visoke točnosti.

Četiri su osnovna tipa konstrukcije:

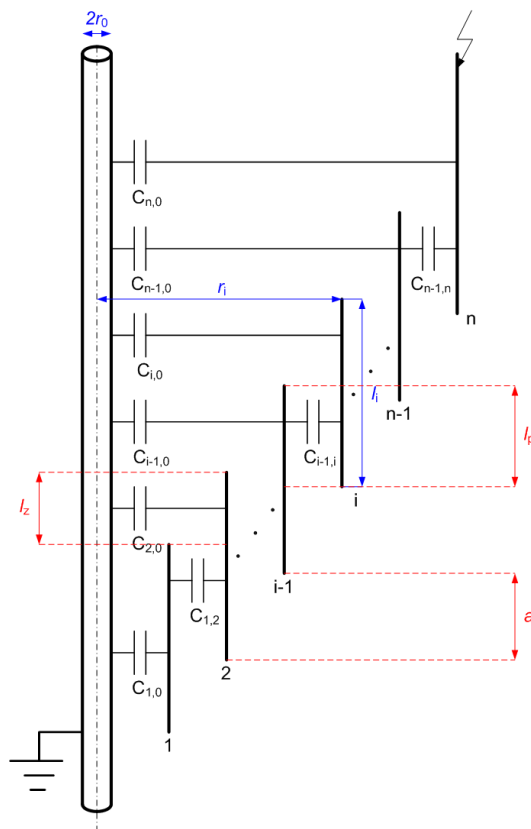
- inverzni tip kod kojeg je aktivni dio smješten u glavi transformatora (Slika 2.7),
- potporni tip s primarnim vodičem u obliku slova U
- potporni tip s namotom u obliku igle,
- kaskadni tip (rijetko se koristi)

Kombinirani transformator sastoji se od strujnog i naponskog transformatora u zajedničkom kućištu. Zbog čitavog niza prednosti nad odvojenom kombinacijom strujnog i naponskog transformatora, udio kombiniranih transformatora u ukupnom broju instaliranih mjernih transformatora u stalnom je porastu [6].

Inverzni tip strujnog transformatora, čiji uzdužni presjek prikazuje slika 2.7a, s uljno-papirnom izolacijom bit će predmet daljnjih razmatranja. Između jezgara sa sekundarnim namotima i primarnog namota nalazi se glavna izolacija, u njen cilindrični dio umeću se kondenzatorske obloge, a vanjska se izolacija ostvaruje s pomoću visokonaponskog izolatora. Glava transformatora završava elastičnom membranom. Papirna izolacija namata se na šuplju metalnu cijev kroz koju se provlače izvodi sekundarnih namota do priključne kutije.



Slika 2.7 - Inverzni tip strujnog transformatora



Slika 2.8 – Nadomjesna shema kondenzatorskog tijela s označenim geometrijskim parametrima obloga

Slika 2.7b prikazuje presjek glavne izolacije u ravnini koja je za 90 stupnjeva zarotirana u odnosu na sliku 2.7a. Metalna cijev koja zakriljuje jezgre i sekundarne namote te se na nju namata papirna izolacija označena je zelenom bojom. Crvenom bojom označena je glavna obloga koja je postavljena u torusnom i vratnom dijelu glavne izolacije, a zaslanja primarni namot strujnog transformatora. Kondenzatorske obloge unutar uljno-papirne izolacije umeću se prilikom namatanja papira, kako bi se ostvarila ujednačenija raspodjela napona i električnih polja duž izolacijskog sustava. Glavna obloga je na punom, a ostale (označene plavom bojom), koje se nazivaju pomoćnim oblogama, na slobodnom potencijalu i čine sustav cilindričnih kondenzatora pa se izolacijski sustav može shematski prikazati mrežom takvih kondenzatora. Slika 2.8 prikazuje nadomjesnu shemu kondenzatorskog tijela s označenim kapacitetima i geometrijskim parametrima obloga gdje su  $r_0$  radijus uzemljene cijevi,  $r_i$  radijus  $i$ -te obloge,  $l_i$  duljina  $i$ -te obloge,  $a$  aksijalni razmak među susjednim oblogama,  $l_p$  duljina preklopa među oblogama kojom je određen kapacitet među njima i  $l_z$  duljina obloge kojom je definiran dozemni kapacitet.

Sustav kondenzatora, unutar izolacije mjernih transformatora, razlikuje se od onog kod provodnika iz razloga što osim kapaciteta među oblogama, postoje još i dozemni kapaciteti obloga prema uzemljenoj cijevi koji bitno utječu na raspodjelu dielektričkih napreznja duž izolacijskog sustava. Zato će se mjere za ujednačavanje napreznja razlikovati od mjera za provodnike. Kasnije će se pokazati kako se najveća polja javljaju obično na rubu posljednje obloge (ona obloga koja je umetnuta na najvećem radijusu, vanjska obloga) koja je kod provodnika uzemljena, a kod mjernih transformatora je na 100 % potencijala. Kapaciteti među oblogama dani su izrazom:

$$C_{i-1,i} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l_{i-1,i}}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}, \quad (2.4)$$

gdje je  $l_{i-1,i}$  duljina preklopa, tj. duljina duž koje se, preklapaju dvije susjedne obloge, a kojom je određen kapacitet među njima. Dozemni kapaciteti svih obloga osim prve prema uzemljenoj cijevi računaju se prema:

$$C_{i,0} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l_{zi}}{\ln \frac{r_i}{r_0}}, \quad (2.5)$$

gdje je  $l_{zi}$  duljina  $i$ -te obloge koju „vidi“ uzemljena cijev.

Obično se odabiru jednaki aksijalni razmaci među oblogama koji uz jednoliku raspodjelu potencijala osiguravaju ujednačena naprezanja po visini izolacijskog sustava. O izboru parametara obloga više će biti riječi u narednim poglavljima. U praksi se na mjernim transformatorima raspodjela udarnih i izmjeničnog napona mjeri prije i nakon impregnacije. Rezultati mjerenja uspoređuju se s rezultatima proračuna kako bi se utvrdilo je li ostvarena ciljana raspodjela napona.

Slika 2.9 prikazuje mjerenje raspodjele udarnih napona duž izolacijskog sustava strujnog transformatora inverznog tipa za  $U_m=123$  kV nakon impregnacije. Posljednja, glavna obloga priključena je na puni napon, a cijev na koju je namotana papirna izolacija je uzemljena. Udarni naponi tjemene vrijednosti 300 V generirani su repeticijskim generatorom Haefely, tip 481. Naponi pomoćnih obloga prema zemlji mjereni su digitalnim osciloskopom Tektronix, tip TDS 544A.



*Slika 2.9 – Mjerenje raspodjele udarnih napona duž izolacijskog sustava strujnog transformatora  $U_m=123$  kV nakon impregnacije*

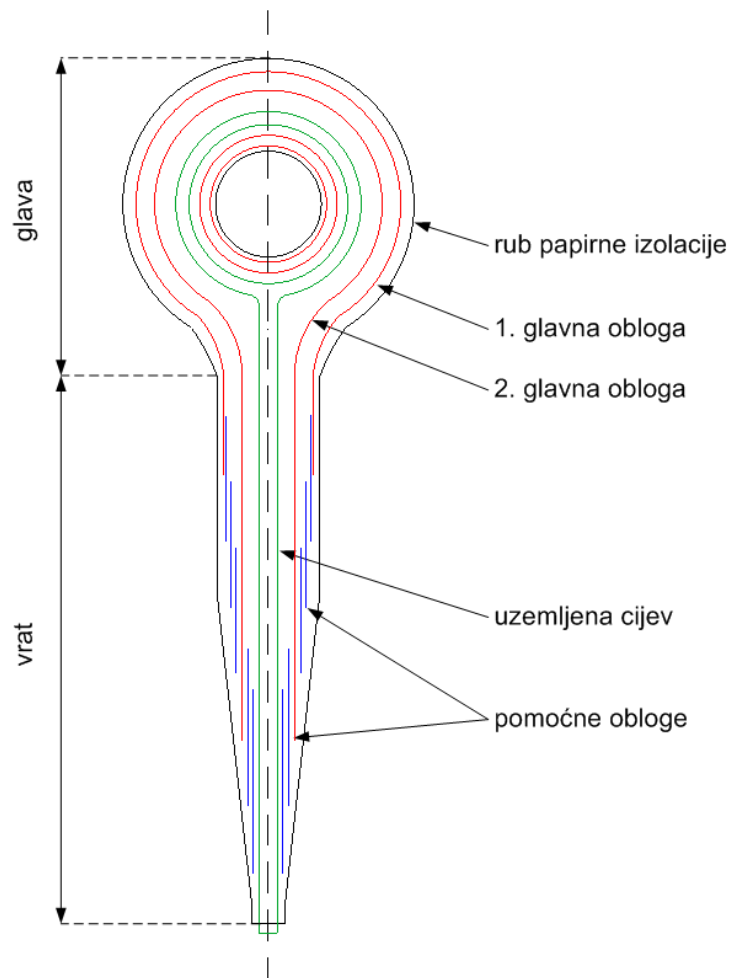
Naponskim i kombiniranim transformatorima s otvorenom jezgrom u obliku stupa, primarni namot sastoji se od većeg broja svitaka (Slika 2.10). Strmo čelo udarnog napona ne može potjerati struju kroz induktivitete pa je raspodjela napona određena kapacitetima. Zato se paralelno svitcima galvanski vežu kondenzatorske obloge koje diktiraju raspodjelu napona po visini namota, čime se uvelike povećava

otpornost prema udarnim naponima. Slika 2.10 prikazuje mjerenje raspodjele udarnih napona duž izolacijskog sustava kombiniranog transformatora,  $U_m=420$  kV prije impregnacije.



*Slika 2.10 – Mjerenje raspodjele udarnih napona duž izolacijskog sustava kombiniranog transformatora  $U_m=420$  kV prije impregnacije*

Valja napomenuti kako strujni transformatori za  $U_m \geq 170$  kV često imaju nekoliko glavnih obloga. Time je izolacijski sustav podijeljen na onoliko dijelova (elemenata) koliko ima glavnih obloga. Slika 2.11 prikazuje razmještaj kondenzatorskih obloga za strujni transformator u čijoj se izolaciji nalaze dvije glavne obloge, a raspodjela napona određena je kapacitetima među njima. Kraće, pomoćne obloge koriste se za ujednačenje naprezanja po vratu izolacijskog sustava.



Slika 2.11 – Izolacijski sustav s dvije glavne obloge



### **3. Istraživanja na modelima izolacije**

U uvodu je istaknuta ovisnost kritične jakosti polja, pri kojoj dolazi do proboja, o čitavom nizu čimbenika što ukazuje na nužnost kombiniranja proračuna i eksperimenata na modelima izolacije. Proboju uljno-papirne izolacije obično prethode parcijalna izbijanja. Kako parcijalna izbijanja nastaju u dijelovima izolacije koji su izvrgnuti jakim dielektričkim naprezanjima, potrebno je definirati modele koji što vjernije predstavljaju upravo ta područja. Ovaj pristup izrazito je povoljan s aspekta troškova izrade modela jer nije potrebno modelirati cijeli izolacijski sustav nego samo određene, kritične dijelove. Zbog toga su modeli znatno jednostavniji u usporedbi s cjelovitim izolacijskim sustavom i eksperimentalni naponi su znatno niži od realnih.

Parcijalna izbijanja ne premošćuju u potpunosti elektrode između kojih je primjenjen napon. Ona predstavljaju djelomične proboje izolacije koji ne uzrokuju slom napona, ali oštećuju izolacijski sustav i s vremenom mogu postati uzrokom proboja. Nastaju u šuplinama krutih dielektrika i duž njihovih površina bilo da graniče s plinovitim ili tekućim dielektrikom, u mjehurićima zraka unutar tekućeg dielektrika pogotovo u blizini oštih i nepravilnih metalnih rubova i šiljaka. Kako je relativna dielektričnost šupljine manja nego okolnog materijala, električno polje u njoj je jače što pogoduje nastanku izbijanja. Važno je napomenuti kako parcijalna izbijanja prethode probodu samo u izrazito nehomogenim poljima [1], [8]. Kako su mjesta u izolaciji na kojima se javljaju parcijalna izbijanja redovito nedostupna, nije ih moguće točno locirati nego se detektiraju na stezaljkama objekta, izuzev novijih ultrazvučnih metoda koje se koriste za detekciju i približnu lokalizaciju izbijanja.

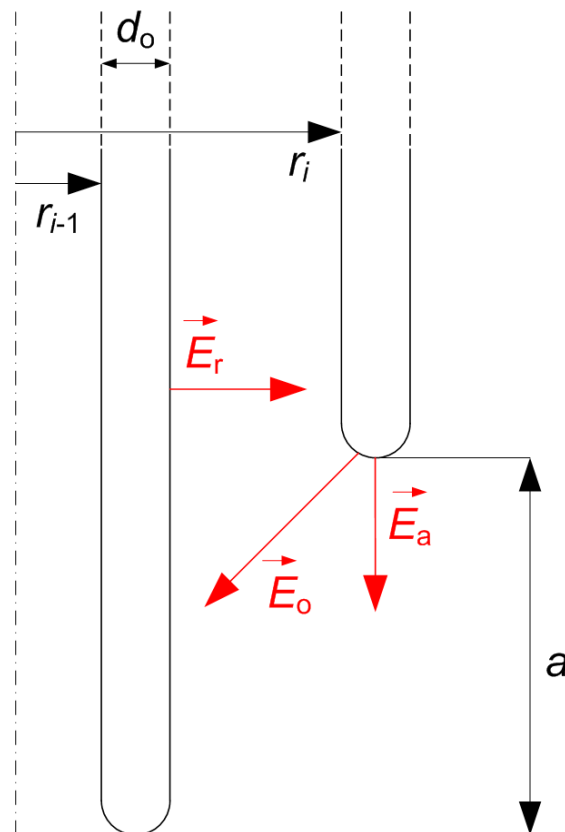
Na temelju prethodnih eksperimentalnih istraživanja, numeričkih proračuna električnog polja i dostupne literature pokazalo se kako su kritična mjesta unutar izolacijskog sustava na kojima se javljaju parcijalna izbijanja upravo rubovi kondenzatorskih obloga [8] ÷ [10]. Iako su amplitude takvih izbijanja u početku malene, njihova pojava uzrokuje kvarenje izolacijskih svojstava, prerano starenje i u konačnici proboj izolacije.

Tradicionalni pristup dimenzioniranju izolacijskih sustava kondenzatorskog tipa pažnju posvećuje ujednačenju aksijalnih i radijalnih naprezanja, ne uzimajući u obzir polja na rubovima obloga  $E_o$  ([1], [2], [13] ÷ [16]). Jakosti polja u radijalnom  $E_r$  i aksijalnom  $E_a$  smjeru između dviju susjednih obloga računaju se iz izraza:

$$E_{vi} = \frac{\Delta U}{r_{i-1} + d_o \ln \frac{r_i}{r_{i-1} + d_o}}, \quad (3.1)$$

$$E_{ai} = \frac{\Delta U}{a}, \quad (3.2)$$

gdje je  $\Delta U$  napon između obloga, a  $r$ ,  $d_o$ , i  $a$  geometrijski parametri (Slika 3.1).



Slika 3.1 – Dvije susjedne obloge s karakterističnim izmjerama i poljima

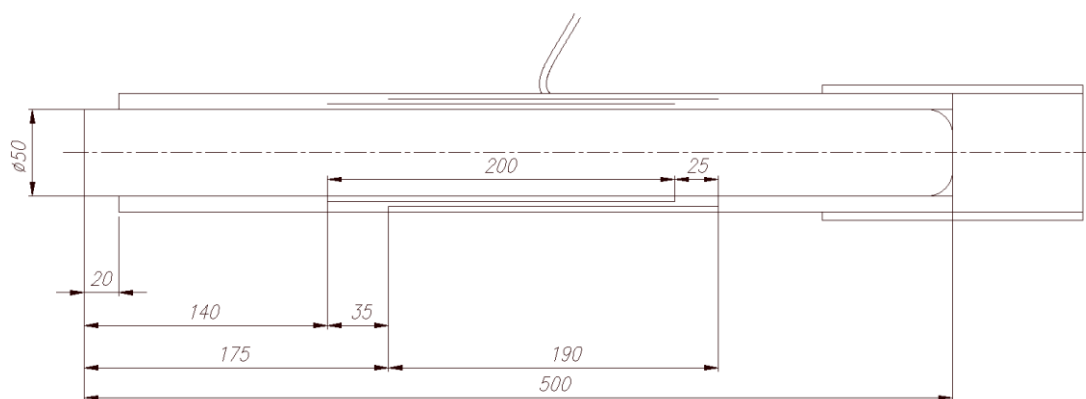
Razlog zbog kojeg se polje na rubu obloge nije uzimalo kao kriterij leži i u činjenici da ga je složeno računski odrediti čak i s najnovijim programskim alatima zbog nepovoljnih omjera minimalne i maksimalne izmjere u proračunskom modelu. Debljina obloge je minimalna izmjera u modelu koja je od visine modela manja za nekoliko redova veličine, a za takav odnos jako je teško postići dovoljno kvalitetnu mrežu konačnih elemenata kako bi se osigurao pouzdan proračun. Ipak, takva se polja mogu računati tako da se najprije odredi polje u blizini ruba, a zatim se

definiraju granice i rubni uvjeti novog proračunskog modela koji sadrži samo rub obloge s okolnom izolacijom. Ovaj postupak detaljnije je objašnjen u poglavlju 4.3.

Detaljna istraživanja naprezanja na rubovima kondenzatorskih obloga započeta su u Končar – Institutu za elektrotehniku 2002. godine, a cilj im je bio procijeniti životnu dob izolacije mjernih transformatora s obzirom na jakost električnog polja kojem je izvrgnuta. Preciznije, radilo se o istraživanju vjerojatnosti nastanka parcijalnih izbijanja u glavnoj izolaciji mjernih transformatora te je bilo zamišljeno nekoliko različitih modela na kojima se istraživao utjecaj električnog polja na nastanak parcijalnih izbijanja. Rezultati tih istraživanja objavljeni su u [8], [11] i [20]. Primjena rezultata istraživanja u optimiranju izolacijskih sustava mjernih transformatora objavljena je u [17] ÷ [20]. Metodološki istovjetno ispitivanje provedeno je i za modele izolacije provodnika o čemu govori sljedeće poglavlje.

### 3.1 Definiranje modela izolacije

Istraživanja na modelima izolacije mjernih transformatora već su objavljena u [20]. Ovdje će se samo ukratko opisati modeli kako bi se mogle uočiti razlike između izolacije mjernih transformatora i provodnika. Slika 3.2 prikazuje izvedbeni nacrt modela izolacije mjernog transformatora koji se sastoji od cijevi na koju je strojno namotana uljno-papirna izolacije od traka natron papira prosječne debljine 0,125 mm (Slika 3.3) unutar koje se raspodjela potencijala diktira s pomoću obloga od grafitiranog natrona.



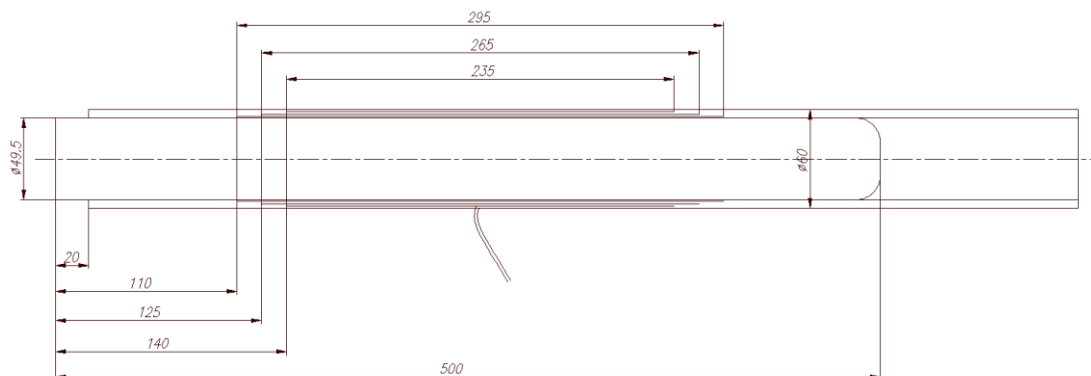
Slika 3.2 - Model izolacije mjernih transformatora

Izolacijski sustav modela tvori dva u seriju vezana cilindrična kondenzatora namotana na aluminijsku cijev promjera 50 mm.



*Slika 3.3 - Namatanje modela izolacije mjernih transformatora*

Za izradu modela izolacije provodnika (Slika 3.4) kao izolacijsko sredstvo korišten je natron papir impregniran uljem, debljine 0,1 mm, namotan iz bale. Unutar uljno-papirne izolacije raspodjela potencijala diktira se trima aluminijskim oblogama i na taj način se formiraju tri u seriju vezana kondenzatora. Obloge su na rubovima prevrnute pa im je debljina na tom dijelu dvostruko veća.



*Slika 3.4 - Model izolacije provodnika*

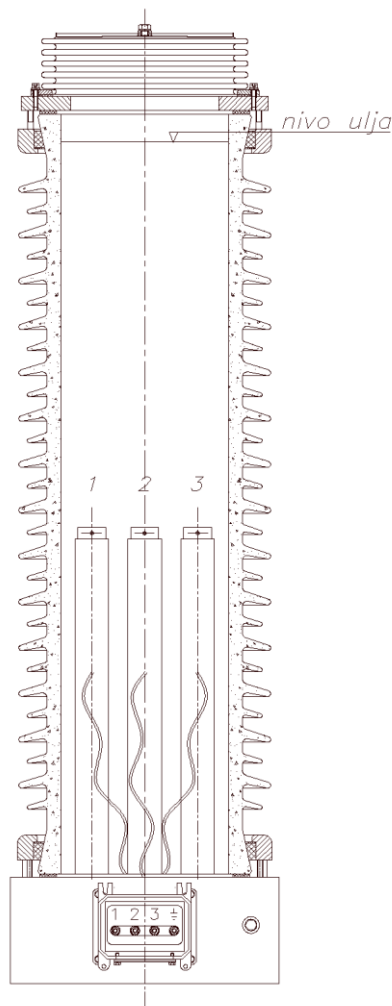
### **3.2 Ispitivanja na modelima izolacije**

Budući da ne postoji opće prihvaćena teorija proboja uljno-papirne izolacije, ispitivanja na modelima provedena su s ciljem utvrđivanja kriterija za naprezanja na rubovima kondenzatorskih obloga. Spregom rezultata ispitivanja i numeričkih

proračuna polja metodom konačnih elemenata moguće je odrediti jakost polja na rubu obloge za koju je poznata vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja.

Nadalje, na temelju istraživanja vjerojatnosti nastanka parcijalnih izbijanja u glavnoj izolaciji moguće je donekle procijeniti životnu dob izolacije s obzirom na jakost električnog polja i trajanje izloženosti njegovu djelovanju. Istraživanje uključuje niz mjerenja na modelima koji predstavljaju izolaciju mjernih transformatora i provodnika, a metodologija je u skladu s izvještajem WG 12.03 Studijskog odbora 12 međunarodnog CIGRÉ [21].

Za potrebe ispitivanja po tri identična modela smještena su unutar izolatora unutarnjeg promjera 300 mm (Slika 3.5). Ispitivanje se provodi tako da se na jednog narine napon dok su druga dva kratko spojena i uzemljena. Određen broj naponskih razina, na kojima se mjere parcijalna izbijanja, odabire se u skladu s preliminarnim mjerenjima i saznanjima.



Slika 3.5 - Modeli u zajedničkoj posudi (izolatoru) spremni za ispitivanje

U visokonaponskom laboratoriju Končar – Instituta za elektrotehniku mjerena su parcijalna izbijanja na modelima izolacije (Slika 3.6) prema postupku opisanom u nastavku. Svaki uzorak podvrgava se ispitnom naponu sve dok se ne pojave parcijalna izbijanja ili maksimalno jedan sat ako u tom periodu nema parcijalnih izbijanja. Kriterij pojave parcijalnih izbijanja izabran je tako da se naponom početka parcijalnih izbijanja smatra onaj napon pri kojem nastaju parcijalna izbijanja veća od 10 pC u neprekidnom trajanju od najmanje 15 sekundi ili nagla pojava velikog broja izboja visoke amplitude, obično od nekoliko stotina pa do nekoliko tisuća pC, što je bio slučaj kod većine provedenih ispitivanja. Ovisno da li su tijekom mjerenja na nekoj naponskoj razini parcijalna izbijanja registrirana ili ne, sljedeća ispitna razina je za jedan stupanj niža ili viša.

Iskustvo je pokazalo da ovakva ispitivanja ne spadaju u grupu destruktivnih ispitivanja jer nakon određenog vremena poslije isključenja napona stanje izolacije uzoraka poprima prvobitna svojstva pa se na taj način može na pojedinom modelu obaviti velik broj ispitivanja.



*Slika 3.6 - Ispitivanje modela u visokonaponskom laboratoriju*

Rezultati ispitivanja za svaku naponsku razinu sastoje od niza vremena proteklih do pojave parcijalnih izbijanja koje se grupiraju u proizvoljne vremenske

intervale  $t$ . Broj slučajeva u kojima su se u pojedinom intervalu pojavila parcijalna izbijanja  $N_i$  iskazuje se kao postotak ukupnog broja ispitivanja  $N$  za pojedinu naponsku razinu  $i$  na taj način izražava vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja. Rezultati ispitivanja dani su samo za modele provodnika (Tablica 3.1) jer su istraživanja koja obuhvaćaju modele izolacije mjernih transformatora već objavljena u [20].

Tablica 3.1 – Rezultati ispitivanja modela izolacije provodnika

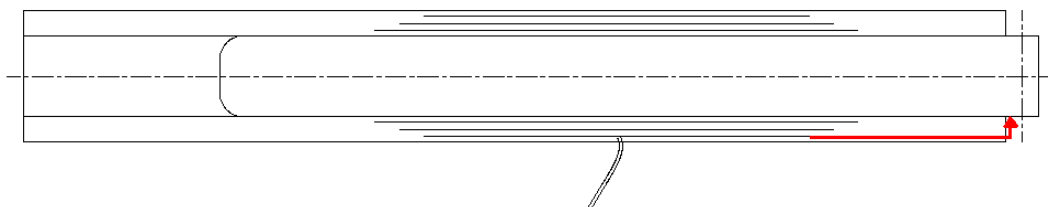
$U$ (kV)	$N$	$t < 1\text{min}$		$t < 5\text{min}$		$t < 10\text{min}$		$t < 30\text{min}$		$t < 60\text{min}$	
		$N_i$	$P$ (%)	$N_i$	$P$ (%)	$N_i$	$P$ (%)	$N_i$	$P$ (%)	$N_i$	$P$ (%)
56	36	2	5,56	3	8,33	4	11,11	5	13,89	6	16,67
60	56	10	17,86	16	28,57	22	39,29	26	46,43	30	53,57
64	34	12	35,29	17	50	20	58,82	24	70,59	26	76,47

Nakon što su bili podvrgnuti određenom broju ispitivanja, modeli provodnika su probijeni atmosferskim, sklopnim i izmjeničnim naponom. Vrijednosti napona pri kojima je došlo do proboja za modele provodnika nalaze se u Tablici 3.2.

Tablica 3.2 – Vrijednosti probojnih napona za modele provodnika

Redni broj modela	1	2	3
Vrsta probojnog napona	atmosferski	sklopni	izmjenični
Probojni napon (kV)	201,2	171,6	77,0

Prilikom odmatanja modela izolacije provodnika locirana su kritična područja na kojima su pronađeni tragovi parcijalnih izbijanja i proboja. Proboj modela br. 1 i 2 sličnog je karaktera: kritično mjesto je rub uzemljene obloge odakle se razvija klizni proboj prema vrhu cijevi koja je pod naponom (Slika 3.7). Slika 3.8. prikazuje model br. 1 neposredno nakon proboja atmosferskim udarnim naponom, a tragove proboja za navedene modele prikazuju slike 3.9 i 3.10.



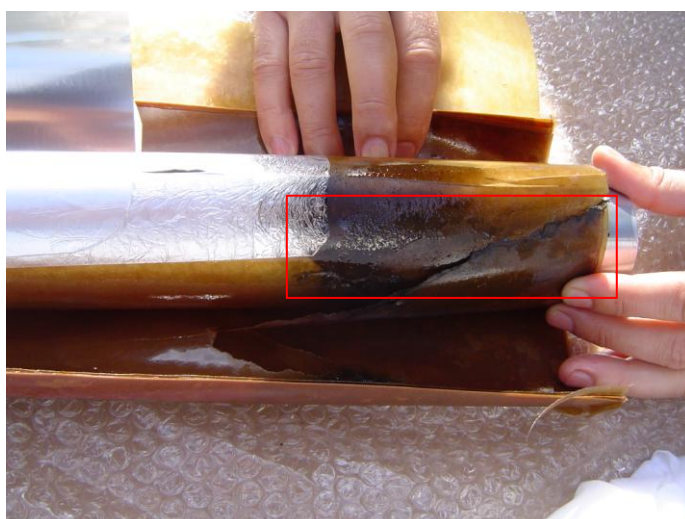
Slika 3.7 - Modeli br. 1 i 2, označena klizna staza proboja



*Slika 3.8 - Model br. 1 nakon proboja atmosferskim udarnim naponom*



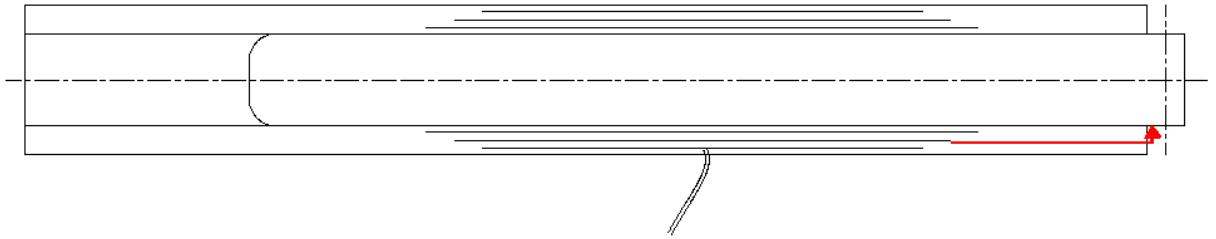
*Slika 3.9 - Model br. 1 klizna staza proboja*



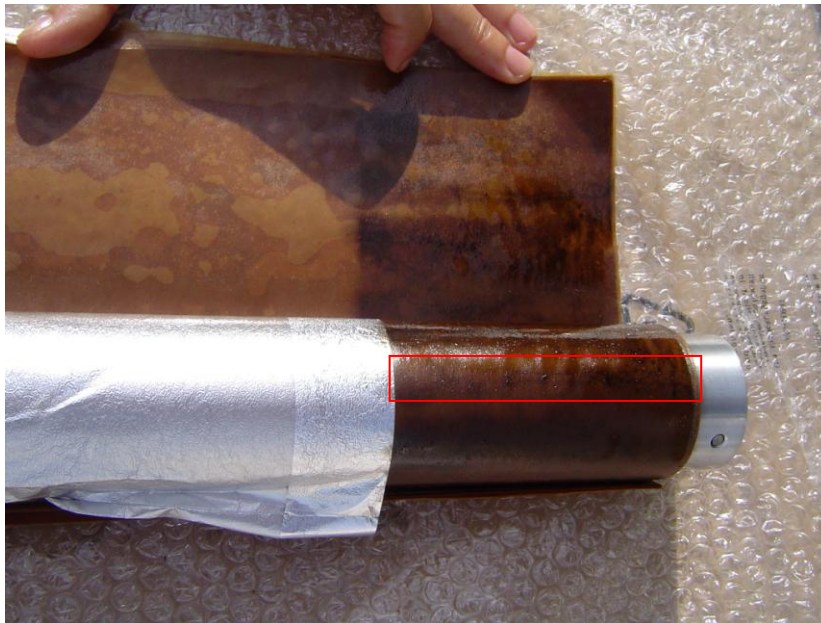
*Slika 3.10 - Model br. 2 klizna staza proboja*



Kod modela br. 3 trag parcijalnog proboja pronađen je od gornjeg ruba srednje obloge prema cijevi na koju je model namotan (Slika 3.11 i Slika 3.12).



Slika 3.11 - Model br. 3, označena klizna staza parcijalnog proboja



Slika 3.12 - Model br. 3 klizna staza parcijalnog proboja

### 3.3 Obrada rezultata ispitivanja modela

Rezultati ispitivanja mogu se prikazati u obliku familije krivulja (Slika 3.13):

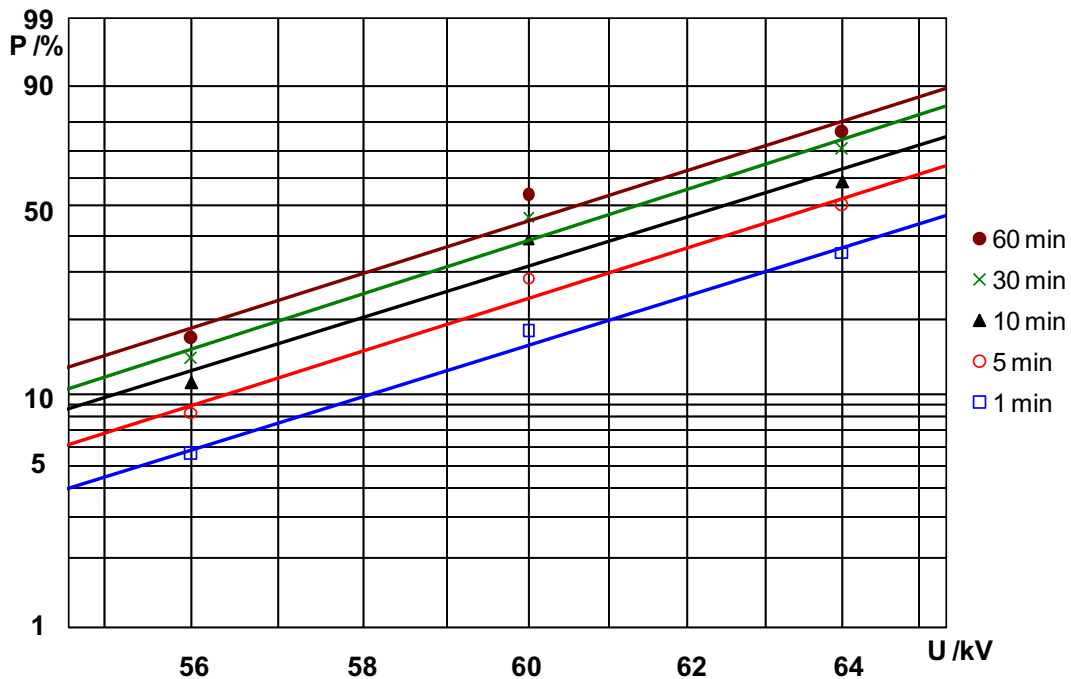
$$P = f(U)_{t=konst} \quad (3.3)$$

Iz navedene ovisnosti moguće je izraziti napon kao funkciju vremena za odabranu vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja  $P$ . Analiza je provedena korištenjem Weibullove razdiobe koja je u širokoj primjeni za obradu rezultata ispitivanja vezanih uz životnu dob [21], [22]. Donja granica za ovu razdiobu jednaka je nuli, a njena statistička kumulativna funkcija, tj. vjerojatnost dana je izrazom:

$$P = 1 - e^{(-AU^{\alpha}t^{\beta})}, \quad (3.4)$$

gdje su  $A$ ,  $\alpha$  i  $\beta$  stalnice.

Parovi točaka ( $U, P$ ) iz Tablice 3.1 prikazuju se grafički tako da su naponi nanoseni na os apscisa proporcionalni s  $\ln(U)$ , a vjerojatnosti na osi ordinata sa skalom proporcionalnom  $\ln(\ln(1/(1-P)))$ . Metodom najmanjih kvadrata provlače se gotovo paralelne ravne linije kroz skupove eksperimentalnih rezultata za svaki odabrani vremenski interval.



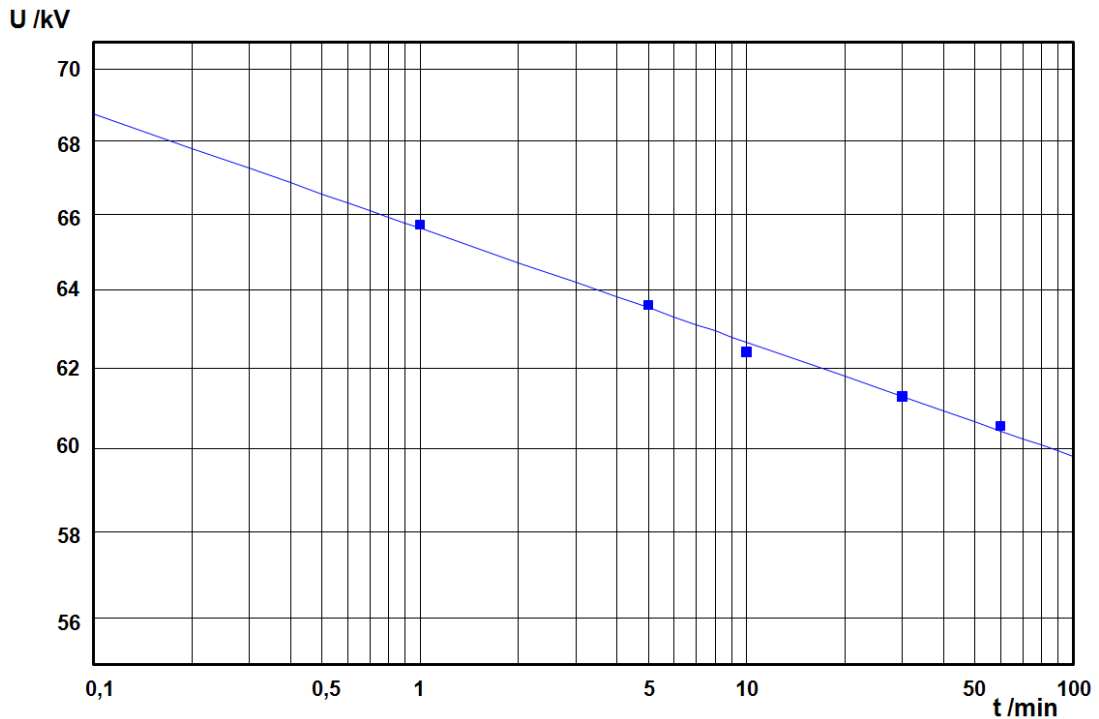
Slika 3.13 – Weibullove krivulje za modele provodnika

Za proizvoljno odabranu vjerojatnost, iz grafa prikazanog na slici 3.13 možemo očitati pripadajuće točke ( $U, t$ ) i na taj način dobijemo apsolutne volt-sekundne krivulje (Slika 3.14). Uzme li se da je  $P$  u izrazu (3.4) stalna veličina, slijedi:

$$\ln(U) = \ln(C) - \gamma \ln(t) \text{ ili } U = \frac{C}{t^\gamma}, \quad (3.5)$$

$$\text{uz } \ln(C) = \frac{1}{\alpha} (\ln(\ln(\frac{1}{1-P})) - \ln(A)) \text{ i } \gamma = \frac{\beta}{\alpha}.$$

Izrazom (3.5) određena je nova familija volt-sekundnih krivulja, pravaca u log-log mjerilu, za nepromjenjive vjerojatnosti zbog ovisnosti parametra  $C$  o  $P$ . Takve volt-sekundne krivulje opisuju ovisnost ispitnog napona o vremenu do pojave parcijalnih izbijanja, a vjerojatnost njihove pojave je parametar.



Slika 3.14 – Apsolutna volt-sekundna krivulja modela provodnika za  $P=50\%$

Uobičajeniji prikaz volt-sekundnih karakteristika dobit će se ako se umjesto apsolutnih vrijednosti napona koriste relativne. Pritom je bazni napon onaj koji odgovara odabranom referentnom vremenu  $t_R$ . Relativne vrijednosti napona tada su definirane kao:

$$U_{\%} = 100 \frac{U(t)}{U(t_R)}, \quad (3.6)$$

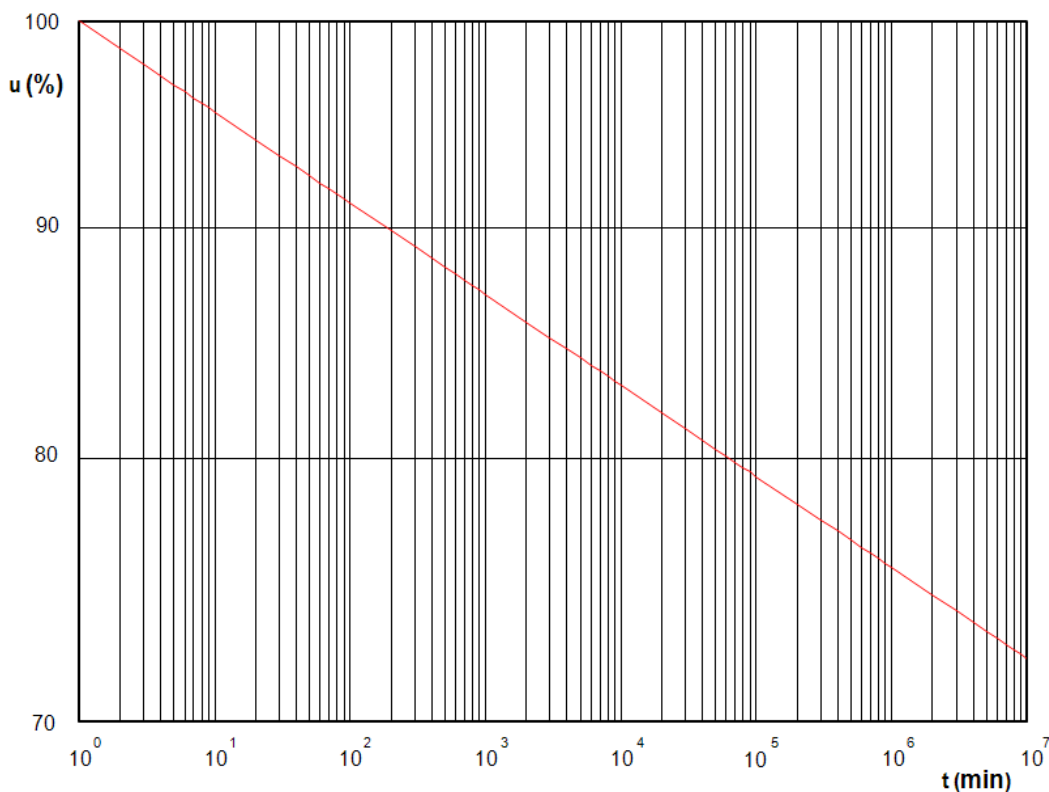
odnosno nakon uvrštenja izraza (3.5) slijedi:

$$U_{\%} = 100 \left( \frac{t}{t_R} \right)^{-\gamma}. \quad (3.7)$$

Parametar  $\gamma$  je u stvari koeficijent smjera volt-sekundnih krivulja u log-log mjerilu pa se može odrediti iz:

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right)}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}. \quad (3.8)$$

Za modele provodnika parametar  $\gamma$  iznosi 0,02. Slika 3.15 prikazuje relativnu volt-sekundnu krivulju za modele provodnika uz  $t_R = 1$  min.



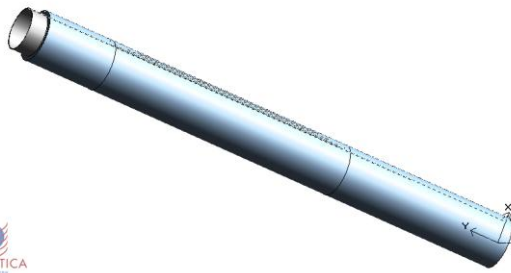
Slika 3.15 – Relativna volt-sekundna krivulja za modele provodnika uz  $t_R=1$  min

Važnost dobivene volt-sekundne krivulje je ta što ona može poslužiti za informativnu procjenu vremena pri kojem će se u i provodnicima na određenom naponu javiti parcijalna izbijanja s definiranom vjerojatnošću. Jasno je da ovakve procjene doprinose i postupku određivanja životne dobi izolacijskog sustava koja je usko povezana s pojavom parcijalnih izbijanja [8].

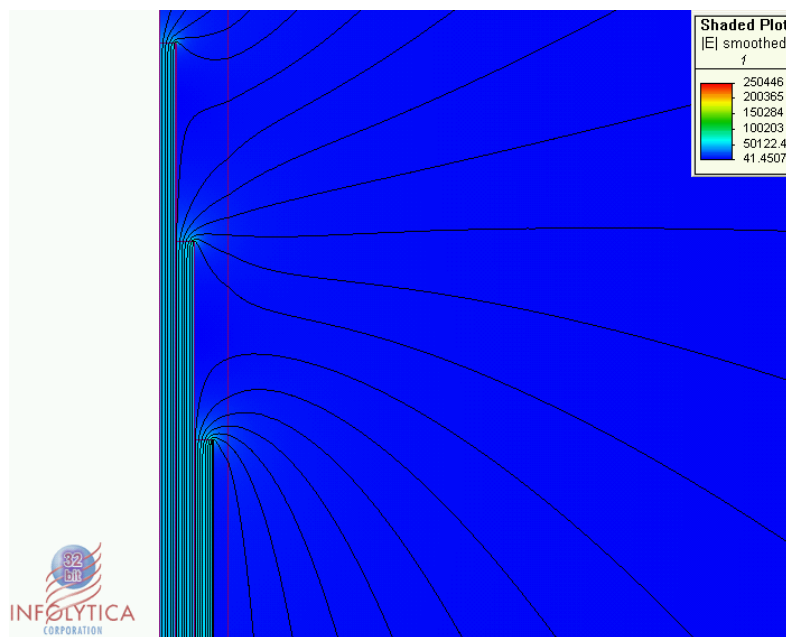
### 3.4 Numerički proračun električnog polja za modele

Iz rezultata ispitivanja nije moguće kvantificirati jakost polja na rubu obloge pri kojoj nastaju parcijalna izbijanja. Kako bi se uspostavila veza između napona pri kojem nastaju parcijalna izbijanja i jakosti električnog polja unutar izolacijskog sustava potrebno je proračunati električno polje. Korištenjem programskog paketa ElecNet ([23] ÷ [25]), zasnovanog na metodi konačnih elemenata, proračunata je jakost električnog polja za model izolacije provodnika (Slika 3.16).

Zadan je potencijal cijevi na koju je model namotan vrijednosti 100 V, posljednja obloga gledano od cijevi je uzemljena, dok se međuobloge nalaze na slobodnom potencijalu. Maksimalno polje javlja se na rubu uzemljene elektrode i iznosi 0,25 kV/mm (Slika 3.17).



Slika 3.16 – Model izolacije provodnika u ElecNet-u



Slika 3.17 – Rezultat proračuna električnog polja za model izolacije provodnika

Rezultati proračuna električnog polja odlično se podudaraju s rezultatima probija modela te dokazuju kako su kritična mjesta unutar uljno-papirne izolacije upravo rubovi kondenzatorskih obloga. Za praktičnu upotrebu potrebno je objediniti rezultate ispitivanja i proračuna te definirati jakost polja na rubu obloge  $E_0$  pri kojoj je vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja vrlo mala, npr. 1 % ili manja za određeni vremenski interval. Kao preporuka može se definirati da vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja, u realnim izolacijskim sustavima, za vrijeme ispitivanja jednominutnim podnosivim naponom industrijske frekvencije bude  $\leq 1\%$  što je znatno stroži kriterij u usporedbi sa zahtjevima definiranim u međunarodnim normama [3] i [5]. Naime, IEC 60137 zahtjeva mjerenje parcijalnih izbijanja na provodnicima pri najvišem naponu opreme  $U_m$  dok IEC 61869-1 definira mjerenje parcijalnih izbijanja na mjernim transformatorima pri naponima ne višim od  $1,2 U_m$ .

Sinteza rezultata ispitivanja modela obrađenih korištenjem Weibullove razdiobe i numeričkog proračunom električnog polja daje informaciju o vjerojatnosti nastanka parcijalnih izbijanja u ovisnosti o maksimalnoj jakosti električnog polja i vremenu. Tako za modele mjernih transformatora iz [8] i [20], proizlazi da je vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja za vremenski interval  $t < 1$  min jednaka 1 % uz primjenjeni napon od 18,4 kV, a prema rezultatima numeričkog proračuna električnog polja, najveće polje iznosi 0,231 kV/mm uz primjenjeni napon 100 V. Za bilo koju drugu vrijednost napona  $U$  u kilovoltima može se odrediti jakost polja na rubu obloge iz izraza:

$$E_o = 0,231 \frac{\text{kV}}{\text{mm}} \cdot \frac{U}{0,1 \text{kV}} = 2,31 \frac{U}{\text{mm}} \text{ (kV/mm)}, \quad (3.9)$$

pa tako za 18,4 kV jakost polja poprima vrijednost 42,5 kV/mm. Zaključak je kako će vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja biti 1 % ukoliko je maksimalna jakost polja 42,5 kV/mm u trajanju do 1 minute. Slično se za modele provodnika ekstrapolacijom (Slika 3.13) dobije da je pri naponu 49,9 kV u intervalu  $t < 1$  min vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja 1 %. Proračunom električnog polja utvrđena je jakost polja na rubu posljednje obloge od 0,25 kV/mm pa se vrijednost polja pri bilo kojem drugom naponu  $U$  u kilovoltima može izračunati iz:

$$E_o = 0,25 \frac{\text{kV}}{\text{mm}} \cdot \frac{U}{0,1 \text{kV}} = 2,5 \frac{U}{\text{mm}} \text{ (kV/mm)}. \quad (3.10)$$

Vrijedi da je pri naponu od 49,9 kV u trajanju do 1 minute vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja jednaka 1 % uz maksimalnu jakost polja od 125,0 kV/mm.

Iz postotnih volt-sekundnih krivulja za referentno vrijeme  $t_R = 1$  min (Slika 3.15) može se npr. procijeniti vrijeme nakon kojeg će vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja biti 1 % pri pogonskom naponu za određeni izolacijski sustav. Pritom će vrijednost  $u=100$  % odgovarati onom naponu za koji je vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja 1 % u vremenskom intervalu od 1 minute. Kako za npr. 420 kilovoltni transformatorski provodnik pogonski napon iznosi otprilike 33 % jednominutnog podnosivog izmjeničnog napona, proizlazi da je vjerojatnost pojave parcijalnih izbijanja na pogonskom naponu izrazito mala.

Naravno, ova se tvrdnja mora uzeti s određenom rezervom jer ispitivanja na modelima ne obuhvaćaju utjecaj temperature i vlage na nastanak parcijalnih izbijanja, a i fizikalni mehanizam samih izbijanja nije dovoljno istražen. Nadalje, maksimalno trajanje ispitivanja je 1 sat pa je ekstrapolacija na dulja vremena upitna.

Stoga je uputno uvesti faktor sigurnosti kojim se pokrivaju navedeni nedostaci. U ovom slučaju dozvoljene vrijednosti polja na rubu obloga ograničene su na vrijednosti 80 % vrijednosti dobivenih spregom eksperimenata i proračuna.

## **4. Dielektrička naprežanja izolacijskog sustava**

Pri dimenzioniranju izolacije treba paziti da dielektrička naprežanja ne premaše dozvoljena niti u jednom dijelu izolacijskog sustava. U ovom poglavlju definirat će se dozvoljena dielektrička naprežanja pojedinih izolacijskih materijala, odnosno kriteriji za dimenzioniranje izolacije.

Izolacijski sustav, kako je već spomenuto, osim pogonskog napona mora moći izdržati i znatno više napone koji se u mreži mogu pojaviti kao posljedica atmosferskih izbijanja ili sklopnih manipulacija. Iako se spomenuti prenaponi mogu ograničiti ugradnjom odvodnika prenapona, preostali napon je još uvijek znatno viši od pogonskog. Izolacijski sustav, ako je dobro dimenzioniran, treba izdržati i takve kratkotrajne prenapone.

Ekperimentalna istraživanja pokazala su da se naponska naprežanja mogu referentno svesti na naprežanja koja stvara jednodimenzionalni podnosivi izmjenični napon. Ukoliko je vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja mala pri tom naponu, tada se može smatrati da će prilikom ispitivanja atmosferskim i sklopnim udarnim naponom ta vjerojatnost biti također mala. Ovo proizlazi iz sustava ekvivalentnih napona, tj. udarni naponi se pretvorbenim faktorima svode na ekvivalentni jednodimenzionalni izmjenični napon [26]. Pri dimenzioniranju izolacije koriste se DIL (engl. DIL – *Design insulation level*) faktori kojima se naprežanja uzrokovana atmosferskim i sklopnim udarnim naponima svode na referentni jednodimenzionalni napon industrijske frekvencije. Za atmosferski udarni napon 1,2/50  $\mu$ s koristi se oznaka BIL (engl. *Basic lightning impulse insulation level*), a za sklopni 250/2500  $\mu$ s BSL (engl. *Basic switching impulse insulation level*).

Papir i ulje čine unutarnju izolaciju i za razliku od zraka, koji je vanjska izolacija, nisu podložni atmosferskim utjecajima. Prilikom izbora parametara kondenzatorskih obloga treba se osim dielektričke čvrstoće unutarnje izolacije voditi računa i o naprežanjima vanjske izolacije. Vanjsku izolaciju čini također i površina krute izolacije, odnosno visokonaponskog izolatora. Iako zrak spada u obnovljivu izolaciju te ubrzo nakon preskoka poprima prvobitna izolacijska svojstva, izolaciju treba dimenzionirati tako da do preskoka ne dođe, jer svaki preskok predstavlja kvar u mreži te uzrokuje proradu zaštite.

Kriteriji za naprežanja u uljnim kanalima i tangencijalna naprežanja na granici ulja i papira preuzeti su iz postojeće literature. Dozvoljena aksijalna naprežanja u papiru definirana su na temelju rezultata proračuna polja postojećih mjernih



transformatora, odnosno provodnika uz osvrt na podatke iz literature. Kriteriji za naprezanja u papiru na rubu kondenzatorskih obloga određena su na temelju istraživanja na modelima opisanog u prethodnom poglavlju.

#### **4.1 Dielektrička naprezanja u zraku**

Najčešći vanjski izolacijski materijal uređaja s izolacijskim sustavom kondenzatorskog tipa je zrak pri atmosferskom tlaku pa je nužno poznavati uvjete pri kojima dolazi do preskoka. Preskok u zraku stohastička je pojava, čak i u kontroliranim uvjetima ispitivanja, na koju utječe čitav niz parametara.

Preskok u zraku povezan je sa stvaranjem elektronske lavine. Pod utjecajem električnog polje elektroni ubrzavaju i sudaraju se s atomima i molekulama pri čemu se oslobađaju novi elektroni, proces se ponavlja te nastaje elektronska lavina. Kod homogenih polja u plinovima preskočni napon funkcija je umnoška tlaka i razmaka elektroda i dan je jednadžbom poznatom kao Paschenov zakon. Pri tlaku od 1013,3 hPa i temperaturi 293 K za jakost polja pri kojoj dolazi do preskoka u zraku vrijedi izraz:

$$E = \frac{U}{d} = 24,22 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} + \frac{6,08}{\sqrt{d}} \frac{\text{kV}}{\sqrt{\text{cm}}} \quad (\text{kV/cm}), \quad (4.1)$$

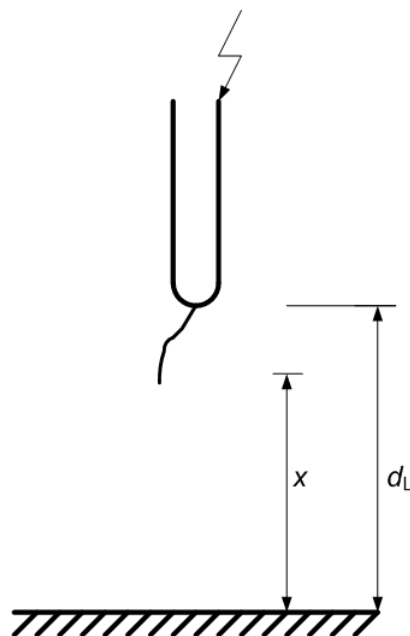
gdje je  $d$  razmak između elektroda u centimetrima. Iz izraza (4.1) slijedi da u homogenim poljima s velikim razmakom elektroda vrijednost polja pri kojoj dolazi do proboja teži vrijednosti 24 kV/cm [27].

Preskočni napon za zrak ovisan je o njegovu tlaku, temperaturi i vlažnosti. Raste s porastom razmaka među elektrodama, dok se srednja jakost polja smanjuje sa 3 kV/mm za homogena polja na 0,6 kV/mm za nehomogena polja pri razmacima većim od nekoliko metara.

U izrazito nehomogenim poljima preskoku prethode izbijanja koja nastaju na mjestima gdje je električno polje najveće. Najčešće su to šiljci na definiranom ili plivajućem potencijalu, a takva izbijanja poznata su kao korona.

Ako je dostignuta određena vrijednost polja nastupit će vanjsko izbijanje ili korona. Daljnjim podizanjem napona korona prerasta u intenzivnije oblike izbijanja (pramenasto, krošnjasto) i u konačnici dolazi do sloma napona uz nastanak električnog luka. Napon nastanka korone jako ovisi o radijusu zakrivljenosti elektrode, a slabije o razmaku prema uzemljenim dijelovima.

Postoji nekoliko metoda za procjenu preskočnog napona u nehomogenim poljima pri atmosferskim i naponima sličnog valnog oblika. Slika 4.1 prikazuje razvoj visokotemperaturnog kanala ioniziranog plina (*engl. leader*) od štapne elektrode prema zemlji gdje je  $d_L$  duljina zračnog raspora, a  $d_L - x$  put koji je *leader* prešao.



Slika 4.1 – Razvoj leadera u zraku

*Leader* nastaje u trenutku kada gradijent napona postigne određenu vrijednost. Ukoliko je primjenjeni napon dovoljno visok, *leader* će se produljivati, čime dolazi do povećanja gradijenta napona na preostalom dijelu raspora, a time i do povećanja brzine njegova širenja. Model temeljen na ovakvom opisu preskoka poznat je LPM (*engl. Leader progression model*) i određen je diferencijalnom jednačbom [28]:

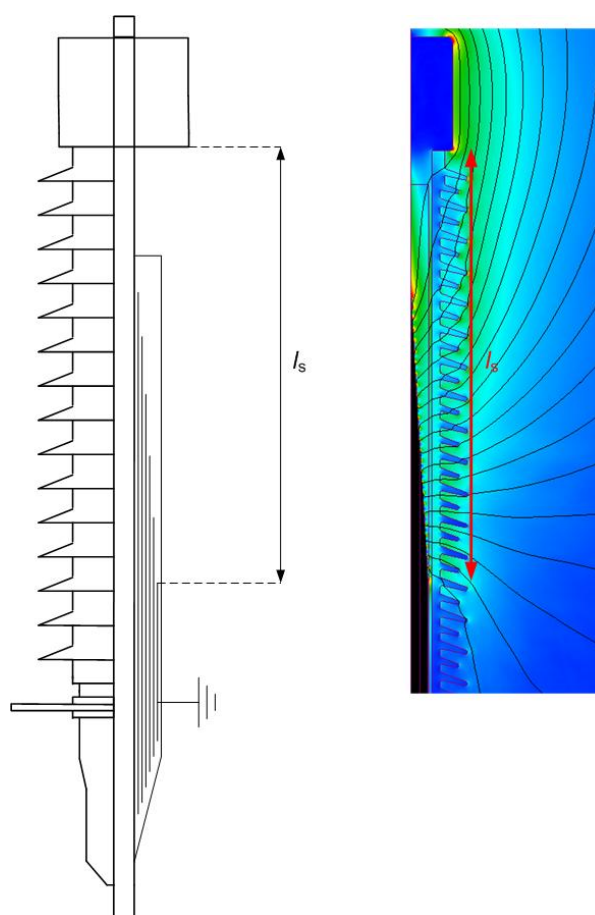
$$v = ku(t) \left[ \frac{u(t)}{x} - E_0 \right], \quad (4.2)$$

gdje je  $v$  brzina širenja *leadera*,  $u(t)$  primjenjeni napon u ovisnosti o vremenu,  $x$  duljina nepremoštenog dijela raspora,  $E_0$  gradijent napona potreban za nastanak *leadera* i  $k$  stalnica koja ovisi o razmaku i obliku elektroda.  $E_0$  je također ovisno o konfiguraciji i razmaku elektroda, ali i o polaritetu primjenjenog napona, varira od 540 kV/m do 750 kV/m za atmosferski udarni vala normiranog i nenormiranog oblika.

Na bazi LPM-a razvijeno je više metoda od kojih je najvažnija *Destructive effective method* (DE) [28]. U literaturi postoje izrazi za izračun preskočnog napona

različitih valnih oblika te za različite razmake i geometrijske konfiguracije elektroda. U [29] dan je pregled izraza za brzinu širenja *leadera* kod atmosferskog udarnog napona normiranog i nenormiranog oblika, pozitivnog i negativnog polariteta. Izrazi se odnose na konfiguracije šiljak-šiljak i šiljak-ploča i razmake elektroda od 0,25 m do 5 m. Autori analiziraju postojeće te uvode novi model *leadera* i predstavljaju novu metodu određivanja V-t krivulja. U [30] i [31] uveden je model *leadera* pri sklopnim naponima za velike zračne razmake do 12 m.

Razmak od gornjeg ruba zadnje obloge do glave provodnika označimo s  $I_s$  (Slika 4.2). Ukoliko je  $I_s$  nedovoljno velik, doći će do preskoka u zraku ili do kombiniranog proboja kroz uljno-papirnu izolaciju, zatim kroz uljni kanal između papira i visokonaponskog izolatora, kroz izolator i naposljetku kroz zrak.



Slika 4.2 –Prikaz sigurnosnog razmaka  $I_s$  i rezultat proračuna električnog polja

Slika 4.3 prikazuje upravo jedan takav slučaj proboja provodnika kojemu su sve vrijednosti polja unutar uljno-papirne izolacije bile ispod dozvoljenih. Nakon

uklanjanja porculanskog izolatora i odmatanja papirne izolacije utvrđeno je kako je proboj iniciran s ruba posljednje, uzemljene obloge.



Slika 4.3 – Proboj porculanskog izolatora transformatorskog provodnika, označeno mjesto proboja

Uvedena je nova metoda kontrole odabira razmaka  $l_s$  koja je objašnjena na primjeru 170 kilovoltnog transformatorskog provodnika iz proizvodnog asortimana Končar – Energetskih transformatora d.d. Za atmosferski udarni val 1,2/50  $\mu$ s zadavane su različite tjemene vrijednosti atmosferskog udarnog napona te je numerički rješavana diferencijalna jednadžba (4.2) Runge-Kutta metodom [32] uz  $E_0 = 615$  kV/m i  $k = 1,57 \cdot 10^{-6}$  [28]. Tjemena vrijednost atmosferskog udarnog napona varirana je sve dok nije postignut preskok u otprilike 16  $\mu$ s, što se može uzeti kao pedeset postotni preskočni napon  $U_{50\%}$  [28]. Podnosivi atmosferski udarni napon  $U_{10\%}$  za zadanu konfiguraciju može se odrediti kao  $0,961 \cdot U_{50\%}$  [33].

U slučaju 170 kilovoltnog provodnika, za zadani  $l_s$  dobiven je iz izraza (4.2)  $U_{50\%l_s} = 642$  kV, odnosno  $U_{10\%l_s} = 617$  kV. Dakle, podnosivi atmosferski udarni napon duž  $l_s$  ima tjemenu vrijednost 617 kV. Promotri li se rezultat proračuna električnog polja (Slika 4.2) može se uočiti kako duž razmaka  $l_s$  ne vlada puni primjenjeni napon, nego otprilike 80 % njegove vrijednosti (uzeta ravna linija od ruba obloge do glave provodnika uz vrhove rebara visokonaponskog izolatora). To znači da će

pedeset postotni preskočni napon za provodnik iznositi  $U_{50\%}=U_{50\%I_s}/0,8=802,5$  kV, a podnosivi atmosferski udarni napon  $U_{10\%}=771$  kV.

Ispitni atmosferski udarni napon za 170 kilovoltni provodnik iznosi 750 kV, što je 2,7 % niže od računski određenog podnosivog napona  $U_{10\%}$ . Opisani postupak zasigurno ne daje kao rezultat optimalan  $I_s$ , čime je proces optimiranja uljno-papirne izolacije donekle ograničen. Razmak  $I_s$  vrlo je važan parametar za dimenzioniranje izolacije pa bi u budućim istraživanjima trebalo rasvijetliti brojne nepoznanice na ovom području. Na sličan način kontrolirana su naprezanja u zraku za mjerne transformatore.

Složeno je precizno definirati uvjete pri kojima dolazi do kombiniranog proboja (Slika 4.3), ali poznato je koji parametri mogu povećati probojni napon. Povećanje razmaka  $I_s$  između ruba zadnje obloge i prirubnice mjernog transformatora, odnosno glave provodnika utječe na porast vrijednosti probojnih napona. Ujednačena raspodjela napona po visini zračne izolacije, na što se može djelomično utjecati kondenzatorskim oblogama, također doprinosi povećanju probojnih i preskočnih napona.

## **4.2 Dielektrička naprezanja u ulju**

Transformatorsko ulje najjeftiniji je i najčešće korišten tekući dielektrik u električnim uređajima koji osim izolacijske funkcije djeluje i kao rashladno sredstvo. Novo, dobro osušeno ulje ima dielektričku čvrstoću oko 300 kV/cm, a već nekoliko grama vode na tonu ulja smanjuje ju na 200 kV/cm. Ostarjela ulja s velikim udjelom vode imaju probojnu čvrstoću od 20 do 30 kV/cm. Osim o udjelu vode, dielektrička čvrstoća ovisi o temperaturi, obliku primjenjenog napona, sadržaju plinova u tekućini itd. Ulja koja se koriste za impregnaciju papira nisu kemijski potpuno čista te sadrže otopljene plinove i krute čestice koje su pokretne i orijentiraju se u smjeru najvećeg električnog polja zbog električnih sila koje na njih djeluju. Ukoliko je broj takvih čestica znatan, one će se pod utjecajem električnog polja rasporediti tako da premošćuju elektrode. U njihovom okolišu, zbog oblika i dielektričnosti čestica, dolazi do porasta polja, pa su mogući parcijalni preskoci koji generiraju nove mjehuriće i nečistoće i na taj način može doći do proboja izolacijske tekućine. U mjehurićima plina je, zbog odnosa dielektričnosti plina i ulja, polje jače pa kad se postignu određeni uvjeti dolazi do ionizacije mjehurića. Mehanizam proboja u transformatorskom ulju složena je pojava i probojni se naponi određuju isključivo eksperimentalno.

Kriterij za naprezanja u ulju, s obzirom na naprezanja duž silnica polja, odabran je prema [34] gdje su provedena opsežna ispitivanja s ciljem određivanja vjerojatnosti nastanka parcijalnih izbijanja u ovisnosti o jakosti električnog polja i širini uljnog kanala. Kao kriterij za naprezanja u uljnim kanalima koriste se Weidmannove krivulje. Weidmannova krivulja za nova, osušena i otplinjena ulja dana je eksponencijalnom funkcijom:

$$E_{pd} \approx \frac{21,3 \text{ kV}}{x^{0,370}} \text{ (kV/mm)}. \quad (4.3)$$

Izrazom (4.3) određena su dozvoljena naprezanja u uljnom kanalu kao funkcija duljine  $x$  u milimetrima duž silnice električnog polja. Kada bi vrijednosti lokalnih maksimuma u nehomogenim poljima bile ograničene s obzirom na Weidmannovu krivulju duž duljine  $x$  u uljnom kanalu, tada bi veći dio kanala bio napregnut ispod dozvoljenih vrijednosti, što rezultira predimenzioniranjem izolacije i visokim troškovima. S druge strane, ograničiti srednju vrijednost polja Weidmannovom krivuljom bilo bi riskantno iz razloga što u izrazito nehomogenim poljima lokalni maksimumi polja mogu poprimiti izrazito visoke vrijednosti. Iako je srednja vrijednost polja niska, lokalni maksimumi polja mogu biti znatni i na taj način ugrozili bi izolaciju.

Stoga je u [34] korištena metoda za određivanje dielektričke čvrstoće uljnih kanala pri nehomogenim poljima, a koja je i eksperimentalno potvrđena [35]. Ta se metoda temelji na izboru kritičnih linija koje premošćuju uljni kanal i slijede silnice električnog polja, a određuju se iz rezultata proračuna električnog polja. Potrebno je pronaći takvu liniju duž koje će naprezanja biti najnepovoljnija, a to nije uvijek jednostavno pa ih je ponekad potrebno izabrati i analizirati više.

Eksperimenti su pokazali kako dozvoljeno polje opada, duž kritične linije polja u uljnom kanalu, s povećanjem širine kanala. Zato se kod energetskih transformatora uljni kanali dijele barijerama od tvrdog papira na uže, čime se njihova dielektrička čvrstoća povećava. Barijere će imati optimalan položaj ukoliko su postavljene okomito na silnice polja, tj. paralelno ekvipotencijalnim linijama.

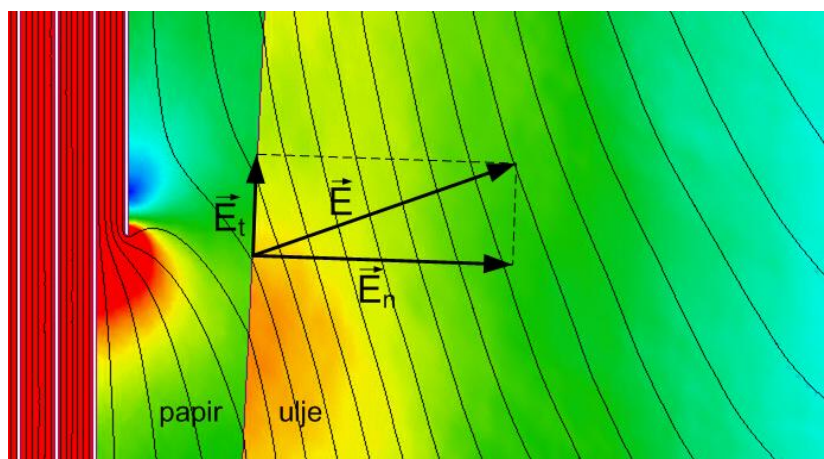
Prema odabranoj metodi, računa se srednje polje kao funkcija puta  $E_{sr}(x)$  prema izrazu (4.4), počevši od lokalnog maksimuma sukcesivno povećavajući duljinu puta sve dok se ne premosti uljni kanal širine  $d_u$ :

$$E_{sr} = \frac{1}{x} \int_0^x E dx' ; x = 0, \dots, d_u. \quad (4.4)$$

Ovako dobivene srednje vrijednosti uspoređuju se s dozvoljenim napreznjima koja su određena izrazom (4.3) pri čemu dozvoljeno napreznje  $E_{pd}$  mora biti veće od  $E_{sr}$  za svaki  $x = 0, \dots, d_u$ , odnosno omjer dozvoljenog i izračunatog srednjeg polja  $E_{sr}$  mora biti veći od 1. Zbog sigurnosti obično se uzima vrijednost omjera veća od 1 pa je tako  $1,15 \div 1,5$  uobičajena vrijednost koja se koristi pri dimenzioniranju uljnih kanala energetskih transformatora. Omjer dozvoljenog i izračunatog srednjeg polja naziva se faktorom sigurnosti  $\sigma$ :

$$\sigma(x) = \frac{E_{pd}}{E_{sr}} \quad (4.5)$$

Opisani se pristup koristi pri određivanju dozvoljenih napreznja za nehomogena polja, a može se koristiti i za kontrolu tangencijalnih napreznja na granici dvaju dielektrika (Slika 4.4). Smatra se kako je dielektrička čvrstoća granice, duž koje vlada tangencijalna komponenta polja, manja od čvrstoće materijala koji se na tom mjestu spajaju. Jedan od razloga tomu je nesavršenost prijelaza iz jednog materijala u drugi, pa se stoga ova napreznja ograničava na 70 % dozvoljenih napreznja u uljnim kanalima.



Slika 4.4 – Tangencijalno polje na granici papira i ulja

Minimalna dozvoljena vrijednost faktora sigurnosti za klizna napreznja kreće se u rasponu od 1,5 do 3 [34]. Slika 4.5 prikazuje klizni proboj po površini uljnog dijela papirne izolacije 123 kilovoltnog provodnika.



*Slika 4.5 – Klizni proboj po papirnoj izolaciji provodnika nakon uklanjanja epoksidnog izolatora*

Izrazom (4.3) određena su dozvoljena naprezanja u uljnim kanalima omeđenim izolacijskim materijalima. Ukoliko je u ulje uronjena neizolirana elektroda, dozvoljena će naprezanja biti manja. U tom su slučaju dozvoljena naprezanja dana izrazom:

$$E_{pd} \approx \frac{17,8 \text{ kV}}{x^{0,364}} \text{ (kV/mm)}. \quad (4.6)$$

Za polja u ulju te duž granice ulja i papira mogu se izravno odrediti funkcije faktora sigurnosti ukoliko su ta polja padajuća, jer ih je jedino tako moguće uspoređivati s dozvoljenim poljima koja su dana eksponencijalnom funkcijom prema izrazu (4.3). Ukoliko analizirano polje ima maksimume i minimume, potrebno ga je transformirati u padajuće koje je usporedivo s dozvoljenim [36].

### **4.3 Dielektrička naprezanja u uljem impregniranom papiru**

Najveća polja u izolacijskom sustavu javljaju se na rubovima kondenzatorskih obloga. Zbog jakih naprezanja nastaju parcijalna izbijanja koja s vremenom mogu uzrokovati proboj. U prethodnom poglavlju, na temelju rezultata ispitivanja modela izolacije i numeričkog proračuna električnog polja, određene su jakosti polja na rubu obloga za koje je vjerojatnost pojave parcijalnih izbijanja 1 %.

Osim polja na rubu obloga, potrebno je poznavati dozvoljena radijalna i aksijalna naprezanja. Prema [13] dozvoljena su radijalna naprezanja do 13 kV/mm i aksijalna do 0,5 kV/mm, ukoliko je zrak vanjski izolator. Za provodnike koji povezuju



ulje i zrak, dozvoljena aksijalna naprezanja u uljno-papirnoj izolaciji s uljne strane veća su i mogu iznositi do 1,3 kV/mm. Tradicionalni pristup dimenzioniranju izolacije koristi se kriterijima za aksijalna i radijalna naprezanja. Međutim, rezultati ispitivanja modela, ali i rezultati drugih sličnih istraživanja, pokazuju kako parcijalna izbijanja na rubovima obloga, uzrokovana jakim lokalnim poljima, s vremenom uzrokuju kvarenje izolacijskih svojstava. Stoga će, uz aksijalna polja, kriterij za naprezanja u papiru biti jakost polja na rubu obloga, dok će radijalna polja poslužiti kao kontrolni podatak.

Provodnici su, uz namot i regulacijsku sklopku, među najčešćim uzročnicima kvarova energetskih transformatora [4]. Dielektrički kvar provodnika može biti djelomičan ukoliko je došlo do proboja među kondenzatorskim oblogama, ili potpun, što u pravilu uzrokuje njegovo rasprsnuće. Slika 4.6 prikazuje provodnik kojem se rasprsnuo porculanski izolator tijekom ispitivanja atmosferskim udarnim valom odrezanim u hrptu.



*Slika 4.6 – Rasprsnuće porculanskog izolatora transformatorskog provodnika*

Uzrok rasprsnuća je klizni proboj iniciran s gornjeg ruba kondenzatorske obloge. Aksijalna naprezanja sa zračne strane ovog provodnika iznosila su i do 1,3 kV/mm što je 2,6 puta više od maksimalnog dozvoljenog naprezanja. Slika 4.7 prikazuje trag kliznog proboja i oštećenu kondenzatorsku oblogu.

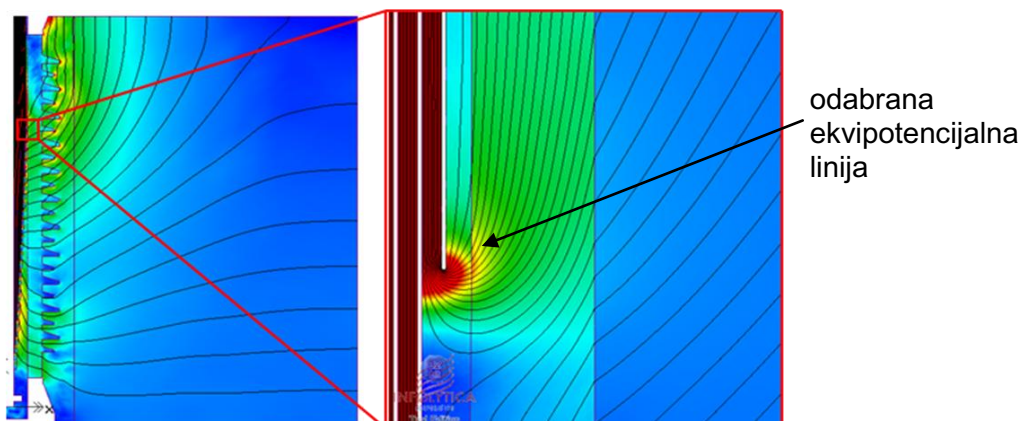


*Slika 4.7 – Trag kliznog proboja iniciranog s gornjeg ruba obloge*

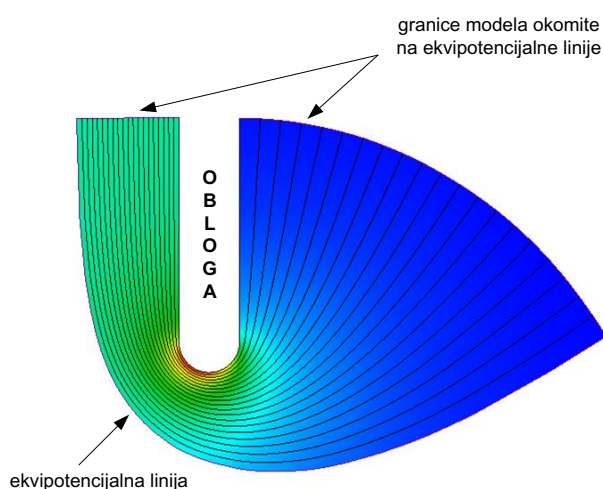
Računanje polja na rubu obloga mukotrpan je i vremenski zahtjevan posao. Najveću poteškoću predstavljaju omjeri izmjera, npr. debljina obloge je višestruko manja od visine izolacijskog sustava. Kada je omjer najveće i najmanje izmjere u računskom modelu velik, nije moguće postići kvalitetnu mrežu konačnih elemenata, niti sa zadovoljavajućom točnošću odrediti traženu vrijednost polja.

Zato je odabran drugačiji pristup, u kojem se polje na rubu obloge računa u dva koraka. Najprije se provodi proračun polja za cijeli model s dovoljno finom mrežom kako bi se što točnije proračunao potencijal u blizini ruba obloge (Slika 4.8). Zatim se odabire ekvipotencijalna linija koja će predstavljati jednu od dviju granica novog modela i očita njen potencijal. Na granicama novog modela moraju vladati Neumanovi i Dirichletovi uvjeti, odnosno na granici ili mora biti definiran potencijal ili zadan uvjet da postoji samo tangencijalna komponenta polja. Za potrebe ovog rada napravljen je program koji očitava koordinate uz rub obloge kojima prolazi odabrana ekvipotencijalna linija uz dozvoljeno odstupanje potencijala od 0,1 %. Time je određena jedna granica novog proračunskog modela.

Druga granica, duž koje postoji samo tangencijalna komponenta polja, odnosno koja okomito siječe ekvipotencijalne linije, u stvari je silnica električnog polja. Određuje se na način da se izabere krajnja očitana točka ekvipotencijalne linije, a zatim se ostale točke očitavaju pomicanjem u smjeru najvećeg polja u dovoljno finim koracima, sve dok se ne zatvore granice novog modela (Slika 4.9). U novom modelu, koji sadrži rub obloge i okolnu izolaciju, moguće je zadati finu mrežu konačnih elemenata i tako sa zadovoljavajućom točnošću računati polje na rubu obloge.



Slika 4.8 – Postupak proračuna jakosti el. polja na rubu obloge – izbor ekvipotencijalne linije

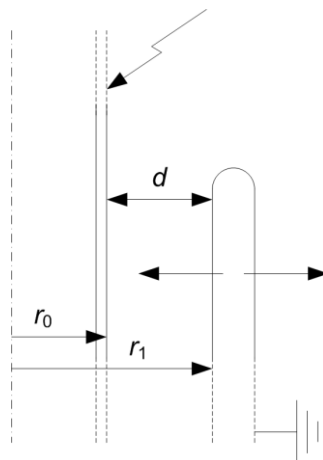


Slika 4.9 – Postupak proračuna jakosti električnog polja na rubu obloge, označene granice novog modela

Opisani postupak računanja polja na rubu obloge nije jednostavan, a uzme li se u obzir da visokonaponski mjerni transformatori i provodnici imaju od nekoliko do više desetaka takvih obloga, sasvim je nepraktično računati polja na svakom rubu. Stoga postoji potreba odrediti funkcijsku ovisnost polja na rubu o geometrijskim parametrima i primjenjenom naponu, tj. izvesti analitičko približenje koje omogućuje brz proračun. U tu svrhu formirana su dva proračunska modela. Prvi model korišten je za istraživanje utjecaja radijalnog, a drugi utjecaja aksijalnog razmaka među obloga na jakost polja na rubu obloge.

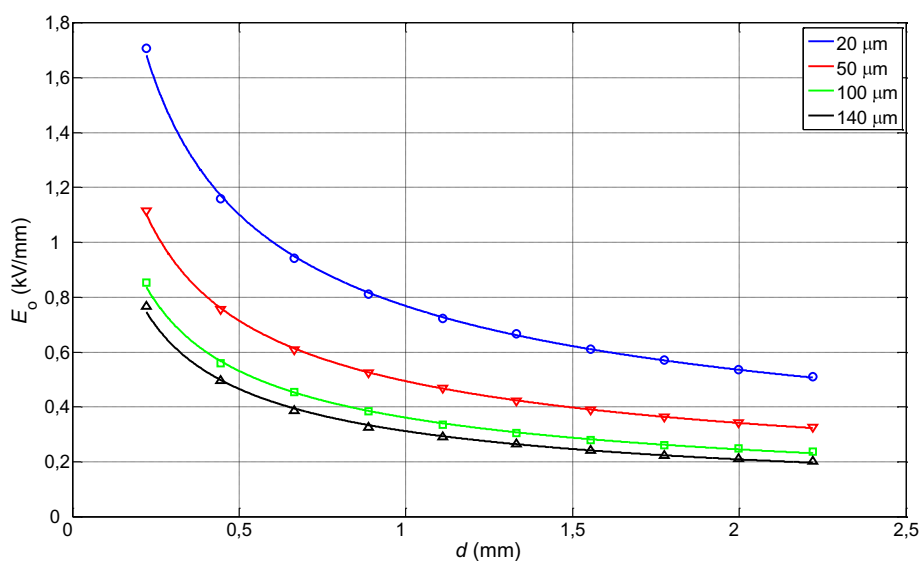
Slika 4.10 prikazuje osnosimetričan model, korišten za određivanje utjecaja radijalnog razmaka na polje na rubu obloge, koji se sastoji od uzemljene obloge i cijevi pod naponom. Debljina izolacije  $d$  birana je tako da odgovara uobičajenim vrijednostima debljine izolacije među oblogama mjernih transformatora. Napon

između obloge i cijevi iznosi 100 V i ne mijenja se. Proračun je proveden za četiri debljine obloge i to 0,14 mm, 0,1 mm, 0,05 mm i 0,02 mm.



Slika 4.10 – Proračunski model za određivanje ovisnosti jakosti polja na rubu obloge o radijalnom razmaku

Slika 4.11 daje grafički prikaz rezultata proračuna, tj. ovisnost polja na rubu obloge o radijalnom prirastu izolacije uz nepromijenjen napon i debljinu obloge kao parametar.



Slika 4.11 – Jakosti električnog polja na rubu obloge za različite radijalne priraste izolacije uz nepromijenjen napon

Iz dobivenih rezultata proizlazi kako se ovisnost polja na rubu obloge o debljini uljno-papirne izolacije  $d$  među oblogama izražene u milimetrima, može dobro aproksimirati funkcijom oblika:

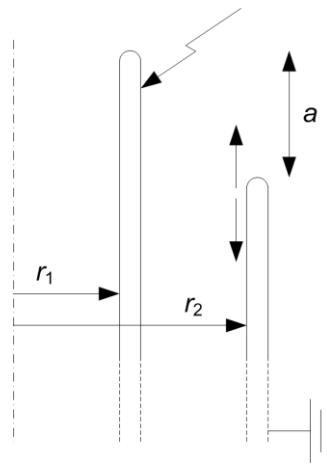
$$E_o = K_1 d^{-K_2} \quad (4.7)$$

gdje je  $K_1$  parametar proporcionalan primjenjenom naponu i opada s porastom debljine obloge  $d_o$  prema izrazu:

$$K_1 = \frac{0,12 \text{ kVmm}}{d_o^{0,47}} \text{ (kV)}, \quad (4.8)$$

dok parametar  $K_2$  raste približno linearno s porastom debljine obloge za promatrane slučajeve:

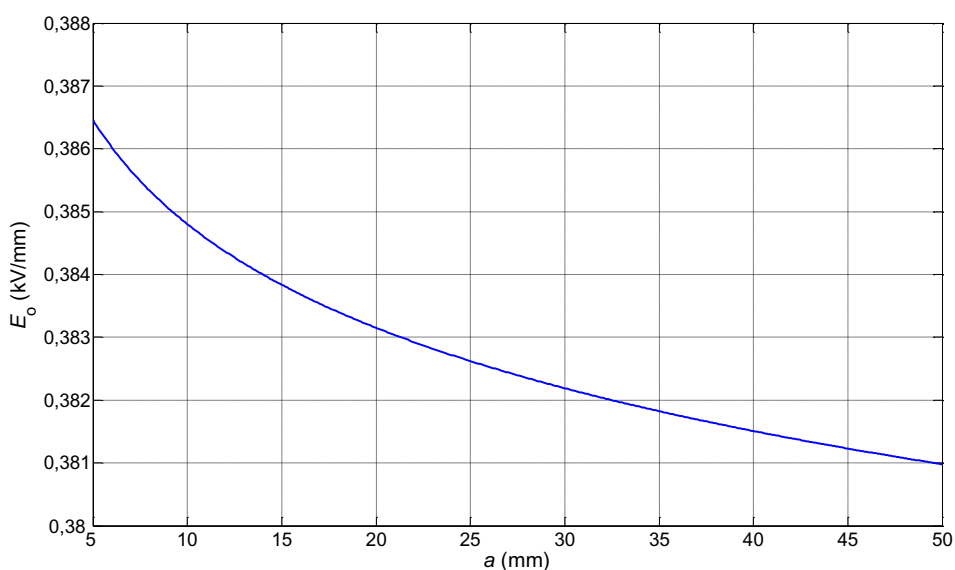
$$K_2 = \frac{d_o}{2,04 \text{ mm}} + 0,51. \quad (4.9)$$



Slika 4.12 – Proračunski model za određivanje ovisnosti jakosti polja na rubu obloge o aksijalnom razmaku

Ovisnost polja na rubu obloge o aksijalnom razmaku  $a$  između obloga istražena je na modelu koji se sastoji od dvije obloge (Slika 4.12). Prva obloga, umetnuta na radijusu  $r_1$ , priključena je na napon efektivne vrijednosti 100 V, a druga, na čijem se rubu polje analizira, je uzemljena. Aksijalni razmak među oblogama variran je u rasponu od 5 do 50 mm u koracima po 5 mm.

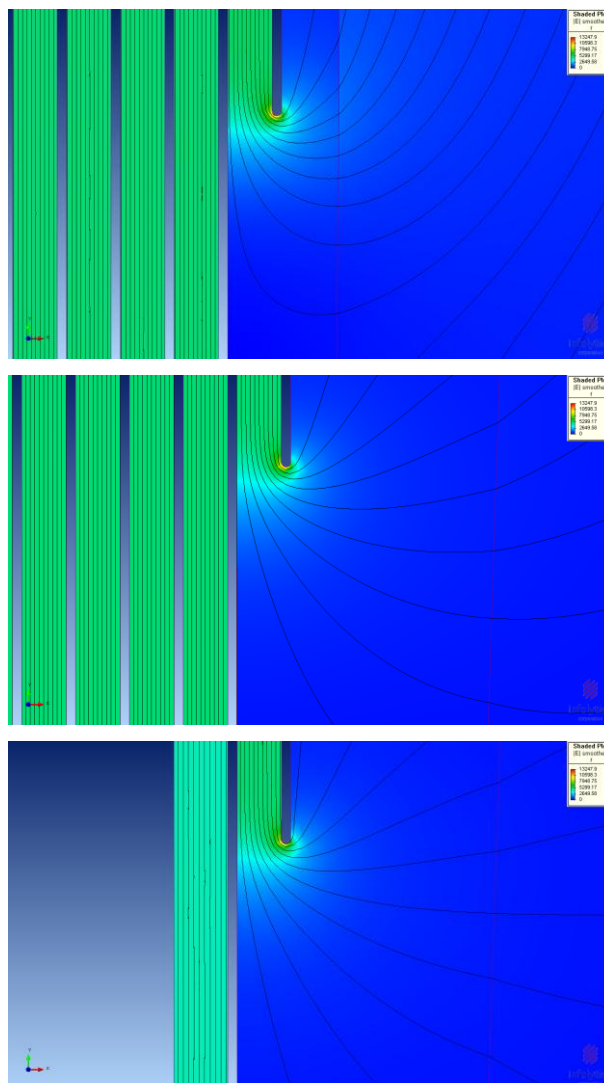
Slika 4.13 prikazuje rezultate proračuna polja na rubu elektrode uz aksijalni razmak kao parametar. Može se zaključiti kako polje na rubu neznatno raste sa smanjenjem aksijalnog razmaka te se može smatrati neovisnim o njemu. Istražena je još i ovisnost polja na rubu o radijalnom položaju obloga uz nepromijenjenu debljinu izolacije, napon i aksijalni razmak, te nije utvrđen bitan utjecaj na promatranu jakost polja.



Slika 4.13 – Maksimalno el. polje na rubu obloge za različite aksijalne razmake

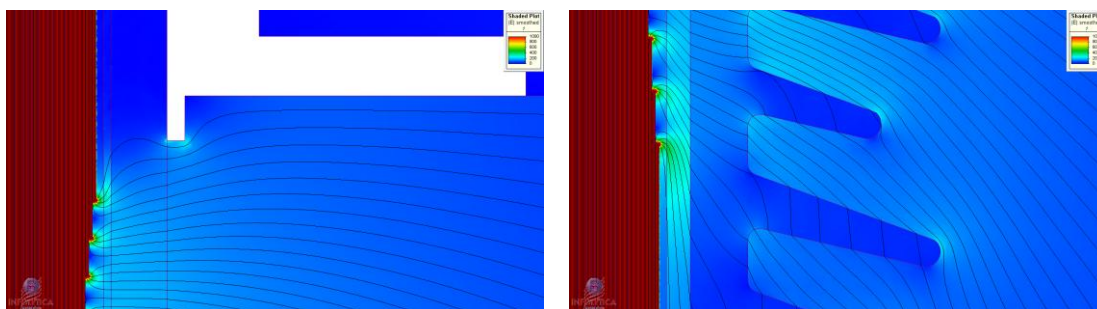
Raspodjela polja u blizini ruba obloge proračunskih modela u realnosti najbolje odgovara polju na rubu posljednje obloge u izolacijskom sustavu. Kako se smanjuje redni broj obloge tako i raspodjela električnog polja u blizini njihovih rubova postaje sve povoljnija u slučaju približno linearne raspodjele potencijala po oblogama pa se sa stajališta sigurnosti izraz (4.7) može koristiti za proračun električnog polja na rubovima svih obloga. Ovime se ne gubi previše na efikasnosti optimiranja jer se najveće električno polje javlja uglavnom na rubu posljednje obloge.

U sljedećem primjeru, na izolacijskom sustavu inverznog strujnog transformatora u kojeg je umetnuto 30 obloga, detaljnije je objašnjena ova pojava. Zadana je linearna raspodjela potencijala po oblogama, a radijusi obloga linearno rastu s porastom njihova rednog broja. Analizirana su polja u blizini rubova 30., 15. i 2. obloge. Polja na rubovima obloga ovise o debljini izolacije i padu napona prema oblozi s manjim rednim brojem. Kako su debljine izolacije i padovi napona za sva tri promatrana slučaja jednaki, prema izrazu (4.7) dobit će se i jednake vrijednosti polja na rubovima obloga. Za 30., 15. i 2. oblogu napravljen je dodatno proračun polja na rubu obloge, prema kojem električno polje na rubu 30. obloge iznosi 31,24 kV/mm, na rubu 15. obloge 29,47 kV/mm i na rubu 2. obloge 29,04 kV/mm. Slika 4.14 prikazuje električna polja i ekvipotencijalne linije u blizini ruba za sve tri obloge. Može se uočiti kako su ekvipotencijalne linije najgušće raspoređene u blizini ruba 30. obloge, nešto rjeđe u slučaju 15. obloge i najrjeđe uz rub 2. obloge.



*Slika 4.14 – Električno polje i ekvipotencijalne linije u blizini ruba triju obloga na različitim položajima unutar uljno-papirne izolacije uz linearnu raspodjelu potencijala*

Električno polje na gornjem rubu posljednje obloge provodnika obično je nešto jače od polja na njenom donjem rubu. Razlog tomu je najčešće mali aksijalni razmak donjeg ruba od prirubnice koja je na istom potencijalu, tj. uzemljena je. Prirubnica povoljno utječe na raspored ekvipotencijalnih linija u blizini ruba obloge (*Slika 4.15a*), čime se smanjuje jakost polja na samom rubu. *Slika 4.15b* prikazuje polje i ekvipotencijalne linije koje oštro obilaze gornji rub posljednje obloge. U slučaju kad je uljni nastavak provodnika predviđen za montažu strujnih transformatora, tada strujni transformatori preuzimaju ulogu prirubnice i povoljno djeluju na polja oko donjeg ruba uzemljene obloge.



a

b

Slika 4.15 – Utjecaj prirubnice na smanjenje jakosti električnog polja na donjem rubu uzemljene obloge provodnika (a), polje i ekvipotencijalne linije u blizini gornjeg ruba iste obloge (b)



## **5. Dielektrička naprežanja uljno-papirne izolacije mjernih transformatora**

Osim korištenja kondenzatorskih obloga, postoji još čitav niz mjera za smanjenje dielektričkih naprežanja u visokonaponskim uređajima. Lokalno jaka polja na elektrodama moguće je umanjiti optimiranjem oblika elektroda [37]. U [38] je opisano optimiranje oblika zaslona na spoju izvoda namota energetskog transformatora i provodnika, korištenjem optimizacijske metode poznate kao evolucijska strategija (engl. *evolution strategy*), a u [39] dimenzioniranje potencijalnih prstena provodnika izoliranih plinom SF<sub>6</sub>. Kod energetskih transformatora, kako bi se povećala dielektrička čvrstoća uljnih kanala, koristi se uljno-barijerna izolacija. Ona se sastoji od uljnih kanala međusobno odvojenih barijerama od prešpana [40]. Razlog umetanja barijera leži u činjenici da uži uljni kanali mogu podnijeti jača električna polja.

Utjecaj na raspodjelu polja po visini izolatora ima i sam oblik izolatora, a ako se njegova površina postavi okomito na ekvipotencijalne linije, naprežanja će biti minimalna [41]. U [42] je opisan izbor optimalnog kuta skošenja epoksidnog izolatora s obzirom na tangencijalna naprežanja. Osim navedenih mjera, sami izolacijski materijali svojim dielektričnostima utječu na električno polje pa se mogu koristiti za ujednačenje naprežanja [43]. Dielektričnosti materijala utječu na kapacitivnu raspodjelu udarnih i izmjeničnih napona, dok na raspodjelu istosmjernog napona utječu vodljivosti materijala [44].

Posljednjih se godina na izolatorima u distribucijskim mrežama intenziviralo ujednačavanje raspodjele napona i polja po visini izolacije, primjenom nelinearnih materijala koji mijenjanjem otpora omogućuju kontrolu naprežanja. Uglavnom su to polimeri punjeni ugljikovim vlaknima, čija primjena zasad nije moguća na visokim naponima zbog nepovoljne nelinearne U-I karakteristike. Novija istraživanja na ovom području idu u smjeru punjenja polimernih izolatora cink-oksidskim mikrovaristorima čija svojstva omogućuju kontrolu raspodjele napona u mrežama nazivnog napona i do 100 kV [45], [46].

Danas su na visokom naponu izolacijski sustavi kondenzatorskog tipa u širokoj primjeni. U ovom poglavlju opisani su postupci proračuna potencijala kondenzatorskih obloga i električnog polja te je istražen utjecaj pojedinih parametara obloga na njihove raspodjele.

## 5.1 Proračun potencijala i jakosti električnog polja

U prethodnom poglavlju izveden je analitički izraz za polje na rubu kondenzatorske obloge koje ovisi o geometrijskim parametrima obloga, točnije debljini izolacije među oblogama i padu naponu među njima. Dakle, za analitički proračun polja treba najprije odrediti potencijale obloga. Njih je moguće računati numerički, metodom konačnih elemenata, ali to je zahtjevno i dugotrajno s obzirom na generiranje mreže konačnih elemenata. Drugi način, koji je ovdje i korišten, jest određivanje potencijala obloga primjenom metode napona čvorova. Međutim, za analizu naprezanja uljnih kanala i tangencijalnog naprezanja na granici ulja i papira ipak je potrebno provesti numerički proračun, čiji su ulazni podaci geometrijski parametri i potencijali obloga.

Prema Gaussovom teoremu (5.1), električni tok kroz zatvorenu plohu proporcionalan je ukupnom naboju koji je tom istom plohom obuhvaćen:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho \cdot dV. \quad (5.1)$$

Elektrostatsko polje je konzervativno jer njegov integral ne ovisi o izboru puta. Stoga je integral električnog polja po zatvorenoj krivulji jednak nuli:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0. \quad (5.2)$$

Primjenom Stokesovog teorema i teorema o divergenciji, integralne jednadžbe polja prevode se u diferencijalni oblik:

$$\nabla \vec{D} = \rho, \quad (5.3)$$

$$\nabla_x \vec{E} = 0, \quad (5.4)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}. \quad (5.5)$$

Jakost električnog polja jednaka je negativnom gradijentu potencijala:

$$\vec{E} = -\nabla U. \quad (5.6)$$

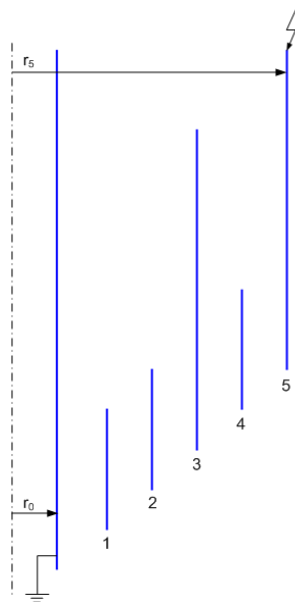
Uvrštavanjem izraza (5.5) u (5.3), a zatim (5.3) u (5.6), uz pretpostavku da nema slobodnog naboja ( $\rho=0$ ), dobije se Laplaceova jednadžba:

$$\nabla^2 U = 0, \quad (5.7)$$

koja se može riješiti metodom konačnih elemenata. Kapacitet, u slučaju linearnih materijala, ovisi o geometriji i dielektričnosti pa općenito vrijedi sljedeći izraz:

$$C = \frac{\oint_S \epsilon \vec{E} \cdot dS}{\int_l \vec{E} \cdot dl}, \quad (5.8)$$

u kojem brojnik predstavlja naboj obuhvaćen plohom  $S$ , a nazivnik napon između elektroda kondenzatora. Kapacitet među oblogama određen je duljinom njihova preklopa, njihovim radijusima i dielektričnošću. Ako debljina obloge nije zanemariva u odnosu na debljinu izolacije među oblogama, tada ju je potrebno uzeti u obzir pri proračunu njihova međusobnog kapaciteta. Za tipičan izolacijski sustav čija je nadomjesna shema prikazana na slici 2.8, raspodjela napona se može analitički odrediti. Naime, radi se o sustavu u kojem svaka obloga ima dozemni kapacitet, odnosno niti jedna obloga ne zakriljuje u potpunosti niti jednu oblogu prema uzemljenoj cijevi. Žele li se pronaći optimalni parametri obloga, potrebno je omogućiti analizu nekih dosad netipičnih konfiguracija pri čemu je moguće da obloga s manjim rednim brojem u potpunosti zaklanja neke s višim rednim brojem, koji tada „ne vide“ uzemljenu cijev. Zbog kompleksnosti ovakvih sustava jednostavnije je naponske prilike računati primjenom metode napona čvorova. Na primjeru jednog „netipičnog“ sustava (Slika 5.1) objasnit će se postupak proračuna potencijala obloga.



Slika 5.1 – Primjer sustava s pet obloga

Nakon izbora broja obloga i njihovih geometrijskih parametara potrebno je formirati matricu međusobnih kapaciteta  $\mathbf{C}_M$  i vektor kapaciteta  $\mathbf{C}_Z$  obloga prema zemlji. U promatranom slučaju treća obloga osim kapaciteta prema drugoj i četvrtoj ima i kapacitet prema petoj oblozi, što je i vidljivo u matrici kapaciteta među oblogama  $\mathbf{C}_M$ :

$$\mathbf{C}_M = \begin{bmatrix} 0 & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & 0 & C_{23} & 0 & 0 \\ 0 & C_{32} & 0 & C_{34} & C_{35} \\ 0 & 0 & C_{43} & 0 & C_{45} \\ 0 & 0 & C_{53} & C_{54} & 0 \end{bmatrix}.$$

Nadalje, treća obloga u potpunosti zaklanja četvrtu prema uzemljenoj cijevi pa je taj kapacitet u vektoru dozemnih kapaciteta  $\mathbf{C}_Z$  jednak nuli:

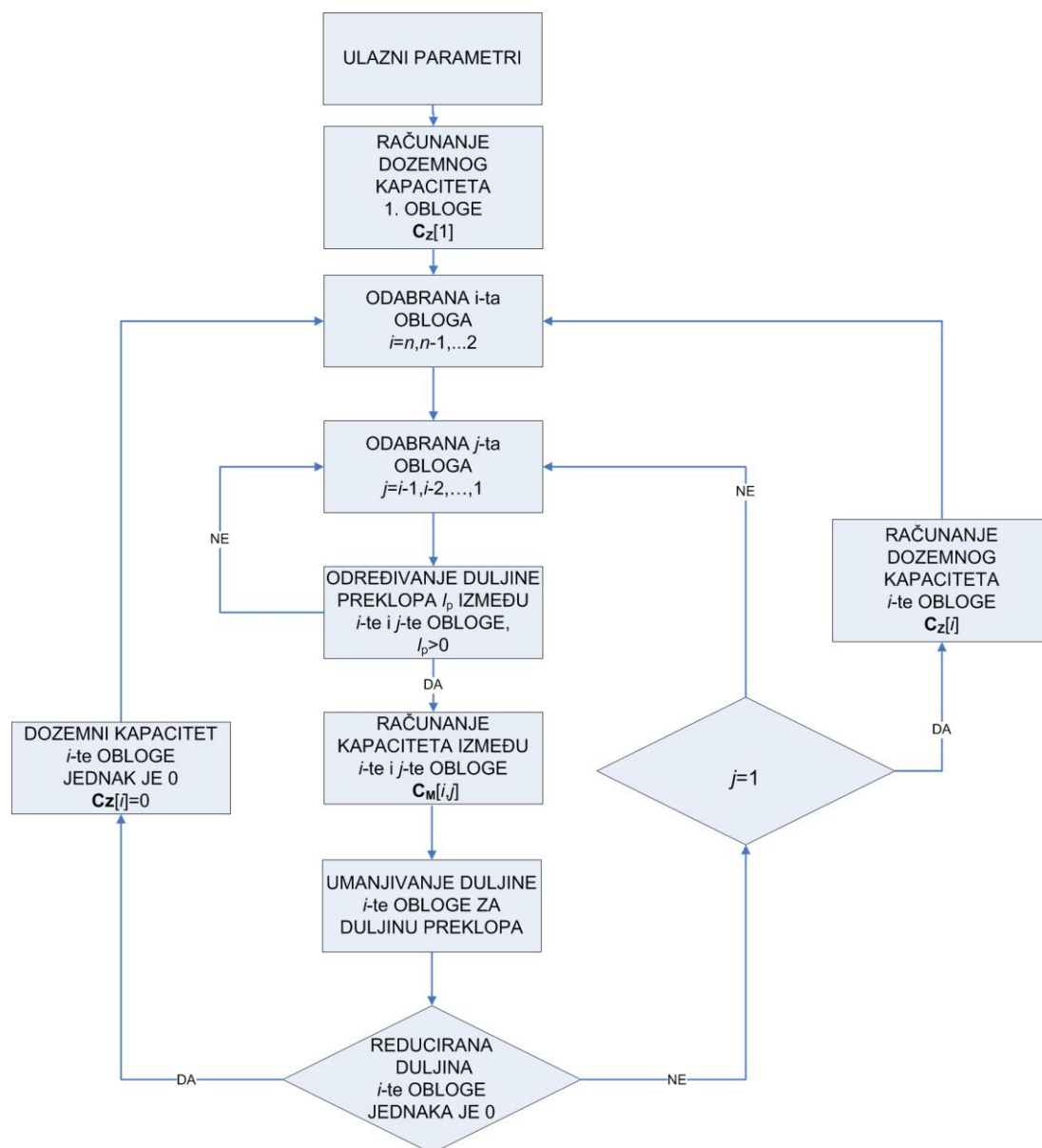
$$\mathbf{C}_Z = \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ C_{30} \\ 0 \\ C_{50} \end{bmatrix}.$$

Iz  $\mathbf{C}_M$  i  $\mathbf{C}_Z$  formira se matrica admitancija  $\mathbf{Y}$  tako da su joj dijagonalni elementi sume svih admitancija vezanih na pripadajući čvor, dok su njeni izvandijagonalni elementi negativne vrijednosti admitancija među pojedinim čvorovima. Matrice  $\mathbf{C}_M$  i  $\mathbf{Y}$  simetrične su s obzirom na dijagonalu. Matrica  $\mathbf{Y}$  je reda  $n-1$  jer je upravo toliko obloga na slobodnom potencijalu, a napon je narinut između posljednje obloge i uzemljene cijevi:

$$\mathbf{Y} = j\omega \begin{bmatrix} C_{12} + C_{10} & -C_{12} & 0 & 0 \\ -C_{21} & C_{21} + C_{23} + C_{20} & -C_{23} & 0 \\ 0 & -C_{32} & C_{32} + C_{34} + C_{35} + C_{30} & -C_{34} \\ 0 & 0 & -C_{43} & C_{43} + C_{45} \end{bmatrix}.$$

Ulazni podatci potrebni za određivanje matrica  $\mathbf{C}_M$  i  $\mathbf{C}_Z$ , a time i matrice admitancija  $\mathbf{Y}$ , su polumjeri i duljine obloga, aksijalni pomak među oblogama  $a$ , zatim vanjski polumjer uzemljene cijevi  $r_0$ , debljina obloge  $d_0$  i konačno broj obloga  $n$ . Za proračun kapaciteta potrebno je odrediti duljine preklopa među pojedinim oblogama. Općenito, za bilo kakav sustav obloga, kapaciteti se mogu odrediti korištenjem algoritma čiji dijagram toka prikazuje slika 5.2. Ulazni podatci su

geometrijski parametri obloga. Najprije se izračuna dozemni kapacitet prve obloge, a zatim svi ostali kapaciteti. Brojila  $i, j$  označavaju redne brojeve obloga među kojima se određuju kapaciteti. Počevši od posljednje,  $n$ -te obloge, brojilo  $i$  poprima vrijednosti  $i=n, n-1, \dots, 2$ , pri čemu se određuju duljine preklopa i računaju kapaciteti  $i$ -te, obloge prema ostalim oblogama s nižim rednim brojem  $j=i-1, i-2, \dots, 1$ .



Slika 5.2 – Dijagram toka algoritma za proračun kapaciteta

Kada se, ako postoji, odredi kapacitet između  $i$ -te i  $j$ -te obloge, duljina  $i$ -te obloge se reducira za duljinu preklopa s  $j$ -tom oblogom. Stanje brojila  $j$  se umanjuje za 1, a preostala reducirana duljina  $i$ -te obloge koristi se za daljnji račun duljine preklopa i kapaciteta. Ako je tijekom reduciranja duljina  $i$ -te obloge postane jednaka ničisti, znači da je ta obloga potpuno zaslonjena s  $j$ -tom oblogom i nema kapaciteta

prema oblogama s rednim brojem manjim od  $j$ . Ako je brojilo  $j$  poprimilo vrijednost 1, a reducirana duljina  $i$ -te obloge je još uvijek veća od ništične, to znači da obloga „vidi“ uzemljenu cijev pa se tada njena preostala duljina rabi za račun dozernog kapaciteta.

Da bi se mogli odrediti potencijali obloga potrebno je još odrediti vektor struja čvorova. Elementi vektora struja čvorova su umnošci vrijednosti primjenjenog napona i admitancije između promatranog i čvora u kojem je priključen naponski izvor. Ako čvorovi, tj. obloge nemaju kapacitet prema posljednjoj oblozi, pripadajući element je nula. Za promatrani slučaj naponski izvor priključen na oblogu s rednim brojem 5 koja ima kapacitete prema trećoj i četvrtoj oblozi:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U \cdot j\omega C_{35} \\ U \cdot j\omega C_{45} \end{bmatrix}.$$

Vektor potencijala čvorova  $\boldsymbol{\varphi}$  računa se iz izraza:

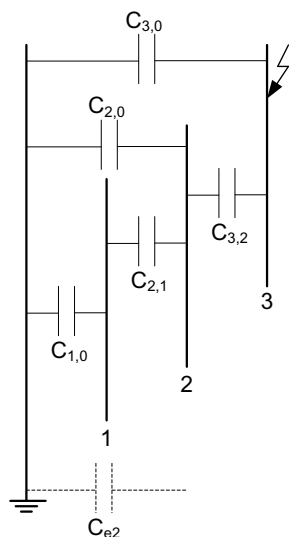
$$\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{I}. \quad (5.9)$$

Kada su poznati potencijali obloga mogu se odrediti aksijalna, radijalna i polja na rubovima obloga. U nastavku će se analizirati kako pojedinim parametrima obloga utjecati na raspodjelu napona.

## **5.2 Utjecaj radijusa obloga na raspodjelu napona**

Jako je malo objavljene literature koja se bavi problematikom izbora parametara obloga mjernih transformatora. U [13] autor piše o pozitivnim efektima kondenzatorskih obloga na električno polje u izolaciji strujnih transformatora. Vezano za izbor parametara obloga navedeno je samo kako se biraju tako da polja u aksijalnom i radijalnom smjeru ne prelaze 0,7 kV/mm, odnosno 13 kV/mm. U [15] autorica koristi vlastiti program u kombinaciji s komercijalnim programskim paketom baziranim na metodi konačnih elemenata, kako bi iterativno odredila optimalne radijuse obloga. Vlastiti program rabi za proračun raspodjele napona i prilagođavanje radijusa obloga, a komercijalni program za proračun kapaciteta i polja. Kako dosad nije objavljen analitički izraz kojim bi se mogli odrediti pojedini parametri obloga, pažnja je usmjerena na to područje. U ovom poglavlju analizira se utjecaj promjene radijusa, duljina i broja obloga na raspodjele polja i potencijala.

Sustavi koji se analiziraju imaju uvijek jednake aksijalne razmake  $a$  među oblogama i svaka obloga ima dozemni kapacitet, odnosno niti jedna obloga s manjim rednim brojem ne zaklanja potpuno prema cijevi niti jednu oblogu s većim rednim brojem. Za početak je razmotren jednostavan sustav s tri kondenzatorske obloge (Slika 5.3), od kojih je treća na 100 % potencijala, a preostale su na slobodnom potencijalu.

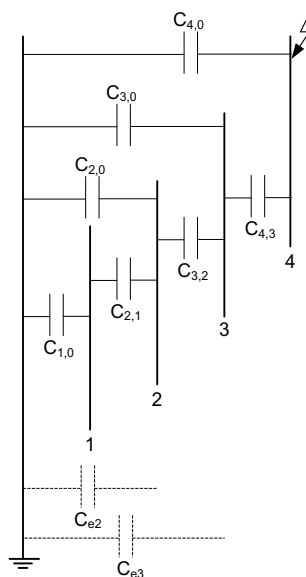


Slika 5.3 – Sustav s tri obloge

Da bi se napon jednoliko rasporedio moraju biti ispunjena dva uvjeta

1.  $C_{2,1} = C_{1,0}$
2.  $C_{3,2} = 2C_{e2}$ , gdje je  $C_{e2}$  nadomjesni kapacitet svih obloga od druge prema cijevi, odnosno  $C_{e2} = C_{1,0} \cdot C_{2,1} / (C_{1,0} + C_{2,1}) + C_{2,0}$

Ako se u drugi uvjet uvrsti prvi, dobit će se  $C_{3,2} = C_{1,0} + 2C_{2,0}$ .



Slika 5.4 – Sustav s četiri obloge

Slika 5.4 prikazuje sustav s četiri obloge. U ovom slučaju, da bi se ostvarila jednolika raspodjela napona moraju biti ostvarena tri uvjeta:

1.  $C_{2,1} = C_{1,0}$
2.  $C_{3,2} = 2C_{e2} = C_{1,0} + 2C_{2,0}$
3.  $C_{4,3} = 3C_{e3}$  gdje je  $C_{e3}$  nadomjesni kapacitet svih obloga od treće prema cijevi, odnosno  $C_{e3} = C_{e2} \cdot C_{3,2} / (C_{e2} + C_{3,2}) + C_{3,0} = C_{1,0} + 2C_{2,0} + 3C_{3,0}$

Općenito, da bi se ostvarila jednolika raspodjela napona za sustav od  $n$  obloga mora biti zadovoljen  $n-1$  uvjet:

1.  $C_{2,1} = C_{1,0}$
2.  $C_{3,2} = 2C_{e2} = C_{1,0} + 2C_{2,0}$
3.  $C_{4,3} = 3C_{e3} = C_{1,0} + 2C_{2,0} + 3C_{3,0}$
- ...
- $n-1$ .  $C_{n,n-1} = (n-1)C_{e(n-1)} = C_{1,0} + 2C_{2,0} + 3C_{3,0} + \dots + (n-1)C_{n-1,0}$

Uz jednake aksijalne razmake  $a$ , jednake duljine svih obloga  $l$  te uz zanemarive debljine obloga, mogu se gornji izrazi zapisati na sljedeći način:

$$\frac{l-a}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{l}{\ln \frac{r_1}{r_0}}, \quad (5.10)$$

$$\frac{l-a}{\ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{l}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{2a}{\ln \frac{r_2}{r_0}}, \quad (5.11)$$

$$\frac{l-a}{\ln \frac{r_4}{r_3}} = \frac{l}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{2a}{\ln \frac{r_2}{r_0}} + \frac{3a}{\ln \frac{r_3}{r_0}}, \quad (5.12)$$

...

$$\frac{l-a}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} = \frac{l}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{2a}{\ln \frac{r_2}{r_0}} + \frac{3a}{\ln \frac{r_3}{r_0}} + \dots + \frac{(n-1)a}{\ln \frac{r_{n-1}}{r_0}}. \quad (5.13)$$

U izrazima (5.10) do (5.13) nepoznanice su radijusi obloga pa je riječ o sustavu  $n-1$  jednadžbi s  $n$  nepoznanica. Ako je zadan radijus bilo koje obloge ovaj sustav postaje rješiv, a svakako je najjednostavnije ako je poznat  $r_1$ , jer se onda iz prve jednadžbe odredi  $r_2$  pa iz sljedeće  $r_3$  itd. U svakoj jednadžbi radijus obloge s najvećim rednim brojem je funkcija radijusa svih obloga s manjim rednim brojem. U



sljedećem koraku izražen je radijus obloge samo kao funkcija radijusa sljedeće obloge, tj.  $r_i=f(r_{i+1})$  pa vrijedi:

$$r_1 = r_0 \left( \frac{r_2}{r_0} \right)^{\frac{-l}{-2l+a}}. \quad (5.14)$$

Uvrštavanjem  $r_1=f(r_2)$  u sljedeći izraz dobije se nakon sređivanja:

$$r_2 = r_0 \left( \frac{r_3}{r_0} \right)^{\frac{1}{3} \frac{2l+a}{l}}. \quad (5.15)$$

Postupak je nastavljen sve do izraza za  $r_8$  kako bi se pokušao odrediti opći član:

$$r_3 = r_0 \left( \frac{r_4}{r_0} \right)^{\frac{3}{2} \frac{l+a}{2l+a}}, \quad (5.16)$$

$$r_4 = r_0 \left( \frac{r_5}{r_0} \right)^{\frac{2}{5} \frac{2l+3a}{l+a}}, \quad (5.17)$$

$$r_5 = r_0 \left( \frac{r_6}{r_0} \right)^{\frac{5}{3} \frac{l+2a}{2l+3a}}, \quad (5.18)$$

$$r_6 = r_0 \left( \frac{r_7}{r_0} \right)^{\frac{3}{7} \frac{2l+5a}{l+2a}}, \quad (5.19)$$

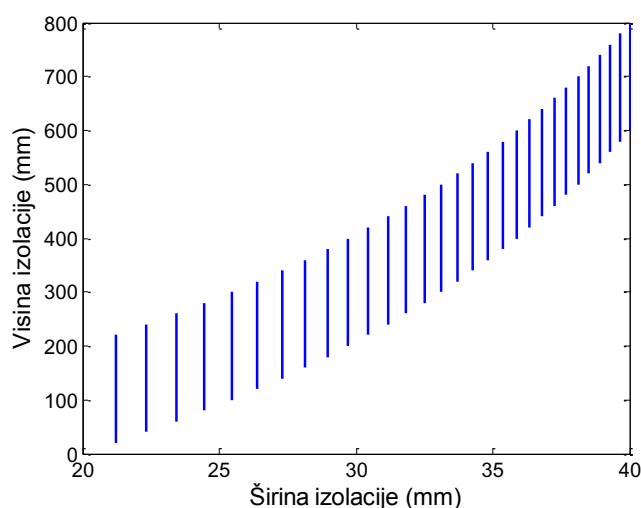
$$r_7 = r_0 \left( \frac{r_8}{r_0} \right)^{\frac{7}{4} \frac{l+3a}{2l+5a}}, \quad (5.20)$$

$$r_8 = r_0 \left( \frac{r_9}{r_0} \right)^{\frac{4}{9} \frac{2l+7a}{l+3a}}. \quad (5.21)$$

Uočena je veza među izvedenim izrazima (5.14) do (5.21) pa se opći član može prikazati ovako:

$$r_i = r_0 \left( \frac{r_{i+1}}{r_0} \right)^{\frac{i}{i+1} \frac{2l+(i-1)a}{2l+(i-2)a}}. \quad (5.22)$$

Kako barem jedan radijus mora biti poznat, izabrano je da to bude radijus posljednje obloge jer se tada lako može odrediti najveće polje na rubu obloge u sustavu, što će se pokazati u nastavku. Izborom  $r_n$  definirana je i debljina papirne izolacije. U sljedećem koraku računa se radijus pretposljednje i tako sve do radijusa prve obloge. Opći izraz (5.22) je rekurzivan i nije dokaziv, pa se mora provjeriti pokusom. Za provjeru izraza (5.22) poslužit će sljedećih nekoliko primjera u kojima je polumjer uzemljene cijevi  $r_0=20$  mm i polumjer zadnje obloge  $r_n=40$  mm. U prvom primjeru odabrano je  $l=200$  mm,  $a=20$  mm,  $n=30$ . Primjenjen je opći izraz (5.22) za određivanje radijusa obloga, a potencijali obloga određeni su metodom napona čvorova.

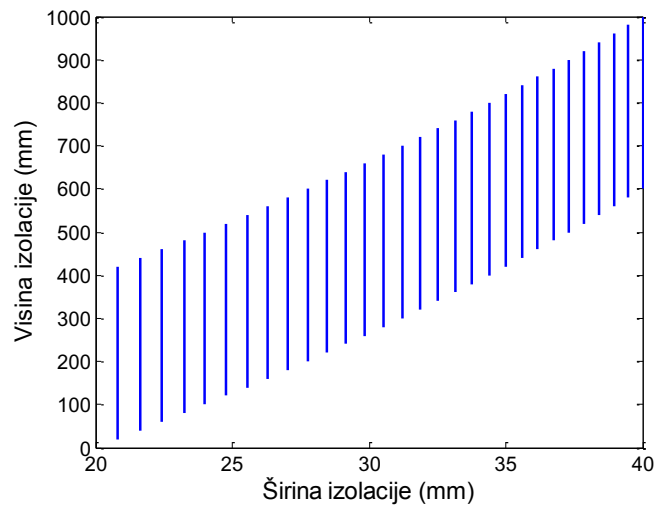


Slika 5.5 – Primjer 1 – grafički prikaz parametara obloga uz zadane  $r_0=20$  mm,  $r_n=40$  mm,  $l=200$  mm,  $a=20$  mm i  $n=30$

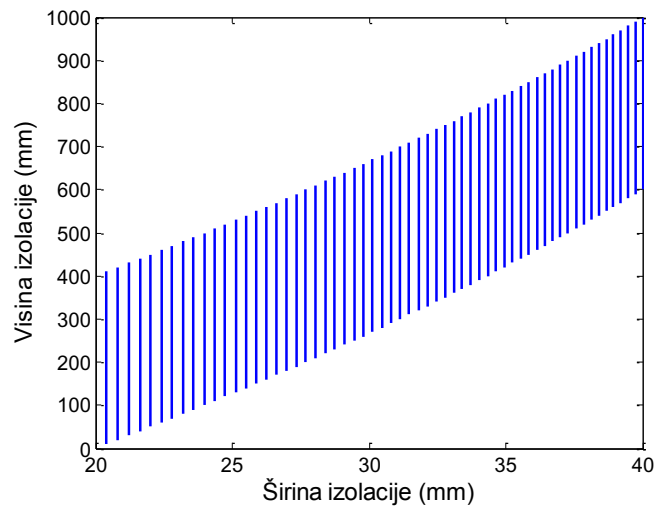
Slika 5.5 daje grafički prikaz parametara obloga, a raspodjela napona za promatrani slučaj je idealna. To znači da je postotno odstupanje pada napona od idealne raspodjele između dvije susjedne obloge, koje je određeno sljedećim izrazom, jednako nuli:

$$u_{\%i} = \frac{nU_{i,i-1} - U}{U} \cdot 100 \% , \quad (5.23)$$

gdje je  $n$  ukupan broj obloga,  $U_{i,i-1}$  pad napona među susjednim oblogama i  $U$  primjenjeni napon. U drugom primjeru odabrano je  $l=400$  mm,  $a=20$  mm i  $n=30$ . Slika 5.6 prikazuje parametre obloga, u ovom slučaju također je  $u_{\%}=0$  za sve padove napona među oblogama. U trećem primjeru odabrano je  $l=400$  mm,  $a=10$  mm i  $n=60$ . Slika 5.7 prikazuje parametre obloga i ponovo je  $u_{\%}=0$  za sve padove napona među oblogama.



Slika 5.6 – Primjer 2 – grafički prikaz parametara obloga uz zadane  $r_0=20$  mm,  $r_n=40$  mm,  $l=400$  mm,  $a=20$  mm i  $n=30$



Slika 5.7 – Primjer 3 – grafički prikaz parametara obloga obloga uz zadane  $r_0=20$  mm,  $r_n=40$  mm,  $l=400$  mm,  $a=10$  mm i  $n=60$

Rezultati testiranja pokazuju da za izabrane  $n$ ,  $r_0$ ,  $r_n$ ,  $l$  i  $a$ , uz uvjet da su sve obloge jednake duljine i da je  $a \in \langle 0, l \rangle$ , izraz (5.22) daje takve radijuse obloga kojima je osigurana idealna raspodjela napona.

U nastavku će se pokazati kako za bilo kakav izbor ulaznih parametara koji ispunjavaju uvjete da su duljine svih obloga jednake, aksijalni razmak pozitivan broj manji od duljine obloge te  $r_n > r_0$ , izraz (5.22) uvijek daje radijuse svih ostalih obloga s vrijednostima iz intervala  $\langle r_0, r_n \rangle$ . Pritom vrijedi  $r_i < r_{i+1}$ . Drugim riječima, pokazat će

se da se za navedene ulazne parametre uvijek mogu odrediti optimalni radijusi obloga.

Primjenom izraza (5.22) dobiju se radijusi obloga koji su veći od  $r_0$ , a manji od  $r_n$ . Ako je tako, onda se za bilo koji izbor  $r_{i+1} > r_0$  mora dobiti takav  $r_i$  za koji vrijedi  $r_0 < r_i < r_{i+1}$ . Da bi vrijedilo  $r_0 < r_i$ , mora biti ispunjeno:

$$r_i - r_0 = r_0 \left( \frac{r_{i+1}}{r_0} \right)^{\frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a}} - r_0 = r_0^{1 - \frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a}} r_{i+1}^{\frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a}} - r_0 > 0, \quad (5.24)$$

nakon sređivanja dobije se:

$$r_{i+1}^{\frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a}} \geq r_0^{\frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a}}. \quad (5.25)$$

Da bi vrijedilo  $r_i < r_{i+1}$  mora biti ispunjeno:

$$r_{i+1} - r_i = r_{i+1} - r_0 \left( \frac{r_{i+1}}{r_0} \right)^{\frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a}} = r_{i+1} - r_0^{1 - \frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a}} r_{i+1}^{\frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a}} > 0. \quad (5.26)$$

Nakon sređivanja dobije se:

$$r_{i+1}^{1 - \frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a}} \geq r_0^{1 - \frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a}}. \quad (5.27)$$

Kako je  $r_{i+1} > r_0$ , nejednakosti (5.25) i (5.27) vrijede ako su eksponenti veći od nule. Duljina obloge  $l$  uvijek je pozitivan broj, aksijalni razmak  $a$  je pozitivan broj manji od  $l$ , a  $i$  je prirodan broj. Deriviranjem izraza koji se javlja u eksponentima obji nejednakosti po aksijalnom razmaku dobije se:

$$\left( \frac{d}{da} \right) \left( \frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a} \right) = \frac{i}{i+1} \frac{2l}{l + (i-2)a} > 0. \quad (5.28)$$

Ova derivacija je uvijek pozitivna, što znači da je derivirani izraz rastuća funkcija. Kada aksijalni razmak teži ničtici, eksponent poprima vrijednost:

$$\lim_{a \rightarrow 0} \left( \frac{i \cdot 2l + (i-1)a}{i+1 \cdot 2l + (i-2)a} \right) = \frac{i}{i+1} < 1, \quad (5.29)$$

a kada teži duljini obloge:

$$\lim_{a \rightarrow l} \left( \frac{i}{i+1} \frac{2l + (i-1)a}{2l + (i-2)a} \right) = 1. \quad (5.30)$$

Dakle, izraz koji se pojavljuje u eksponentima nejednakosti (5.25) i (5.27) je rastuća funkcija koja poprima vrijednosti iz skupa  $\langle i/i+1, 1 \rangle$ , odnosno njegova vrijednost je uvijek pozitivan broj manji od 1. Zbog toga su svi eksponenti u promatranim nejednakostima pozitivni pa je veća ona strana nejednakosti koja ima veću bazu. Ovime je pokazano kako izraz (5.22) uvijek daje rješenje, odnosno da se uvijek mogu računski odrediti optimalni radijusi obloga.

U svim primjerima radijusi obloga izračunati prema izrazu (5.22) su takvi da debljina izolacije među oblogama opada s porastom njihova rednog broja. U izrazu (4.7) jakost polja na rubu obloge obrnuto je proporcionalna debljini izolacije pa za sustave u kojima debljina izolacije među oblogama opada s porastom njihova rednog broja vrijedi da će maksimalno polje biti uvijek na rubu posljednje obloge. Primjenom izraza (5.22) može se brzo provjeriti je li odabran dobar  $r_n$ , pri čemu je potrebno izračunati samo  $r_{n-1}$  dok bi u slučaju rješavanja sustava jednadžbi (5.10) do (5.13) bilo potrebno izračunati radijuse svih obloga. Pad napona između susjednih obloga jednak je omjeru primjenjenog napona i broja obloga jer je raspodjela napona idealna. Uz zadan  $r_n$  i izračunat  $r_{n-1}$  poznata je i debljina izolacije između zadnje i predzadnje obloge pa je moguće iz izraza 4.7 izračunati polje na rubu zadnje obloge. Ako je polje na rubu obloge manje od dozvoljenog, sustav je predimenzioniran pa u sljedećem koraku treba odabrati nešto manji  $r_n$ . Vrijedi i obrnuto, ako je polje na rubu obloge veće od dozvoljenog, tada treba povećati debljinu izolacije, tj. odabrati nešto veći  $r_n$ .

Izraz (5.22) je upotrebljiv za određivanje optimalnih radijusa obloga izolacijskih sustava u koje se umeću kondenzatorske obloge čija je debljina zanemariva u odnosu na debljinu izolacije među susjednim oblogama. Međutim, u upotrebi su i obloge čija debljina nije zanemariva. Uzme li se u obzir debljina obloge  $d_0$  onda za prve dvije obloge, u slučaju jednolike raspodjele napona, vrijedi iz uvjeta za jednoliku raspodjelu napona:

$$\frac{l-a}{\ln \frac{r_2}{r_1 + d_0}} = \frac{l}{\ln \frac{r_1}{r_0}}, \quad (5.31)$$

$$\frac{l-a}{\ln \frac{r_3}{r_2+d_0}} = \frac{l}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{2a}{\ln \frac{r_2}{r_0}}, \quad (5.32)$$

$$\frac{l-a}{\ln \frac{r_4}{r_3+d_0}} = \frac{l}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{2a}{\ln \frac{r_2}{r_0}} + \frac{3a}{\ln \frac{r_3}{r_0}}, \quad (5.33)$$

...

$$\frac{l-a}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}+d_0}} = \frac{l}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{2a}{\ln \frac{r_2}{r_0}} + \frac{3a}{\ln \frac{r_3}{r_0}} + \dots + \frac{n-1}{\ln \frac{r_{n-1}}{r_0}} a. \quad (5.34)$$

Iako su izrazi (5.31) do (5.34) gotovo identični izrazima (5.10) do (5.13), ovdje ipak nije moguće analitički izraziti radijus obloge kao funkciju radijusa sljedeće obloge,  $r_i=f(r_{i+1})$ , što je bilo moguće kada je  $d_0=0$ . Dakle,  $r_1=f(r_2)$  može se odrediti isključivo numerički uz poznat  $r_2$ . Međutim, moguć je obrnut slučaj, tj. analitički je moguće izraziti  $r_2=f(r_1)$ :

$$r_2 = r_1 + d_0 \left( \frac{r_1}{r_0} \right)^{\frac{l-a}{l}}. \quad (5.35)$$

Kako je sustav jednačbi takav da je radijus obloge s najvećim rednim brojem je funkcija radijusa svih obloga s manjim rednim brojem, odnosno, u sljedećem koraku  $r_3=f(r_1, r_2)$ . Radijus  $r_3$  nije moguće iskazati u ovisnosti samo o  $r_2$  jer ne postoji analitički izraz  $r_1=f(r_2)$ . Ali je zato moguće iskazati  $r_3=f(r_1)$ :

$$r_3 = r_1 + d_0 \left( \frac{r_1}{r_0} \right)^{\frac{2l-a \left( \ln \frac{r_1+d_0}{r_0} + \ln \frac{r_1}{r_0} \right)}{l \ln \frac{r_1+d_0}{r_0} + l \ln \frac{r_1}{r_0} + a \ln \frac{r_1}{r_0}}} + d_0 \left( \frac{r_1}{r_0} \right)^{\frac{l-a \left( l \ln \frac{r_1+d_0}{r_0} + l \ln \frac{r_1}{r_0} - a \ln \frac{r_1}{r_0} \right)}{l \ln \frac{r_1+d_0}{r_0} + l \ln \frac{r_1}{r_0} + a \ln \frac{r_1}{r_0}}}. \quad (5.36)$$

Nastavi li se dalje, mogli bi se izvesti izrazi za radijuse obloga većeg rednog broja pa slično kao za slučaj  $d_0=0$  izvesti opći član  $r_i=f(r_1)$ . Međutim, već sljedeći izraz za  $r_4$  postaje jako složen zbog čega se odustalo od izvođenja općeg člana. Umjesto toga, radijusi obloga određuju se tako da se zada  $r_1$ , a onda se iz izraza (5.31) do (5.34) računaju redom radijusi  $r_2, r_3, \dots, r_n$ . Zatim se izračuna raspodjela napona i jakosti polja te ovisno o njima korigira  $r_1$ . Postupak se ponavlja dok se ne dobije zadovoljavajući rezultat.

U sljedećem primjeru analizira se opisani postupak. Neka je  $r_0=20$  mm,  $l=250$  mm,  $a=25$  mm,  $n=20$ ,  $d_0>0$  i primjenjeni napon  $U=230$  kV, a treba odrediti radijuse svih obloga, tako da jakosti polja na rubovima obloga ne prelaze dozvoljenu vrijednost od 34 kV/mm. U slučaju ujednačene raspodjele napona i jednakih aksijalnih razmaka, sva aksijalna polja su jednaka i iznose:

$$E_a = \frac{U}{na} = 0,46 \text{ kV/mm}, \quad (5.37)$$

što zadovoljava s obzirom na dozvoljeno aksijalno naprezanje.

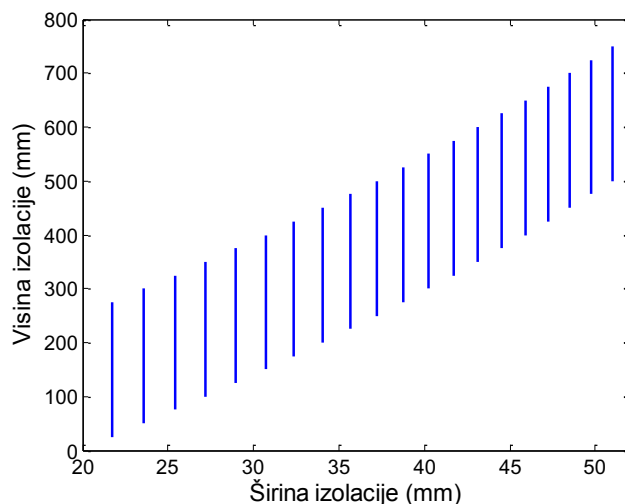
Iterativni postupak određivanja radijusa prikazan je u Tablici 5.1. U prvoj iteraciji izabran je  $r_1=21$  mm za koji je dobiveno preveliko maksimalno polje na rubu obloge  $E_{o,max}$ . Inače, u svim se iteracijama maksimalno polje javljalo na rubu zadnje obloge. Također, u svim je iteracijama ostvarena u potpunosti ujednačena raspodjela napona pa su sva postotna odstupanja napona od idealne raspodjele  $u\%$  jednaka ničtici. Prejako polje iz prve iteracije ukazuje kako je potrebno povećati debljinu izolacije pa je u drugoj iteraciji  $r_1$  uvećan za 1 mm. Toliko povećanje je preveliko,  $E_{o,max}$  se znatno umanjilo, a  $r_{20}$  se jako povećao, što vodi do predimenzioniranja izolacije. Iterativni postupak je nastavljen dok nisu dobiveni optimalni radijusi. Slika 5.8 prikazuje parametre kondenzatorskih obloga za sustav iz 7. iteracije.

Tablica 5.1 – Rezultati iterativnog postupka određivanja radijusa obloga

iteracija	$r_1$ (mm)	$r_{20}$ (mm)	$E_{o,max}$ (kV/mm)
1	21,00	73,14	54,52
2	22,00	113,80	29,79
3	21,50	91,41	39,14
4	21,60	47,76	36,92
5	21,70	49,91	34,91
6	21,80	52,15	33,06
7	21,75	51,02	33,96

U prethodnim primjerima pokazano je kako pravilnim odabirom radijusa obloga ostvariti idealnu raspodjelu napona. Za obloge zanemarive debljine izveden je opći izraz (5.22) koji omogućuje brz i jednostavan proračun radijusa obloga uz zadan  $r_n$ . Sustav jednadžbi (5.10) do (5.13) moguće je riješiti uz zadan radijus bilo koje obloge, a najjednostavnije je ako se zada  $r_1$ . Zanimljiva je činjenica da se za bilo koju kombinaciju ulaznih podataka, uz  $d_0=0$ , mogu pronaći takvi radijusi obloga

koji će osigurati idealnu raspodjelu napona. Ukoliko debljina obloge nije zanemariva, zadaje se  $r_1$  pa se onda redom računaju radijusi obloga s višim rednim brojem iz izraza (5.31) do (5.34).



Slika 5.8 – Grafički prikaz parametara obloga sustava iz 7. iteracije uz zadane  $r_0=20$  mm,  $r_1=21,75$  mm,  $l=250$  mm,  $a=25$  mm,  $n=20$  i  $d_o>0$

Svi optimalni radijusi obloga iz prethodnih primjera bili su takvi da debljina izolacije među oblogama opada s porastom njihova rednog broja. Drugim riječima, koncentracija obloga u radijalnom smjeru prema vanjskom rubu papirne izolacije raste. Kako bi se provjerio i slučaj kada su obloge koncentrirane prema uzemljenoj cijevi, odabran je model na kojem su napravljeni dodatni proračuni.

Dodatno je utjecaj radijusa obloga na raspodjele polja i potencijala, uz nepromijenjene duljine i aksijalne razmake, istražen na 123 kilovoltnom strujnom transformatoru u čiji je izolacijski sustav umetnuto  $n$  obloga. Polja su računata pri naponu 230 kV, što odgovara jednominutnom podnosivom naponu industrijske frekvencije. Radijus cijevi i posljednje obloge se ne mijenjaju, a time ni debljina izolacije. Definirane su dvije funkcije (izrazi (5.38), (5.39) i Slika 5.9) koje omogućuju parametarsko zadavanje radijusa obloga:

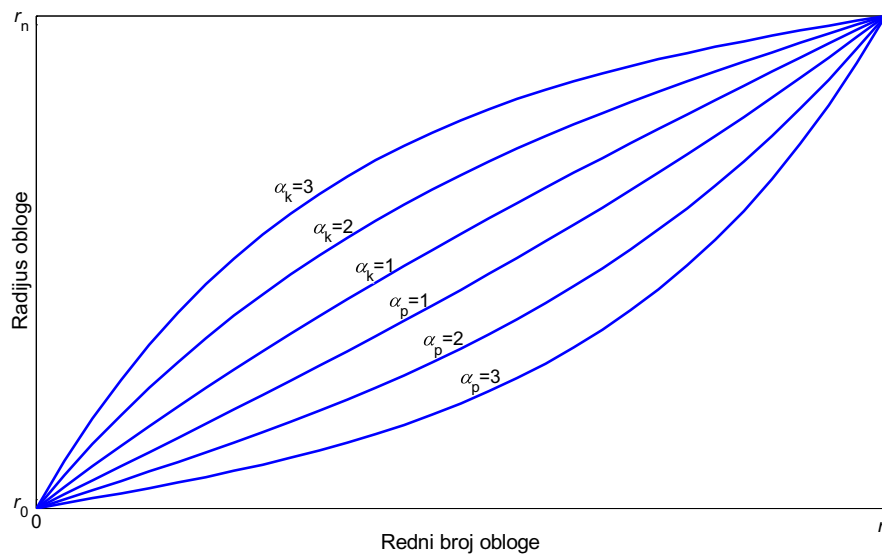
$$r_i = r_0 + r_n - r_0 \frac{sh \left[ \alpha_p \left( 1 - \frac{n-i}{n} \right) \right]}{sh \alpha_p}, \quad (5.38)$$



$$r_i = r_0 + r_n - r_0 \left\{ 1 - \frac{\operatorname{sh} \left[ \alpha_k \left( 1 - \frac{i}{n} \right) \right]}{\operatorname{sh} \alpha_k} \right\}. \quad (5.39)$$

gdje su  $r_0$ ,  $r_i$  te  $r_n$  radijusi cijevi,  $i$ -te i zadnje obloge,  $i$  je redni broj obloge,  $n$  ukupan broj obloga, a  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$  parametri koji koncentriraju obloge u radijalnom smjeru. Prva funkcija koncentrira obloge u blizini uzemljene cijevi što znači da debljina izolacije među njima raste u radijalnom smjeru s porastom njihova rednog broja. Ovakav način neka se zove koncentriranje tipa  $p$ , jer su obloge koncentrirane na početku sustava gledanog u radijalnom smjeru od uzemljene cijevi.

Što je veći parametar  $\alpha_p$ , to je koncentriranje izraženije. Druga funkcija na jednak način koncentrira obloge u blizini posljednje, ovisno o parametru  $\alpha_k$ , pa neka se takav postupak zove koncentriranje tipa  $k$  jer su sada obloge koncentrirane na kraju sustava gledanog u radijalnom smjeru od uzemljene cijevi.

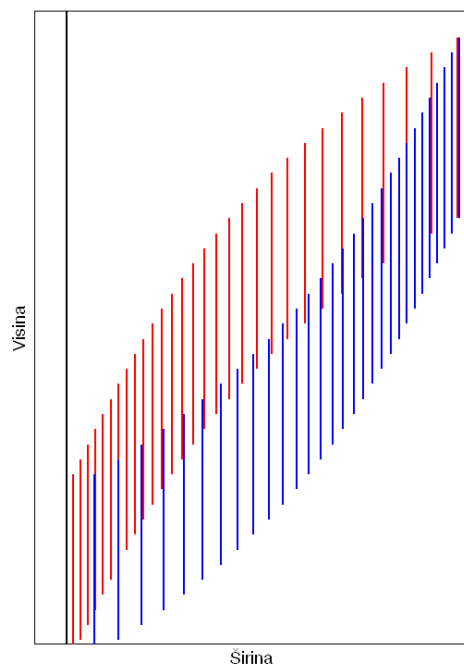


Slika 5.9 – Funkcijska ovisnost radijusa obloga o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$ , 0-ta obloga je uzemljena cijev

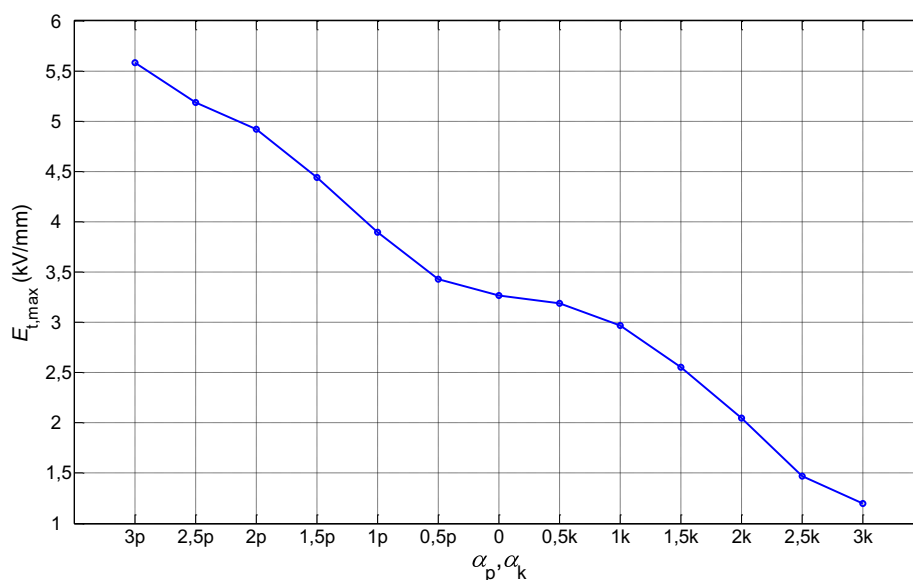
Naravno, moglo se i drugačije definirati funkcije za zadavanje radijusa. Bitno je samo da su radijus cijevi i zadnje obloge stalni, odnosno da se ne mijenja debljina izolacije u radijalnom smjeru, nego samo razmještaj obloga. Slika 5.10 prikazuje dva sustava s oblogama koncentriranim na početku i kraju uz parametre  $\alpha_p = \alpha_k = 2$ .

Utjecaj radijusa obloga istraživao je za sustave definirane parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$  u rasponu vrijednosti od 0,5 do 3 u koracima po 0,5 te za sustav kojem su svi

radijalni razmaci među oblogama jednaki, tj.  $\alpha_p = \alpha_k = 0$ . Slika 5.11 prikazuje ovisnost maksimalnog tangencijalnog polja na granici papira i ulja o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$ , a slika 5.12 pripadajuće minimalne faktore sigurnosti.



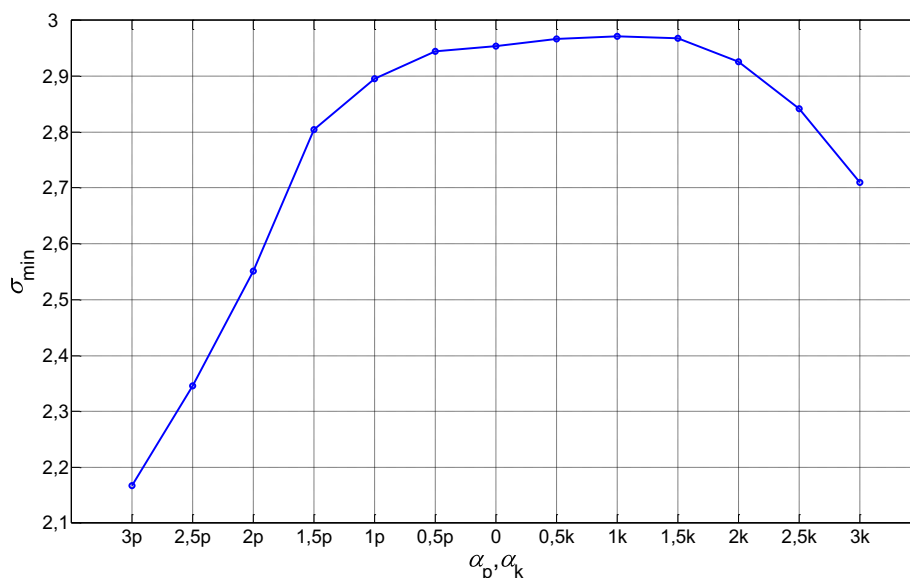
Slika 5.10 – Sustavi s oblogama koncentriranim na početku (crvene obloge,  $\alpha_p=2$ ) i na kraju (plave obloge,  $\alpha_k=2$ )



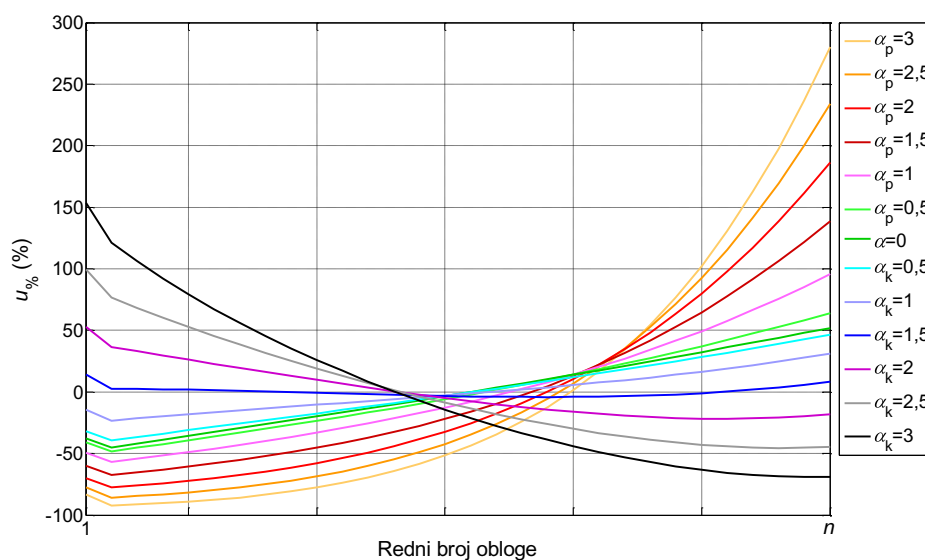
Slika 5.11 – Ovisnost maksimalnog tangencijalnog polja na granici papira i ulja o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$

Rezultati pokazuju kako se koncentriranjem tipa  $k$  smanjuje maksimalna jakost tangencijalnog polja na granici papira i ulja, dok pripadajući faktor sigurnosti raste i u promatranom slučaju svoju maksimalnu vrijednost poprima za

$\alpha_k=1$ . Radijusi obloga u promatranim slučajevima nisu optimalni, što znači da raspodjela napona nije idealna. Postotna odstupanja padova napona među oblogama od idealne raspodjele prikazuje slika 5.13, pri čemu je najpovoljnija raspodjela napona ostvarena uz  $\alpha_k=1,5$ .



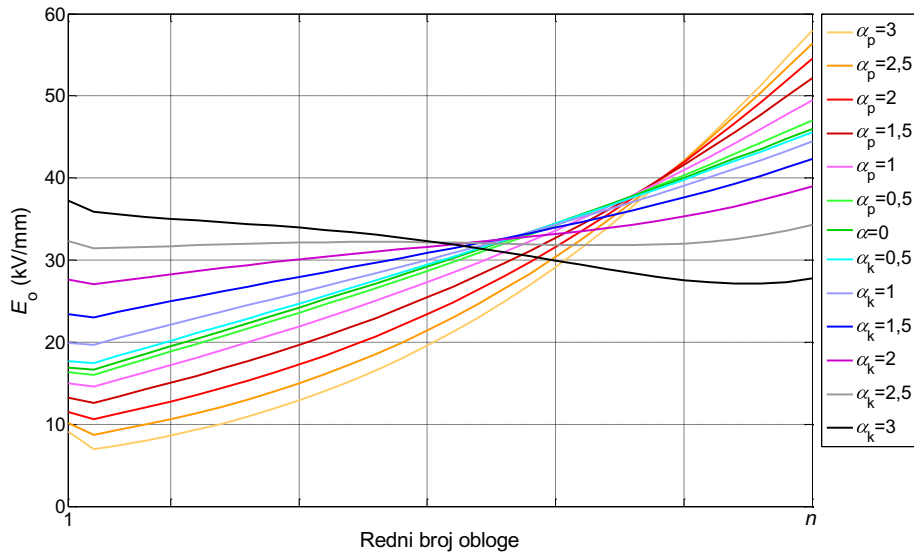
Slika 5.12 – Ovisnost minimalnog faktora sigurnosti tangencijalnog polja na granici papira i ulja o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$



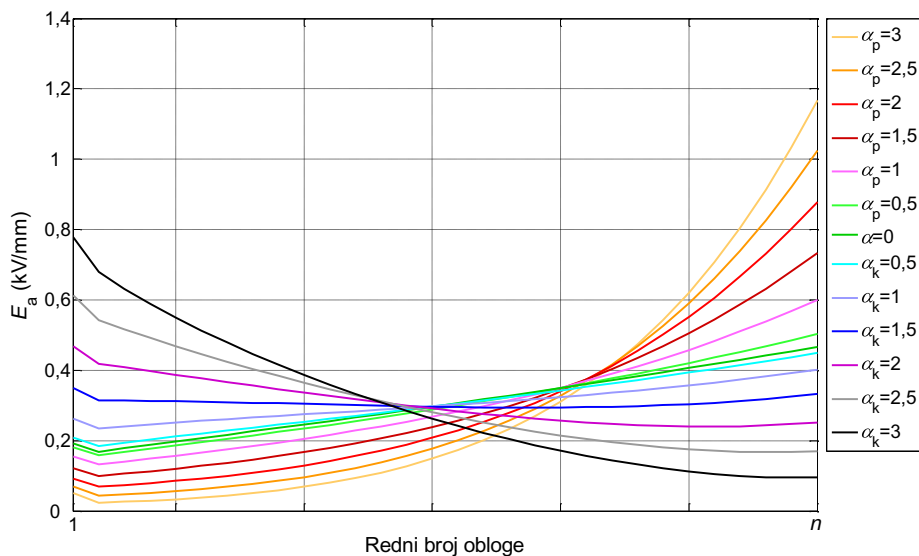
Slika 5.13 – Postotno odstupanje napona u ovisnosti o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$

Koncentriranje obloga tipa  $k$  djeluje povoljno i na polja na rubovima obloga, čiju raspodjelu u ovisnosti o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$  prikazuje slika 5.14. Maksimalna vrijednost polja na rubu obloge u sustavu opada sa smanjenjem  $\alpha_p$ , odnosno s

porastom parametra  $\alpha_k$ , i svoju minimalnu vrijednost u promatranom slučaju postiže za  $\alpha_k=2,5$ . Sve dok je vrijednost parametra  $\alpha_k \leq 2,5$  najveće polje u sustavu javlja se na rubu posljednje obloge. S njegovim daljnjim povećavanjem, polje na rubu posljednje obloge i dalje opada, ali to više nije i maksimalno polje u izolaciji.



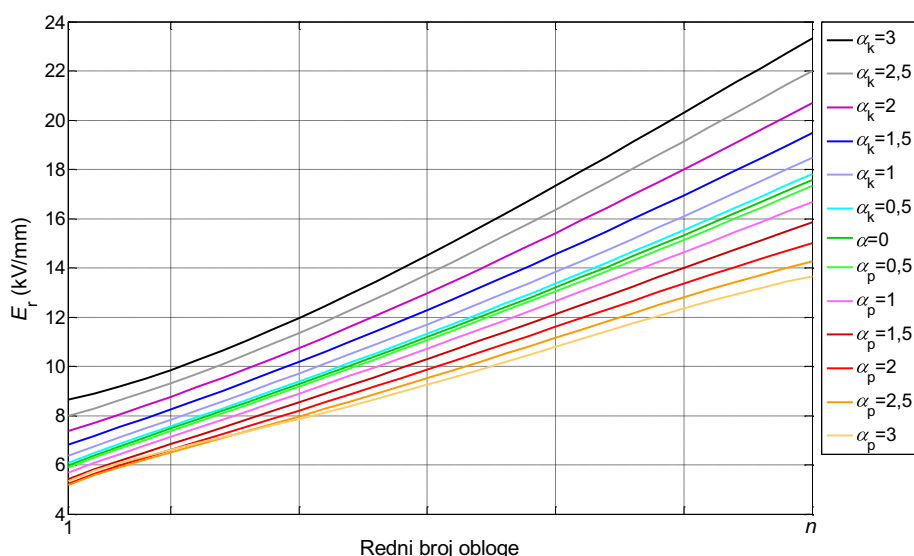
Slika 5.14 – Ovisnost polja na rubovima obloga o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$



Slika 5.15 – Ovisnost raspodjele aksijalnih polja u papiru o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$

Koncentriranje tipa  $k$  povoljno utječe i na aksijalna naprezanja u papiru. Slika 5.15 prikazuje njihove raspodjele u ovisnosti o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$ , a minimalna aksijalna naprezanja postižu se uz  $\alpha_k=1,5$ . Ipak, koncentriranje obloga prema kraju

sustava ne utječe pozitivno na radijalna polja među oblogama, čiju ovisnost o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$  prikazuje slika 5.16.



Slika 5.16 – Ovisnost raspodjele radijalnih polja među oblogama o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$

Ovisnost raspodjele radijalnih polja je zapravo potpuno suprotna u uspoređivanju s ovisnostima raspodjele aksijalnih, i polja na rubovima obloga o parametrima  $\alpha_p$  i  $\alpha_k$ , tj. povoljnija naprezanja dobiju se ukoliko se primjeni koncentriranje tipa  $p$ . U poglavlju 3.3 spomenuto je kako su kao kriteriji za naprezanja u papiru mjerodavna aksijalna i polja na rubovima obloga, a radijalna polja koristit će se samo kao kontrolni podatak. Upravo ovaj posljednji primjer pokazuje jedan od nedostataka tradicionalnog pristupa dimenzioniranju izolacije koji uzima radijalna naprezanja kao kriterij.

Na temelju rezultata proračuna može se zaključiti kako koncentriranje obloga tipa  $k$  povoljno utječe na ujednačenje dielektričkih naprezanja. Slični rezultati dobiveni su i primjenom izraza (5.22) za izračun optimalnih radijusa obloga. Tada su također optimalni radijusi obloga bili takvi da debljina izolacije među oblogama opada s porastom njihova rednog broja.

Iako su u svim dosad promatranim slučajevima optimalni radijusi obloga dobiveni korištenjem izraza (5.22), odnosno rješavanjem sustava (5.10) do (5.13), bili takvi da debljina izolacije među oblogama opada s porastom njihova rednog broja, to ne znači da je nemoguće ostvariti idealnu raspodjelu potencijala i u drugim slučajevima. Da bi debljina izolacije među oblogama zanemarive debljine uvijek opadala s porastom njihova rednog broja moralo bi vrijediti:

$$r_i - r_{i-1} > r_{i+1} - r_i, \quad (5.40)$$

Odnosno:

$$2r_i - r_{i-1} - r_{i+1} > 0. \quad (5.41)$$

Nakon uvrštavanja (5.22) u (5.41) i sređivanja dobije se:

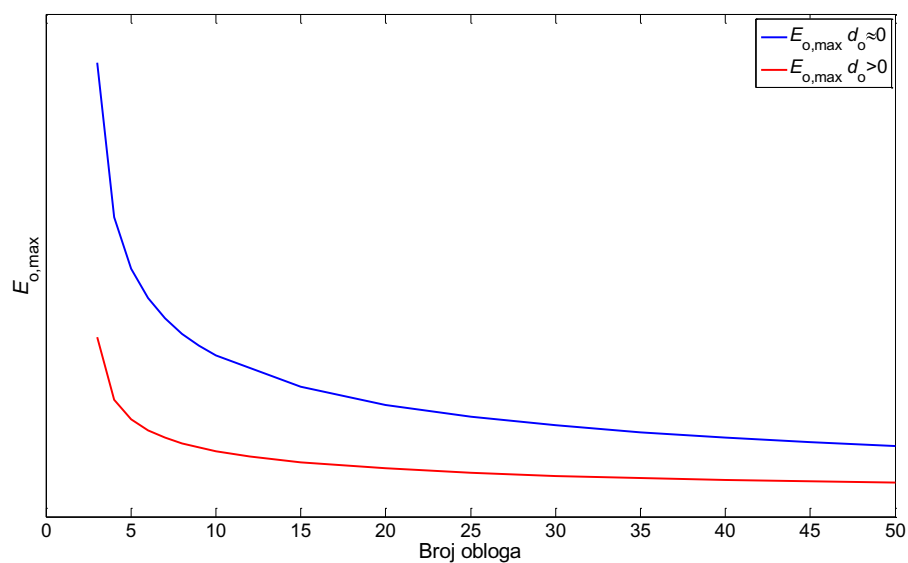
$$2 \left( \frac{r_{i+1}}{r_0} \right)^{\frac{i-1}{i+1} \frac{2l+(i-1)a}{2l+(i-2)a}} - \left( \frac{r_{i+1}}{r_0} \right)^{\frac{i-1}{i+1} \frac{2l+(i-1)a}{2l+(i-3)a}} - \frac{r_{i+1}}{r_0} > 0. \quad (5.42)$$

Uvrštavanjem različitih  $r_{i+1}$ ,  $l$  i  $a$  uz uvjet  $0 < a < l$  u izraz (5.42), pokazalo se da navedena nejednakost ne vrijedi uvijek, odnosno da se idealna raspodjela napona može postići bez da su obloge koncentrirane prema kraju. Na izolacijskom sustavu mjernog transformatora iz prethodnog primjera takvi su slučajevi postignuti kada je jako povećana duljina obloga, npr. za duljine obloga gotovo 5 veće od uobičajenih, što bi rezultiralo nerealno visokim izolacijskim sustavom, ili ako se izabere jako velik  $r_n$ , odnosno jako poveća debljina izolacije. Na promatranom sustavu s  $n$  obloga nije se uspjelo postići da debljina izolacije među oblogama raste s njihovim rednim brojem, a da duljina obloga i debljina izolacije ostanu u realnim granicama. Ipak, s povećanjem debljine izolacije među oblogama na kraju sustava opadaju polja na njihovim rubovima, pa je zanimljivo spoznati da je takav slučaj barem teorijski moguć. U nastavku, analizirat će se utjecaj izbora broja obloga i njihovih duljina na raspodjelu napona polja.

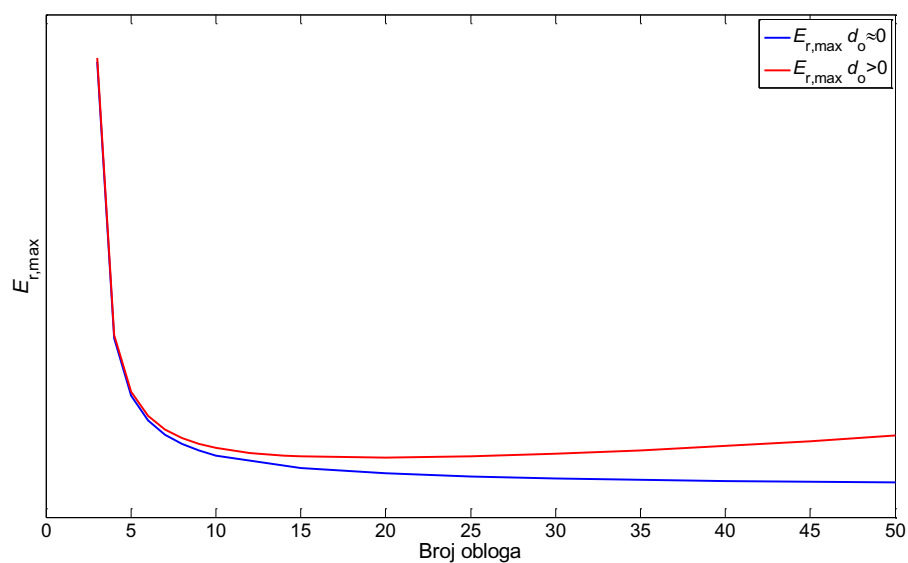
### 5.3 Utjecaj broja obloga na raspodjele polja i potencijala

Na primjeru izolacijskog sustava 123 kilovoltnog strujnog transformatora, istražen je utjecaj izbora broja obloga na radijalna te polja na rubovima obloga i tangencijalna naprezanja na granici papira i ulja. Debljina izolacije, duljine obloga i suma aksijalnih razmaka su nepromijenjeni za sve analizirane slučajeve. Za zadani broj obloga određuju se optimalni radijusi. Promatrani su slučajevi kada su debljine obloga  $d_0$  zanemarive i kada nisu zanemarive. Maksimalno polje na rubovima obloga opada s porastom broja obloga za slučajeve  $d_0 \approx 0$  i  $d_0 > 0$  (Slika 5.17).

Ovisnost maksimalnog radijalnog polja o broju obloga prikazuje slika 5.18. U slučaju kada su debljine obloga zanemarive, maksimalno radijalno polje opada s porastom njihova broja. Ako debljina obloga nije zanemariva, u početku  $E_{r,max}$  naglo opada s porastom  $n$ , doseže minimum, a zatim polagano raste.

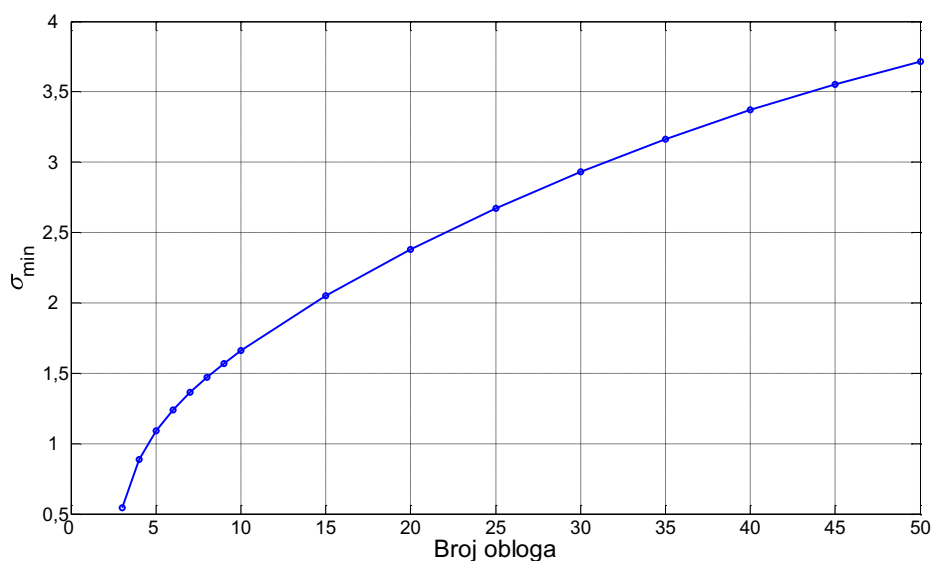


Slika 5.17 – Ovisnost maksimalnog polja na rubu obloge o broju obloga

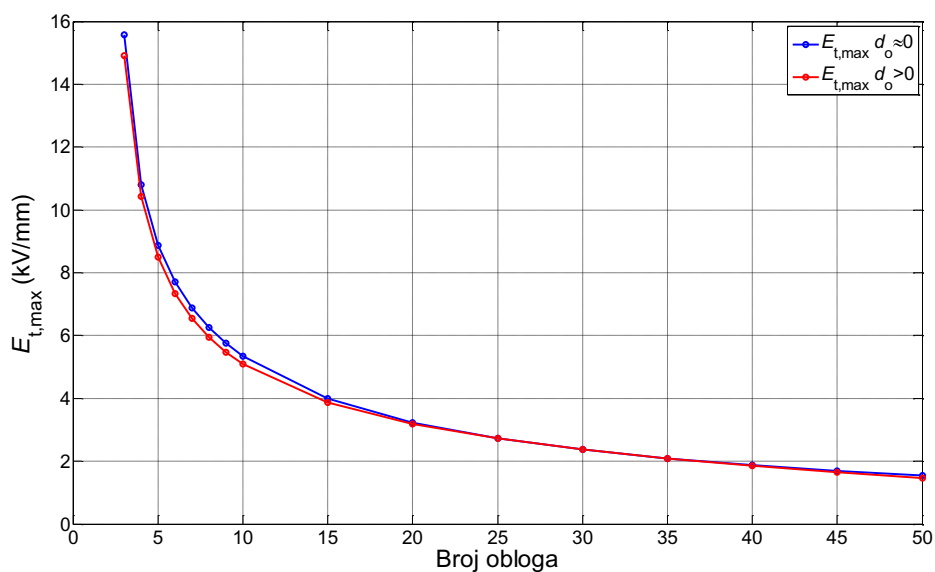


Slika 5.18 – Ovisnost maksimalnog radijalnog polja broju obloga

Povećanje broja obloga povoljno djeluje i na tangencijalno polje na granici papira i ulja. Minimalni faktor sigurnosti  $\sigma_{min}$  raste s porastom broja obloga i slabo ovisi o debljini obloge, tako da se dobivene krivulje za slučaj zanemarive i nezanemarive debljine obloga preklapaju (Slika 5.19). Također, maksimalno tangencijalno polje  $E_{r,max}$  opada s porastom broja obloga (Slika 5.20).



Slika 5.19 – Ovisnost minimalnog faktora sigurnosti tangencijalnog polja na granici papira i ulja o broju obloga



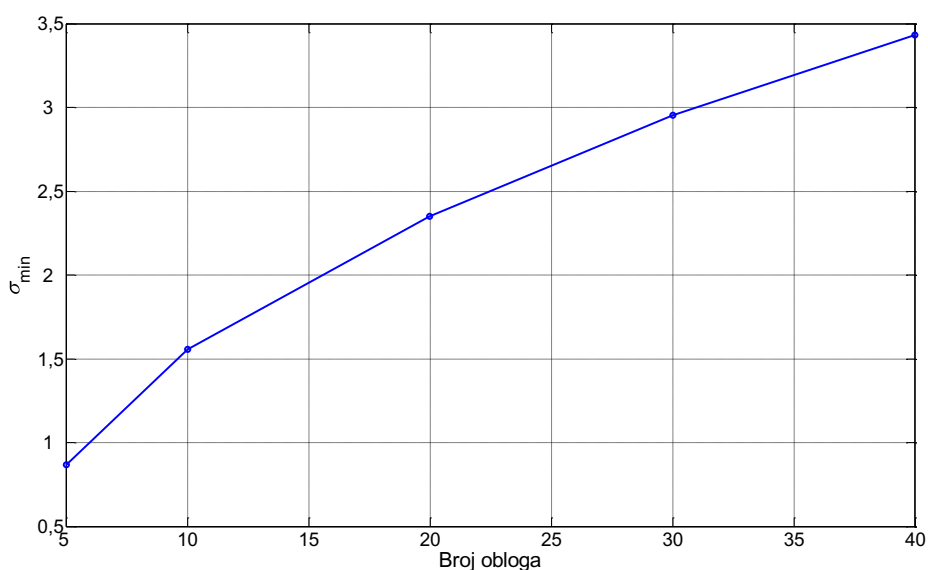
Slika 5.20 – Ovisnost maksimalnog tangencijalnog polja na granici papira i ulja o broju obloga

Rezultati proračuna pokazuju kako povećanje boja obloga, uz optimalne radijuse, povoljno djeluje na polja na rubovima obloga i tangencijalna naprezanja na granici papira i ulja bez obzira jesu li debljine obloga zanemarive ili ne. Porast broja obloge povoljno djeluje i na radijalna polja, ali u slučaju kada debljina obloge nije zanemariva najveće radijalno polje u sustavu poprima minimalnu vrijednost za određeni broj obloga.

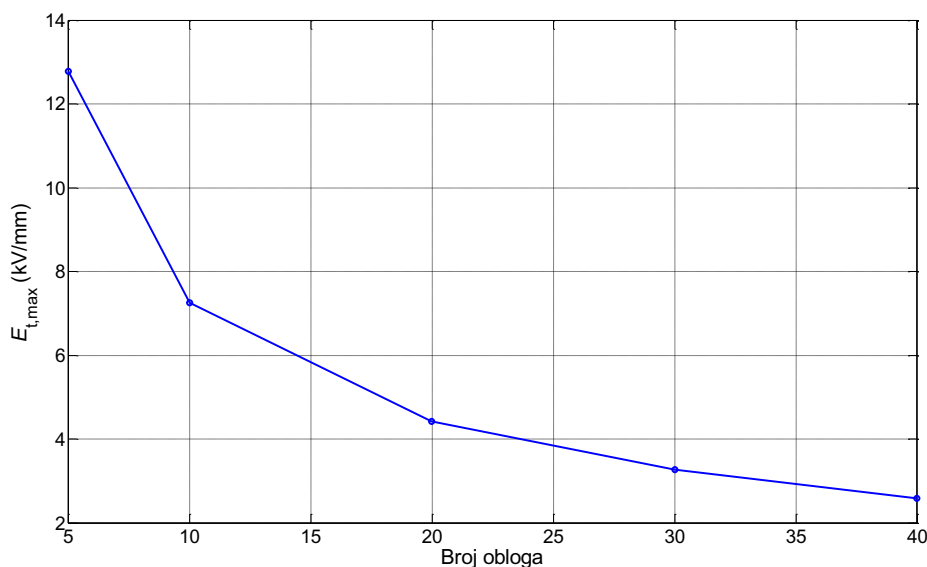


U praksi nije moguće razmjestiti obloge na računski određene optimalne radijuse iz više razloga. Računski određene radijuse valja prilagoditi tehnološkim tolerancijama. Nadalje, obloge se umeću nakon što se namota određeni broj slojeva papira, pri čemu se nastoji da stvarni radijusi što bolje odgovaraju računskim. Zbog toga je nužno istražiti utjecaj broja obloga na raspodjelu potencijala i polja u slučaju kada radijusi obloga nisu optimalni. Analiziran je izolacijski sustav strujnog transformatora s 5, 10, 20, 30 i 40 obloga, pri čemu je duljina svih obloga jednaka. Radijusi obloga linearno se povećavaju s porastom rednog broja, a debljina obloga nije zanemariva.

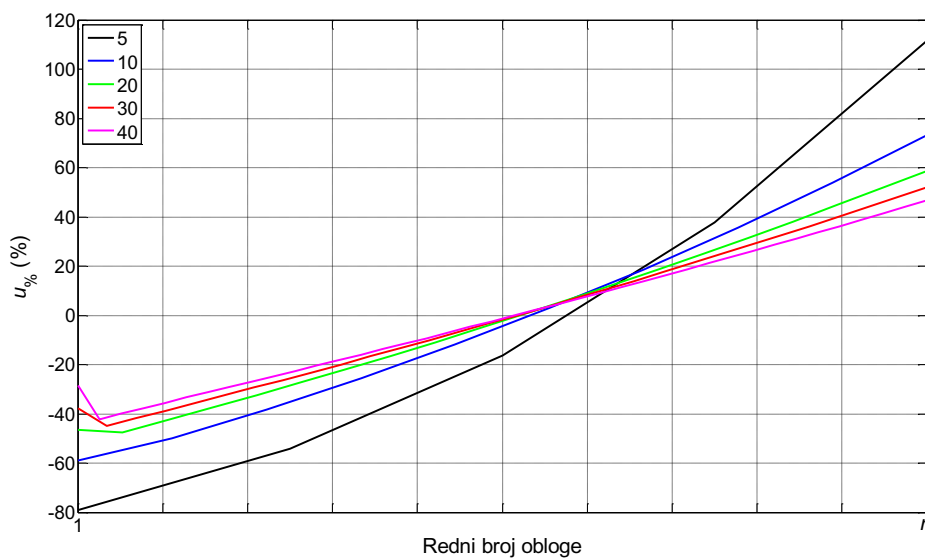
Slika 5.21 prikazuje minimalni faktor sigurnosti  $\sigma_{\min}$  u ovisnosti o broju obloga. S porastom ukupnog broja obloga minimalni faktor sigurnosti raste, a time se smanjuje vjerojatnost kliznog proboja na granici papira i ulja. Povećanje broja obloga djeluje povoljno i na vrijednost maksimalnog tangencijalnog polja  $E_{t,\max}$  koja opada s njihovim porastom (Slika 5.22). Kako radijusi obloga nisu optimalni, nije ni raspodjela napona idealna, nego ovisi o broju obloga. Što je veći broj obloga, raspodjela napona je ujednačenija, a maksimalna i minimalna odstupanja raspodjele napona od idealne su manja (Slika 5.23).



*Slika 5.21 – Ovisnost minimalnog faktora sigurnosti tangencijalnog polja na granici papira i ulja o broju obloga*



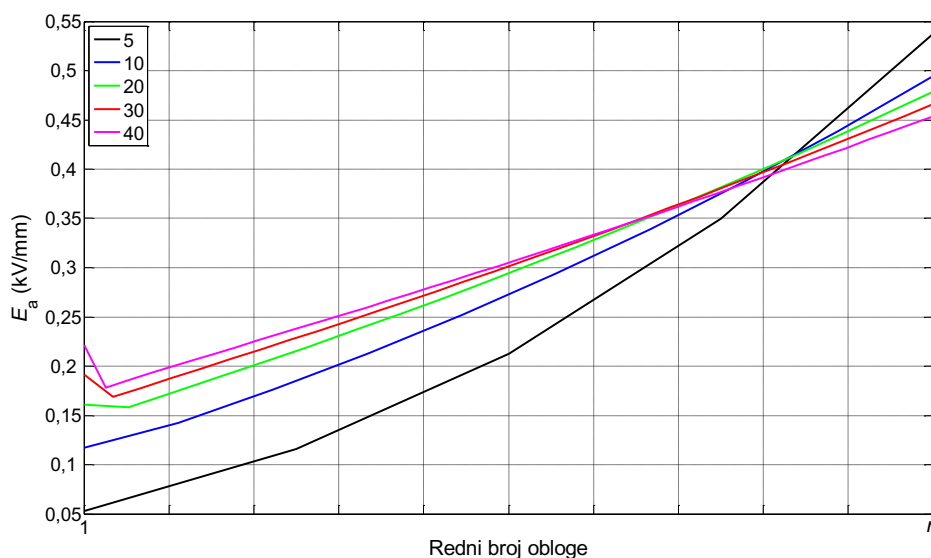
Slika 5.22 – Ovisnost maksimalnog tangencijalnog polja na granici papira i ulja o broju obloga



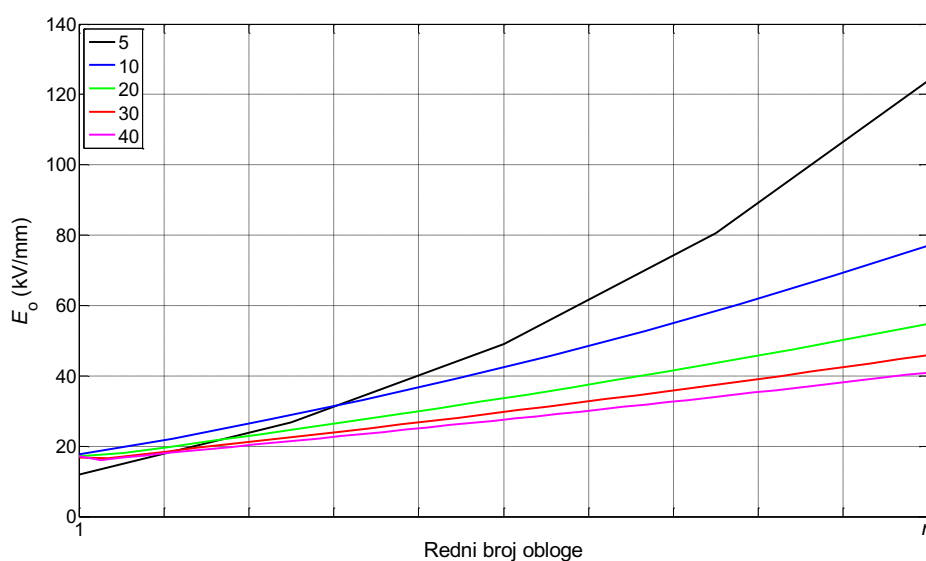
Slika 5.23 – Postotno odstupanje napona u ovisnosti o broju obloga

Povećanje broja obloga povoljno djeluje na aksijalna (Slika 5.24), i na polja na rubovima obloga (Slika 5.25). Na slikama 5.23 i 5.24 može se primijetiti kako s porastom broja obloga dolazi do porasta pada napona između uzemljene cijevi i prve obloge, a time i do porasta vrijednosti pripadajućeg aksijalnog polja. U analiziranom izolacijskom sustavu radijusi obloga linearno rastu s njihovim rednim brojem, a debljina izolacije među oblogama jednaka je razlici njihovih radijusa umanjenom za debljinu obloge. Kada se računa debljina izolacije između prve obloge

i cijevi, tada se razlici njihovih radijusa ne oduzima i debljina obloge. Zato je debljina izolacije između uzemljene cijevi i prve obloge veća upravo za debljinu obloge od debljina izolacija među sljedećim oblogama. Posljedica toga je nešto manji dozemni kapacitet prve obloge, što ima za posljedicu nešto veći pad napona između prve obloge i cijevi. Što je veći broj obloga to je izraženija razlika u debljinama izolacije između prve obloge i cijevi prema debljinama izolacije među ostalim oblogama, a to uzrokuje izraženije lomljenje krivulja raspodjele napona i aksijalnog polja kod prve obloge.

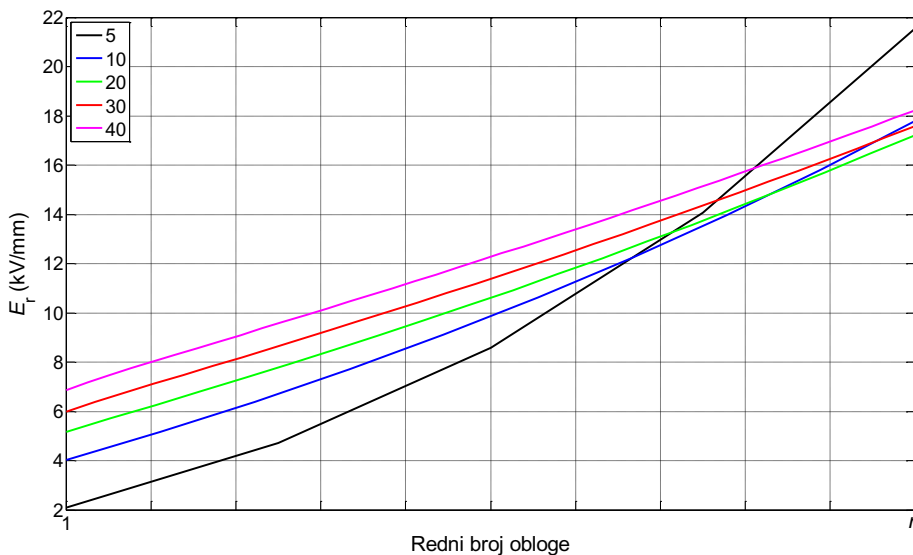


Slika 5.24 – Aksijalna polja u ovisnosti o broju obloga



Slika 5.25 – Ovisnost polja na rubovima obloga o broju obloga

Slika 5.26 prikazuje utjecaj broja obloga na radijalna polja. Maksimalno radijalno polje najprije opada s porastom broja obloga, postiže minimum za  $n=20$ , a zatim raste. Može se primijetiti sličnost s ovisnosti maksimalnog radijalnog polja o broju obloga uz optimalne radijuse obloga, a gdje je minimum postignut također za  $n=20$  (Slika 5.18).



Slika 5.26 – Radijalna polja u ovisnosti o broju obloga

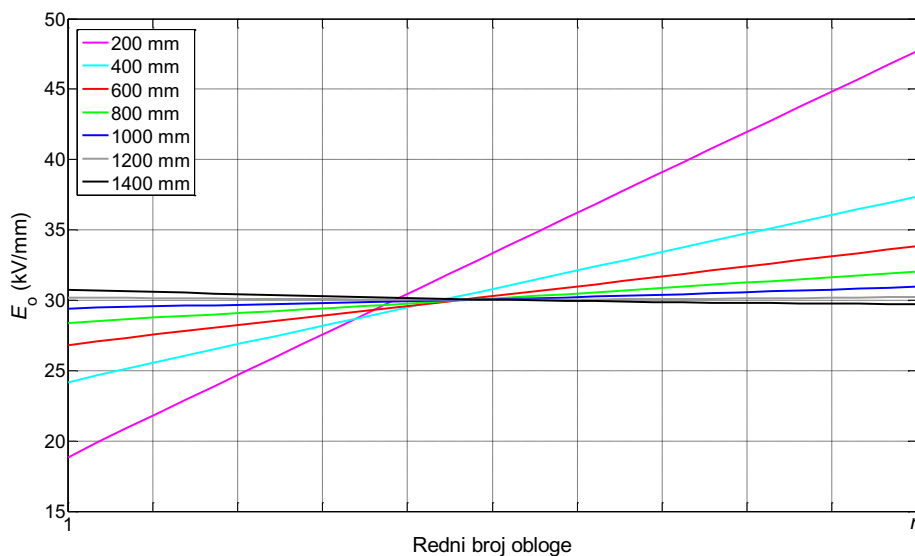
#### 5.4 Utjecaj duljina obloga na raspodjele polja i potencijala

Na primjeru izolacijskog sustava 123 kilovoltnog strujnog transformatora istražen je još i utjecaj izbora duljina obloga na radijalna, te na polja na rubovima obloga i tangencijalna naprezanja na granici papira i ulja. Debljina izolacije, broj obloga i aksijalni razmaci ostaju nepromijenjeni za sve analizirane slučajeve. Za zadane duljine obloga određuju se optimalni radijusi. Promatrani su slučajevi kada su debljine obloga zanemarive, i kada nisu zanemarive.

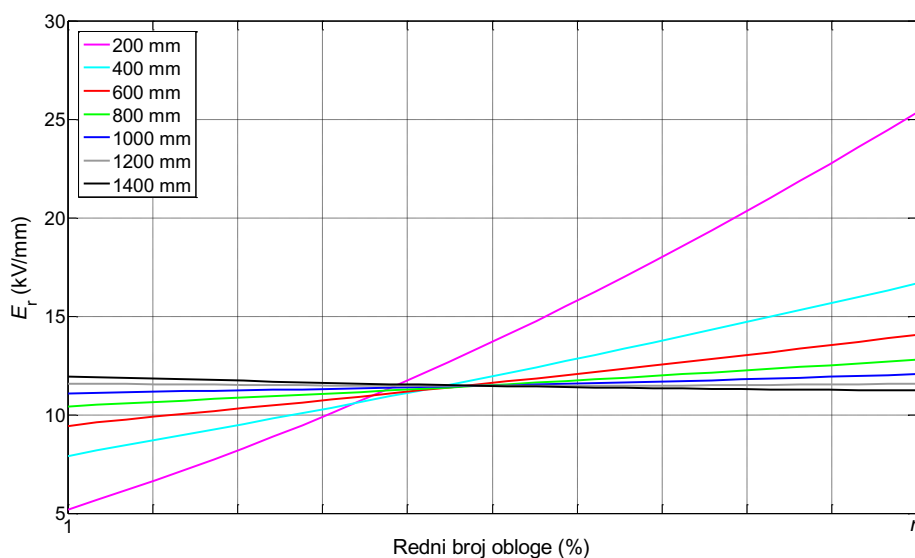
Slika 5.27 prikazuje raspodjelu polja na rubovima obloga, a slika 5.28 raspodjelu radijalnih polja duž izolacijskog sustava u ovisnosti o duljinama obloga čije su debljine zanemarive. Duljine obloga varirane su od 200 mm do 1400 mm u koracima od 200 mm. Najujednačenija raspodjela polja na rubovima obloga i radijalnih polja dobije se za duljine obloga od 1200 mm. Pritom je i debljina izolacije među oblogama najujednačenija, odnosno razmaci među oblogama približno su jednaki.

S daljnjim povećavanjem duljina svih obloga najveće polje više nije na rubu zadnje obloge, nego na rubu prve obloge, a obloge se počinju koncentrirati prema

uzemljenoj cijevi. Ovdje se valja prisjetiti kako se s pomoću izraza (5.42) utvrdilo da je moguće ostvariti linearnu raspodjelu potencijala uz obloge koncentrirane prema uzemljenoj cijevi, ali su u tim slučajevima ili obloge nerealno duge ili je debljina izolacije prevelika.



Slika 5.27 – Ovisnost raspodjela jakosti polja na rubu obloge o duljinama obloga

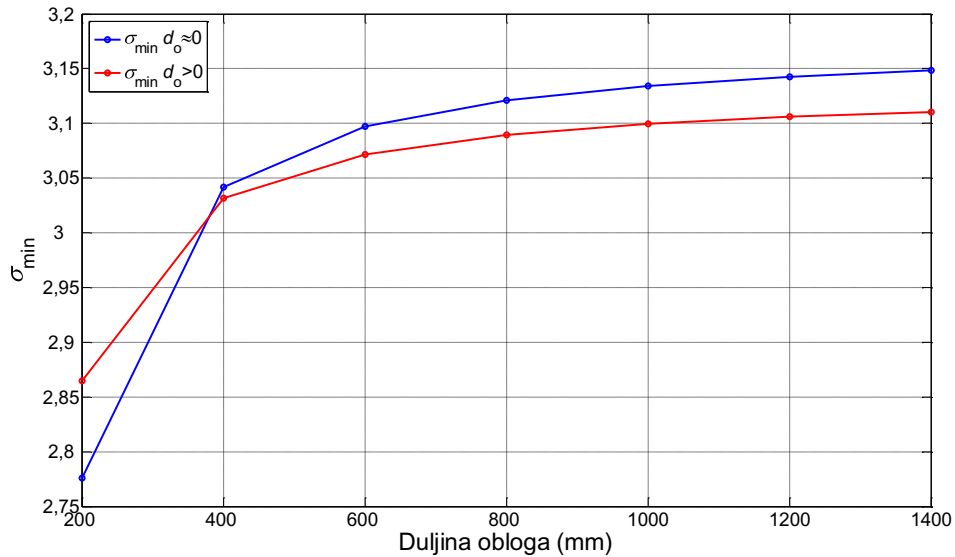


Slika 5.28 – Ovisnost raspodjela jakosti radialnih polja o duljinama obloga

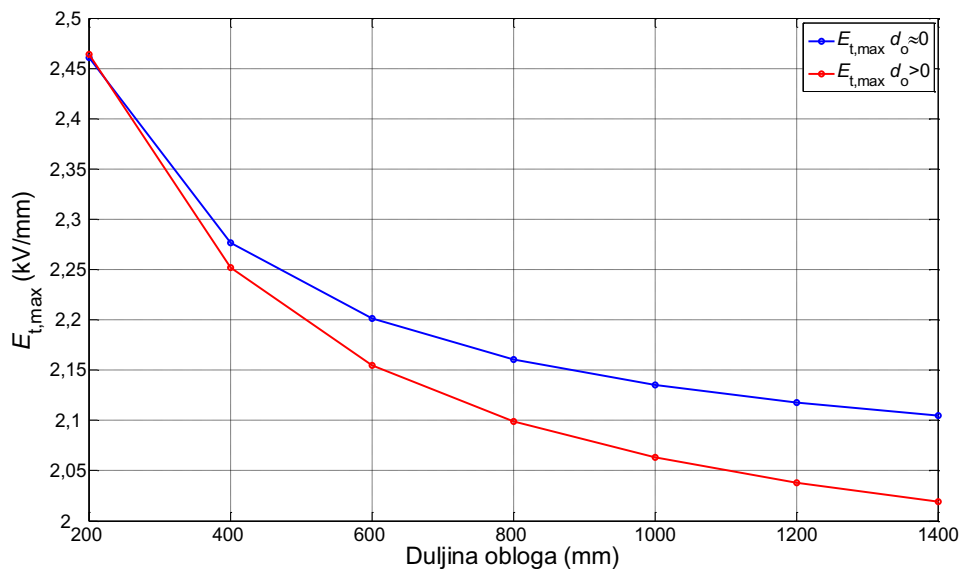
Radialna polja i polja na rubovima obloga rastu s rednim brojem obloge kada su njihove duljine manje od 1200 mm. Što su obloge kraće to je raspodjela ovih polja manje ujednačena, pri čemu je izolacija u okolišu obloga s manjim rednim

brojem manje, a u okolišu obloga s višim rednim brojem jače opterećena. S porastom duljina obloga do 1200 mm opterećenja se ravnomjernije raspoređuju.

Produljenje svih obloga povoljno djeluje na tangencijalna naprezanja (slike 5.29 i 5.30). Faktori sigurnosti rastu, a maksimalna tangencijalna polja opadaju s porastom duljina svih obloga za slučajeve kad je debljina obloga zanemariva i kad nije zanemariva.



Slika 5.29 – Ovisnost minimalnog faktora sigurnosti tangencijalnog polja na granici papira i ulja o duljinama obloga



Slika 5.30 – Ovisnost maksimalnog tangencijalnog polja na granici papira i ulja o duljinama obloga

U svim dosadašnjim razmatranjima sve su obloge imale jednake duljine. Promjenom duljina obloga utječe se na veličinu kapaciteta među oblogama i dozemnih kapaciteta. Povećanjem duljine preklopa među oblogama raste kapacitet među njima, što ima za posljedicu manji pad napona i manja polja. Naravno, preostali napon se tada raspodijeli na izolaciju između ostalih obloga.

U poglavlju 5.2 analiziran je sustav s ulaznim parametrima  $r_0=20$  mm,  $l=250$  mm,  $a=25$  mm,  $n=20$ ,  $d_0>0$ . Za različite radijuse prve obloge rješavanjem sustava 5.16 u 7. iteraciji dobiveno je zadovoljavajuće rješenje  $r_1=21,75$  mm,  $r_{20}=51,02$  mm i  $E_{o,max} \approx 34$  kV/mm. Neka ovo bude početna inačica modela za koji će se analizirati utjecaj promjenjivih duljina obloga na raspodjelu polja. Sada će se izborom različitih duljina obloga pokušati smanjiti  $r_{20}$ , a da  $E_{o,max}$  ne premaši 34 kV/mm. Raspodjela potencijala uvijek će biti idealna jer se optimalni radijusi obloga, počevši od radijusa prve obloge, određuju prema sljedećim izrazima:

$$\frac{l_1 - a}{\ln \frac{r_2}{r_1 + d_0}} = \frac{l_1}{\ln \frac{r_1}{r_0}}, \quad (5.43)$$

$$\frac{l_2 - a}{\ln \frac{r_3}{r_2 + d_0}} = \frac{l_1}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{2 l_2 + a - l_1}{\ln \frac{r_2}{r_0}}, \quad (5.44)$$

$$\frac{l_3 - a}{\ln \frac{r_4}{r_3 + d_0}} = \frac{l_1}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{2 l_2 + a - l_1}{\ln \frac{r_2}{r_0}} + \frac{3 l_3 + a - l_2}{\ln \frac{r_3}{r_0}}, \quad (5.45)$$

...

$$\frac{l_{n-1} - a}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1} + d_0}} = \frac{l_1}{\ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{2 l_2 + a - l_1}{\ln \frac{r_2}{r_0}} + \frac{3 l_3 + a - l_2}{\ln \frac{r_3}{r_0}} + \dots + \frac{n-1 l_{n-1} + a - l_{n-2}}{\ln \frac{r_{n-1}}{r_0}}. \quad (5.46)$$

Za sve promatrane inačice iterativno je biran  $r_1$ , sve dok nije postignuto da je  $E_{o,max} \approx 34$  kV/mm, a rezultati proračuna dani su u tablici 5.2. U inačici 1 duljine obloga s rednim brojevima od 1 do 5 su 100 mm, od 6 do 10 su 150 mm, od 11 do 15 su 200 mm i od 16 do 20 su 250 mm. Idealna raspodjela napona ostvarena je uz nezatno povećanje debljine izolacije. Najveće polje  $E_{o,max}$  je kao u početnoj inačici, ali je raspodjela  $E_0$  takva da su polja na rubovima obloga od rednog broja 4 do 16 veća. Najveće polje u inačici 1 javlja se na rubu 16. obloge. Raspodjela  $E_0$  ima

razlomljen oblik, kada rastu duljine obloga dolazi do naglog smanjenja polja. Razlog tomu je što su optimalni radijusi obloga takvi da na mjestima porasta duljina obloga budu i nešto veće debljine izolacije među oblogama.

Tablica 5.2 – Rezultati proračuna dielektričkih naprezanja

Opis	$r_1$ (mm)	$r_{20}$ (mm)	Raspored obloga	Raspodjela $E_0$
<b>početna inačica</b> $l_{1..20}=250$ mm	21,75	51,02		
<b>inačica 1</b> $l_{1..5}=100$ mm $l_{6..10}=150$ mm $l_{11..15}=200$ mm $l_{16..20}=250$ mm	22,69	51,09		
<b>inačica 2</b> $L_{1..20}$ linearno rastu od 100 mm do 250 mm s porastom r.br. obloge	22,56	51,15		
<b>inačica 3</b> $l_{1..20}$ linearno opadaju od 500 mm do 250 mm s porastom r.br. obloge	21,42	50,86		
<b>inačica 4</b> $l_{1..20}$ opadaju za 24 mm s porastom r.br. obloge, duljina zadnje obloge je 250 mm	21,32	50,77		



U inačici 1 nema izrazitog smanjenja obujma izolacije. Iako je  $E_{o,max}$  gotovo nepromijenjeno, a polja na rubovima ostalih obloga većinom su porasla, obadvije su inačice podjednako prihvatljive s obzirom na veličinu  $E_{o,max}$ . U odnosu na početnu, u inačici 1 udio materijala od kojeg se izrađuju obloge je manji za 23,82 %. Međutim, različite duljine obloga otežavaju njihovu proizvodnju, odnosno zahtijevaju duže vrijeme za njihovu izradu.

U inačici 2 duljine obloga linearno rastu od 100 mm do 250 mm s porastom rednog broja obloga. U odnosu na početnu inačicu, debljina izolacije je neznatno povećana. Raspodjela  $E_o$  nije razlomljena kao u inačici 1, a  $E_{o,max}$  javlja se na rubu zadnje obloge. U odnosu na početnu inačicu, udio materijala od kojeg se izrađuju obloge je manji za 23,82 %.

Inačica 3 predstavlja slučaj kada duljine obloga linearno opadaju od 500 mm do 250 mm s porastom njihova rednog broja. U ovom slučaju debljina izolacije je smanjena za 0,32 %, a količina materijala od kojeg se izrađuju obloge veća je za 40,06 %. Može se primijetiti da raspodjela  $E_o$  ima minimum na 7. oblozi, što je posljedica debljine izolacije među oblogama. Naime, u ovom slučaju debljina izolacije među oblogama najprije raste, najveća je između 6. i 7. obloge, a zatim opada.

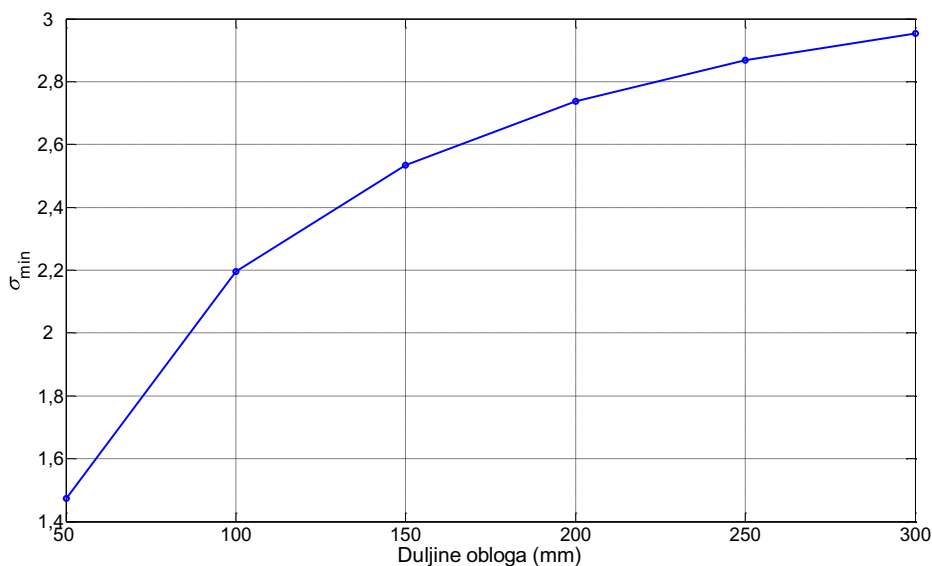
Inačica 4 slična je prethodnoj, a predstavlja ekstremni slučaj u kojem sve obloge osim prve imaju jako male dozemne kapacitete. U ovom slučaju debljina izolacije je neznatno smanjena, a količina materijala od kojeg se izrađuju obloge veća je za čak 72,78 %. U ovoj inačici debljina izolacije među oblogama najprije raste, najveća je između 8. i 9. obloge, a zatim opada.

Aksijalna polja jednaka su za sve inačice jer su aksijalni razmaci jednaki, a raspodjela napona idealna. Maksimalno radijalno polje podjednako je za sve inačice.

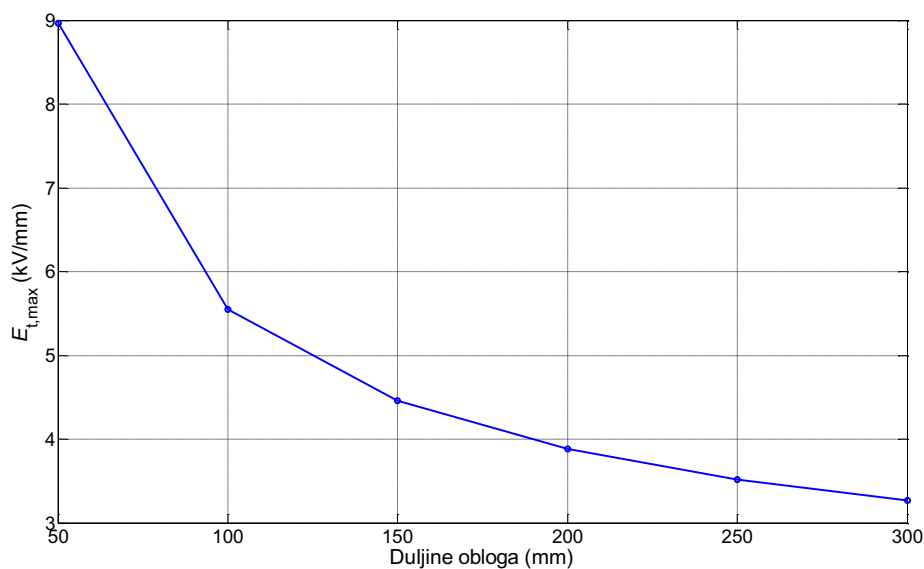
Kako u praksi nije moguće razmjestiti obloge na računski određene optimalne radijuse, istražen je utjecaj duljina obloga na raspodjelu potencijala i polja u slučaju kada radijusi obloga nisu optimalni. Analiziran je izolacijski sustav 123 kilovoltnog strujnog transformatora s  $n$  obloga i duljinama obloga 50, 100, 150, 200, 250 i 300 mm. Duljine svih obloga su jednake, debljina izolacije među oblogama je stalna, odnosno radijusi obloga linearno se povećavaju s porastom rednog broja obloga, a debljine obloga nisu zanemarive.

Rezultati proračuna (Slika 5.31 i Slika 5.32) pokazuju kako ujednačeno produljenje svih obloga povoljno djeluje na tangencijalna naprezanja na granici

papira i ulja za slučaj kada radijusi obloga nisu optimalni. Povećanje duljina obloga također djeluje povoljno na sva ostala promatrana naprezanja (slike 5.33 do 5.36), ujednačuje raspodjelu napona i polja uz smanjenje maksimalnih jakosti polja.



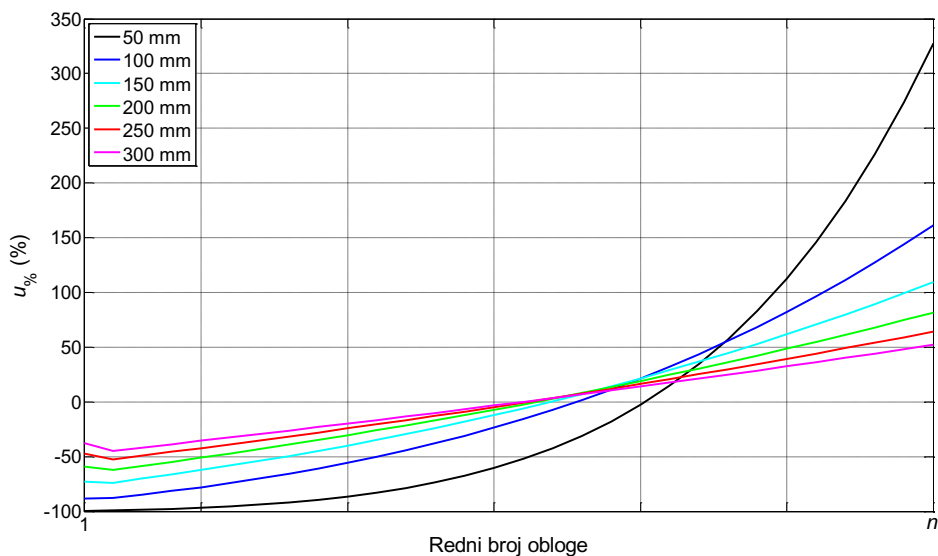
Slika 5.31 – Ovisnost minimalnog faktora sigurnosti tangencijalnog polja na granici papira i ulja o duljinama obloga



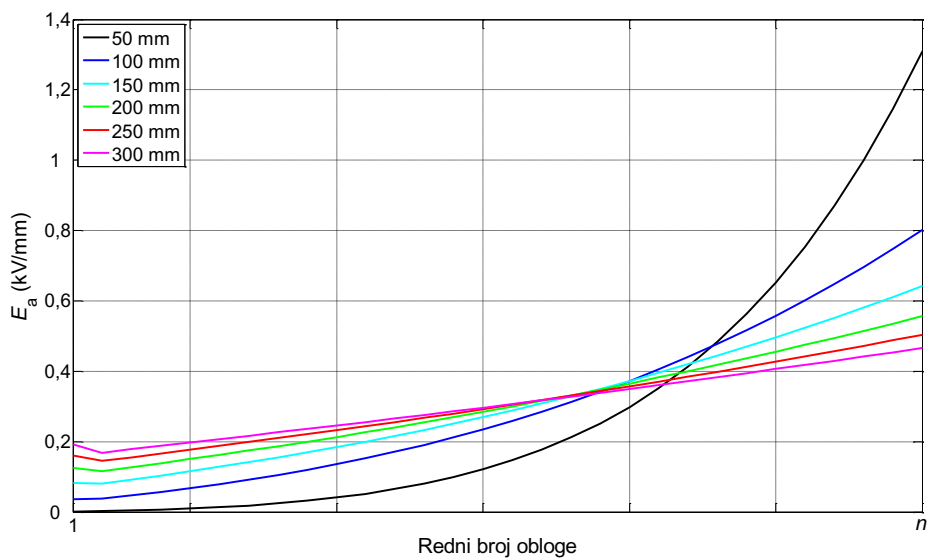
Slika 5.32 – Ovisnost maksimalnog tangencijalnog polja na granici papira i ulja o duljinama obloga

Može se primijetiti kako sve raspodjele prikazane na slikama 5.33 do 5.36 izgledaju podjednako. Raspodjela aksijalnih polja nalikuje raspodjeli napona među oblogama ako su aksijalni razmaci među oblogama jednaki, što je ovdje slučaj. Polje

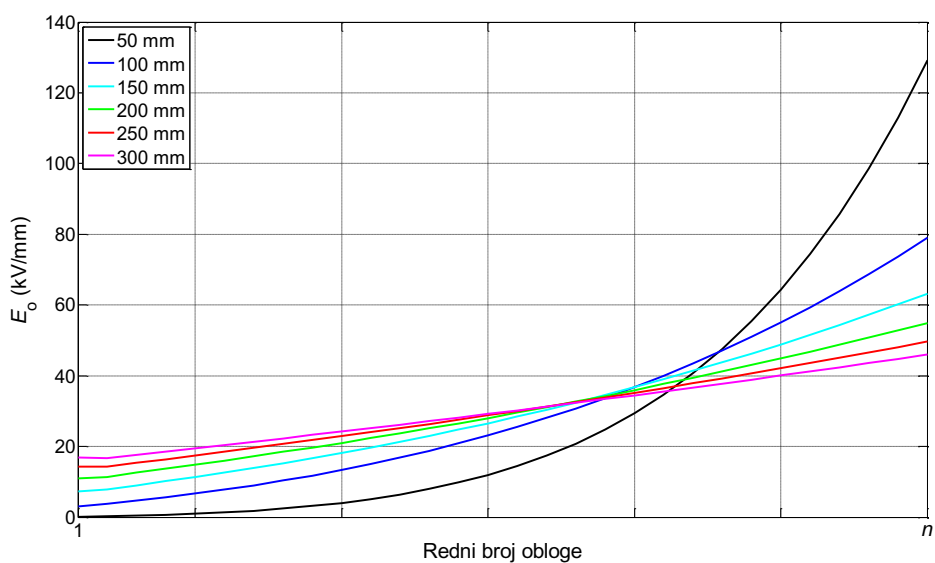
na rubu obloge ovisi o debljini izolacije među njima, o debljini obloge i naponu među njima, a prva se dva parametra ne mijenjaju. Raspodjela radijalnih polja ovisi o radijusima obloga i primjenjenom naponu. Kako su radijusi obloga nepromijenjeni za sve promatrane slučajeve, raspodjela  $E_r$  ovisi o raspodjeli napona među oblogama.



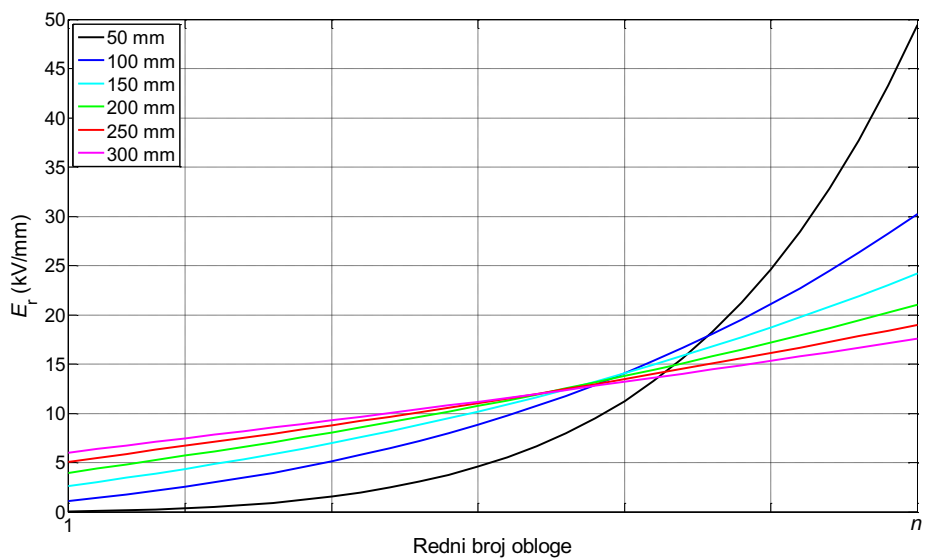
Slika 5.33 – Postotno odstupanje napona u ovisnosti o duljinama obloga



Slika 5.34 – Aksijalna polja u ovisnosti o duljinama obloga



Slika 5.35 – Ovisnost polja na rubovima obloga o duljinama obloga



Slika 5.36 – Radijalna polja u ovisnosti o duljinama obloga

Ovime je završena analiza utjecaja pojedinih parametra obloga na raspodjele polja i potencijala. Saznanja do kojih se je došlo iskorištena su pri izradi programa za optimiranje parametara obloga mjernih transformatora koji je opisan u sljedećem poglavlju.

## **6. Optimiranje parametara obloga mjernih transformatora**

Na temelju proračuna iz prethodnog poglavlja i analize utjecaja pojedinih parametara kondenzatorskih obloga na raspodjele potencijala i električnih polja, mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Ako su sve obloge zanemarive debljine i jednake duljine te su aksijalni razmaci među njima stalni, tada se, za zadani radijus uzemljene cijevi  $r_0$  i radijus zadnje obloge  $r_n$  ( $r_n > r_0$ ), mogu korištenjem izraza (5.22) odrediti optimalni radijusi za bilo koji broj umetnutih obloga, uz koje će raspodjela napona biti idealna.
- Ukoliko debljine obloga nisu zanemarive tada se korištenjem izraza (5.31) do (5.34) bira najprije  $r_1$ , a zatim se računaju optimalni radijusi svih ostalih obloga. Izrazi (5.43) do (5.46), slično kao i izrazi (5.31) do (5.34), daju optimalne radijuse obloga uz zadan  $r_1$ , pri čemu svaka obloga mora imati dozemni kapacitet, ali njihove duljine ne moraju biti jednake.
- Ako se zbog tehnoloških tolerancija ne može postići da obloge budu na optimalnim radijusima, dobro je obloge rasporediti tako da debljina izolacije među njima opada s porastom njihova rednog broja. Dakle, obloge treba koncentrirati prema kraju izolacije u radijalnom smjeru.
- Povećavanjem ukupnog broja obloga, uz nepromijenjene ostale parametre, povoljno se djeluje na dielektrička naprezanja. Sva promatrana polja opadaju s porastom broja obloga, osim maksimalnog radijalnog polja koje, u slučaju kada debljina obloge nije zanemariva, poprima minimalnu vrijednost za određeni broj obloga, a zatim raste.
- Povećanjem duljina svih obloga smanjuju se i ujednačuju dielektrička naprezanja.

Ovi zaključci iskorišteni su pri izradi programa za optimiranje parametara obloga mjernih transformatora.

### **6.1 Program za optimiranje parametara obloga mjernih transformatora**

Program za optimiranje parametara obloga koncipiran je tako da se najprije odrede broj i radijusi obloga za koje su naprezanja najpovoljnija pri čemu su sve

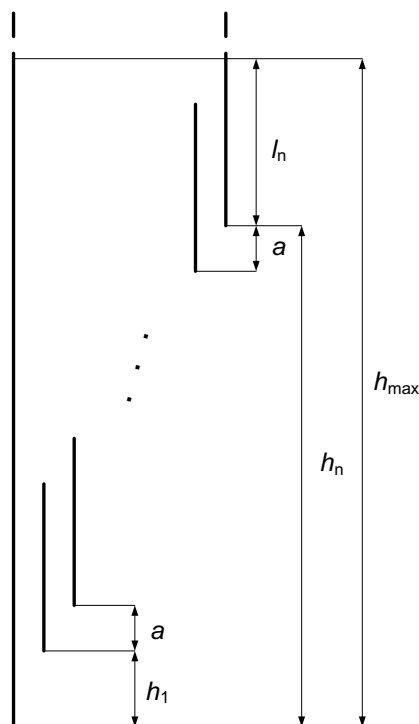
obloge jednake duljine. Duljine svih obloga jednake su duljini posljednje obloge  $l_n$ , a ona ovisi o aksijalnoj udaljenosti prve obloge od donjeg ruba uzemljene cijevi  $h_1$ , aksijalnom razmaku među oblogama  $a$ , broju obloga  $n$  te maksimalnoj dozvoljenoj visini od ruba uzemljene cijevi do koje se mogu umetati obloge  $h_{\max}$  (Slika 6.1). Duljina zadnje obloge računa se prema sljedećem izrazu:

$$l_n = h_{\max} - h_1 - a \cdot n - 1 \quad (6.1)$$

U slučaju da su jakosti polja nakon izbora broja i radijusa obloga uz jednake duljine svih obloga veće od dozvoljenih, tada se mogu optimiranjem duljina obloga dodatno smanjiti dielektrička naprezanja. Pritom treba voditi računa da obloge svojom duljinom ne prijeđu granicu određenu s  $h_{\max}$ . Maksimalna dozvoljena duljina, prema izrazu (6.2), za svaku oblogu je različita i što je redni broj obloge  $i$  veći, to je maksimalna dozvoljena duljina  $l_{i,\max}$  koju može obloga poprimiti manja:

$$l_{i,\max} = h_{\max} - h_1 - a \cdot i - 1 \quad (6.2)$$

Kontrola naprezanja vanjske izolacije postiže se raspodjelom napona po oblogama i izborom aksijalnog razmaka između zadnje obloge i ruba uzemljene cijevi  $h_n$ .



Slika 6.1 – Određivanje duljine zadnje obloge

Osim ograničenja pri izboru duljina obloga, postoje i ograničenja pri izboru radijusa obloga te broja obloga koja u prvom redu ovise o unutrašnjem promjeru

visokonaponskog izolatora i tehnološkim tolerancijama pri namatanju izolacije. U programskom paketu Matlab izrađen je program za optimiranje parametara obloga mjernih transformatora OPTIZO čiju strukturu prikazuje slika 6.2, a koristi sljedeće potprograme:

- Potprogram za odabir radijusa obloga (OPTIZO\_1)
- Potprogram za optimiranje duljina obloga (OPTIZO\_2)

Ulazni parametri programa OPTIZO su:

1. Radijus uzemljene cijevi  $r_0$ .
2. Udaljenost prve obloge od donjeg ruba uzemljene cijevi  $h_1$ .
3. Radijus posljednje obloge  $r_n$ , ograničen unutarnjim promjerom visokonaponskog izolatora.
4. Debljina obloge  $d_o$ .
5. Minimalna dozvoljena duljina obloge  $l_{min}$ .
6. Korak promjene duljina obloga pri optimiranju  $\Delta l$ .
7. Maksimalna dozvoljena visina od ruba uzemljene cijevi do koje se mogu umetati obloge  $h_{max}$ .
8. Minimalna  $d_{p,min}$  dozvoljena debljina papirne izolacije između dvije susjedne obloge.
9. Minimalni  $h_{n,min}$  i maksimalni  $h_{n,max}$  aksijalni razmak između ruba uzemljene cijevi i zadnje obloge.
10. Efektivna vrijednost podnosivog izmjeničnog napona  $U$ .
11. Maksimalne dozvoljene vrijednosti električnih polja.

Određivanje matrice kapaciteta te proračun raspodjele napona i jakosti električnog polja opisani su u prethodnom poglavlju. U nastavku slijedi detaljan opis djelovanja potprograma OPTIZO\_1 koji pronalazi optimalan broj i radijuse obloga za definirane ulazne podatke. Za svaki broj obloga iz intervala  $[n_{min} \ n_{max}]$ , biraju se različiti aksijalni razmaci među oblogama iz intervala  $[a_{min} \ a_{max}]$  te se računa  $h_n$  koji je iz intervala  $[h_{n,min} \ h_{n,max}]$ . Aksijalni razmaci odabiru se kao cijeli brojevi u milimetrima. Minimalni  $a_{min}$  i maksimalni  $a_{max}$  aksijalni razmak određuju se iz izraza (6.3) i (6.4), a pripadajući  $h_n$  iz izraza (6.5):

$$a_{min} = \left\lceil \frac{h_{n,min} + h_1}{n} \right\rceil, \quad (6.3)$$

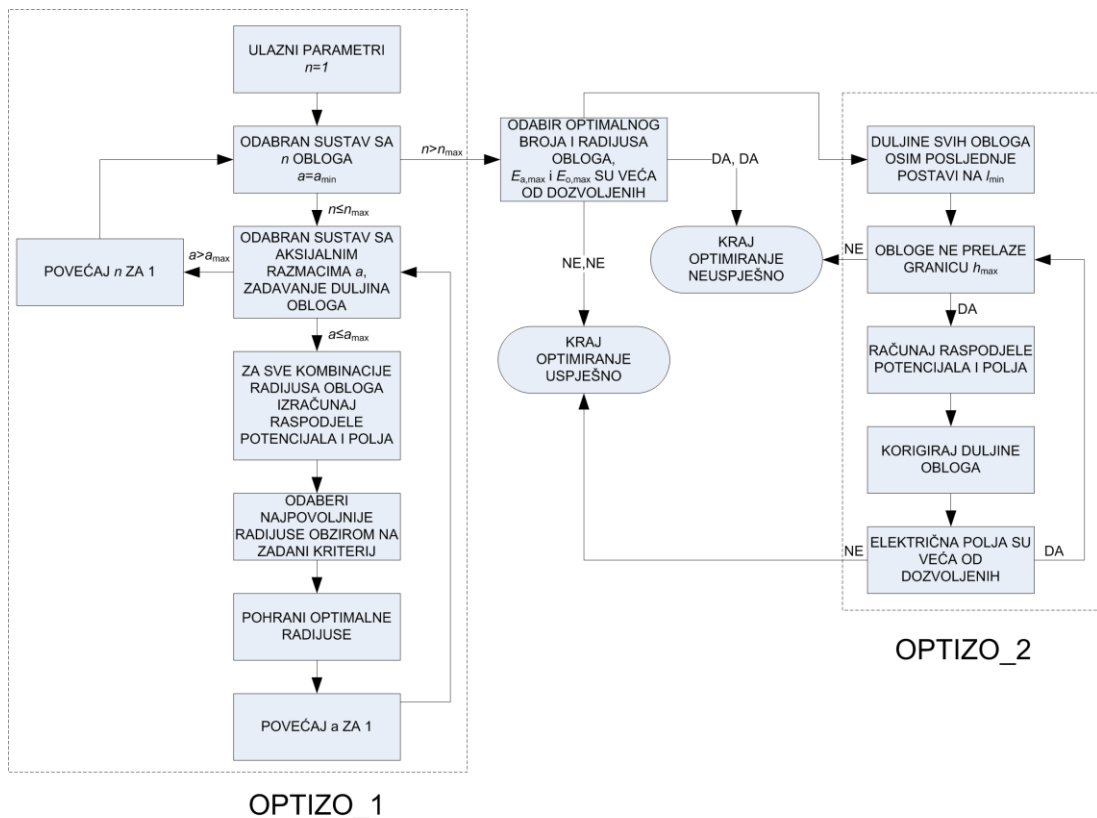
$$a_{max} = \left\lfloor \frac{h_{n,max} + h_1}{n} \right\rfloor, \quad (6.4)$$

$$h_n = h_1 + na. \quad (6.5)$$

U ovisnosti o  $h_n$  odredi se iz izraza (6.1) duljina posljednje obloge  $l_n$  i ta se duljina pridjeljuje svim ostalim oblogama. Minimalan broj obloga koje se mogu umetnuti u sustav je 1, a maksimalan broj obloga  $n_{\max}$  ovisi o minimalnoj dozvoljenoj debljini papirne izolacije između dvije susjedne obloge  $d_{p,\min}$ :

$$n_{\max} = \left\lfloor \frac{r_n - r_0 + d_o}{d_o + d_{p,\min}} \right\rfloor. \quad (6.6)$$

Za svaku kombinaciju odabranog broja, aksijalnih razmaka i duljina obloga valja odrediti optimalne radijuse. Ovdje se mogu koristiti izrazi za optimalne radijuse obloga iz prethodnog poglavlja, izraz (5.22) ako su debljine obloga zanemarive ili izrazi (5.31) do (5.34) ako debljine obloga nisu zanemarive. Postupak se ponavlja te se s obzirom na rezultate proračuna odabire najpovoljnija inačica.



Slika 6.2 – Struktura programa OPTIZO

Ukoliko nakon određivanja optimalnih radijusa nije ispunjen uvjet da je minimalna debljina papirne izolacije između dvije susjedne obloge veća od  $d_{p,\min}$ , potrebno je analizirati i radijuse obloga za koje raspodjela napona neće biti idealna.



Za različite kombinacije radijusa obloga treba izračunati raspodjelu potencijala i električnog polja te odabrati najpovoljniju. Radijusi se mogu zadavati prema izrazu (5.39) uz promjenjiv parametar  $\alpha_k$  unutar zadanih granica čime se koncentriraju obloge prema kraju izolacijskog sustava u radijalnom smjeru što se pokazalo povoljnim s obzirom na dielektrička naprezanja.

U praktičnim primjenama, radijusi obloga dobiju se na temelju broja slojeva papirne izolacije između obloga. Kako bi se odredili optimalni brojevi slojeva izolacije među oblogama potrebno je, za zadane ulazne parametre, najprije odrediti ukupan broj slojeva papirne izolacije  $n_p$  iz izraza:

$$n_p = \left\lfloor \frac{r_n - r_0 - d_o}{d_p} (n - 1) \right\rfloor, \quad (6.7)$$

gdje je  $d_p$  prosječna debljina sloja papira. Zatim se biraju svi mogući rasporedi  $n$  obloga takvi da se broj slojeva papira među njima nalazi u granicama između minimalnog i maksimalnog dozvoljenog, što je analogno prije spomenutom ograničenju da debljina papirne izolacije među oblogama mora biti iz intervala  $[d_{p,\min} \ d_{p,\max}]$ . Obloge se u izolacijski sustav umeću na način da s udaljavanjem od uzemljene cijevi opada i broj slojeva papira među oblogama. Za sve moguće kombinacije brojeva slojeva papira među oblogama računaju se dielektrička naprezanja te se pohranjuje najbolja kombinacija s obzirom maksimalno aksijalno polje u sustavu  $E_{a,\max}$ . Kako su aksijalni razmaci među oblogama jednaki, pohranjeni su u stvari sustavi koji imaju najmanje odstupanje raspodjele napona od idealne.

Ukoliko je potrebno, polja se mogu dodatno smanjiti korigiranjem duljina obloga. Ovo je zadaća potprograma OPTIZO\_2 kod kojeg dio ulaznih podataka čine ulazni i izlazni podatci potprograma OPTIZO\_1, a to su broj obloga i njihovi radijusi. Potrebno je još definirati dozvoljene vrijednosti aksijalnog polja  $E_{a,\max}$  i polja na rubu obloge  $E_{o,\max}$  te odrediti koja je od njih kriterij prema kojem će se korigirati duljine obloga. Kriterij može biti i funkcija oba naprezanja kojima se mogu pridijeliti težinski faktori.

Kada je definiran kriterij optimiranja, duljine svih obloga osim zadnje postave se na minimalan dozvoljeni iznos  $l_{\min}$ , koji ovisi o tehnološkim tolerancijama, te se računaju dielektrička naprezanja. Ako su naprezanja između susjednih obloga veća od dozvoljenih, tada se duljina obloge s manjim rednim brojem povećava za određeni iznos. Time raste kapacitet između susjednih obloga, što rezultira smanjenjem pada napona među njima, a time i smanjenjem jakosti električnog polja.

Ovaj postupak se ponavlja dok sva naprezanja nisu unutar dozvoljenih granica i dok obloge svojom duljinom ne prelaze vertikalnu granicu određenu s  $h_{\max}$ , do koje je dozvoljeno umetati obloge unutar papirne izolacije.

## **6.2 Primjena programa za optimiranje parametara obloga**

Program OPTIZO primjenjen je pri optimiranju izolacijskog sustava strujnog transformatora inverznog tipa za  $U_m=123$  kV. Postojeća inačica izolacijskog sustava ima  $k$  oboga, a aktivni dio transformatora smješten je unutar visokonaponskog izolatora. Cilj optimiranja treba biti smanjenje troškova i/ili povećanje pouzdanosti izolacijskog sustava. Samim smanjivanjem debljine papirne izolacije smanjuje se utrošak papira i vrijeme namatanja, ali se povećava količina ulja ukoliko se koristi jednak visokonaponski izolator. Zamjetne uštede mogu se ostvariti ukoliko je smanjenje vanjskog promjera papirne izolacije popraćeno smanjenjem unutarnjeg promjera visokonaponskog izolatora.

Najprije je napravljen proračun raspodjele potencijala i električnog polja za postojeću inačicu izolacijskog sustava. Rezultati proračuna dielektričkih naprezanja pokazali su kako postoji rezerva s obzirom na izračunate vrijednosti aksijalnih i polja na rubovima obloga, što je dobar preduvjet za smanjenje obujma izolacije. Prema promjeru unutrašnje stjenke užeg visokonaponskog izolatora, izabran je radijus zadnje obloge  $r_n$  novog izolacijskog sustava.

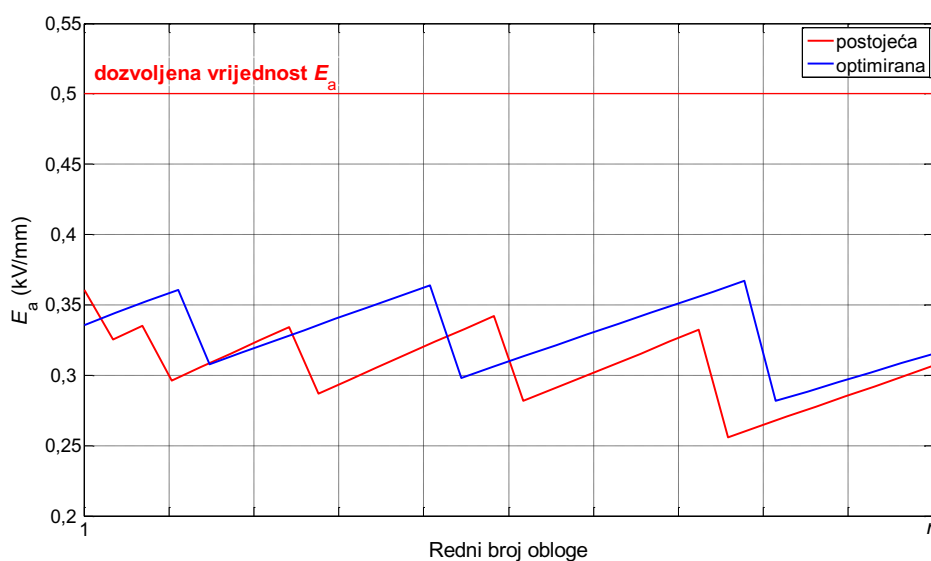
U skladu sa strukturom programa OPTIZO (Slika 6.2), sada se za svaki broj obloga  $n$  od 1 do  $n_{\max}$  i za svaki aksijalni razmak  $a$  iz intervala  $[a_{\min} a_{\max}]$ , koji uz  $n$  i ostale ulazne parametre prema izrazu (6.1) definira duljinu zadnje i svih ostalih obloga, te sve moguće kombinacije radijusa obloga, računaju raspodjele potencijala i električnog polja. Kao kriterij pri optimiranju uzeta je maksimalna vrijednost aksijalnog polja. Ujednačena aksijalna naprezanja, uz stalne aksijalne razmake, znače i ujednačenu raspodjelu napona među oblogama.

Potprogramom OPTIZO\_1 određeni su optimalni radijusi obloga za sve kombinacije broja obloga i aksijalnih razmaka, a izlazni podatci dani su u Tablici 6.1. Za svega 23 kombinacije  $n$  i  $a$  pronađeni su optimalni radijusi uz aksijalno polje kao kriterij optimiranja. Za ostale kombinacije nisu pronađeni takvi radijusi obloga za koje su dielektrička naprezanja ispod dozvoljenih vrijednosti. Svaka od inačica navedenih u Tablici 6.1 zadovoljava s obzirom na dielektrička naprezanja u uljno-papirnoj izolaciji, a za izradu prototipa odabrana je inačica 7.

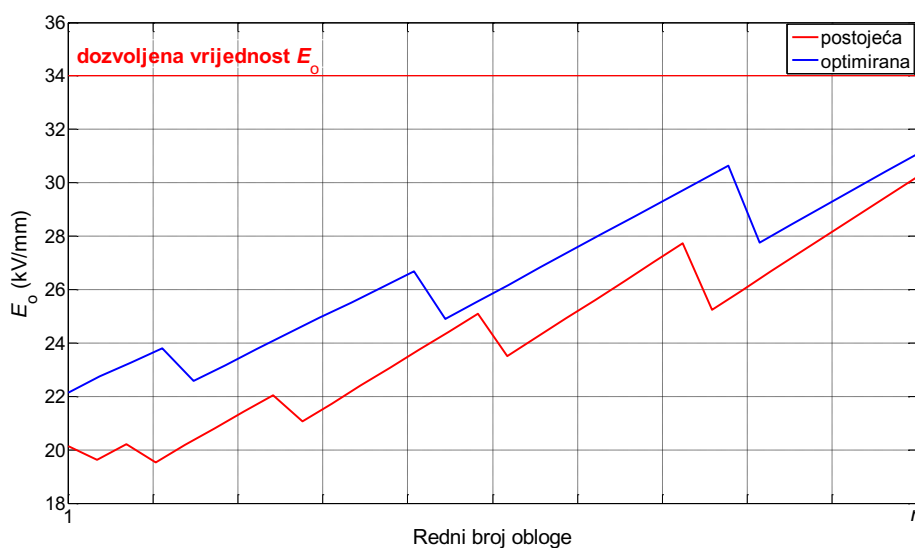
Tablica 6.1 – Rezultati optimiranja dobiveni potprogramom OPTIZO\_1

<i>inačica</i>	$u_{\%,max}$ (%)	$E_{a,max}$ (kV/mm)	$E_{o,max}$ (kV/mm)	$E_{r,max}$ (kV/mm)
1	9,86	0,36	33,11	11,83
2	10,37	0,35	33,89	12,55
3	10,40	0,36	32,60	11,92
4	10,85	0,35	33,29	12,75
5	11,82	0,37	31,80	11,86
6	11,08	0,35	33,28	12,74
7	11,72	0,37	31,09	11,90
8	11,14	0,35	33,20	12,71
9	11,27	0,35	33,07	12,66
10	11,13	0,35	32,44	12,42
11	11,56	0,36	32,03	12,26
12	16,05	0,36	33,95	13,00
13	11,51	0,36	31,26	11,97
14	16,65	0,36	33,06	12,66
15	17,36	0,37	32,25	12,35
16	18,57	0,38	31,63	12,11
17	26,63	0,39	33,78	12,93
18	18,36	0,39	30,67	11,74
19	26,17	0,39	32,70	12,52
20	26,02	0,40	31,75	12,16
21	25,28	0,41	30,71	11,76
22	33,83	0,42	32,80	12,56
23	31,36	0,42	31,35	12,00

Slika 6.3 prikazuje raspodjelu aksijalnih polja za postojeću i optimiranu inačicu. U usporedbi s postojećom, aksijalna polja su za optimiranu inačicu nešto jača pa je tako maksimalno aksijalno polje poraslo za 2,78 %. Maksimalno polje na rubu obloge također je poraslo u odnosu na postojeću inačicu za 2,81 % (Slika 6.4). Raspodjela aksijalnih naprezanja, koja su uzeta kao kriterij pri optimiranju, za optimiranu inačicu je ujednačenija od raspodjele polja na rubovima obloga. Najveće polje javlja se na rubu zadnje obloge za obje inačice izolacijskog sustava, a prisutan je i trend porasta  $E_o$  s porastom rednog broja obloge.

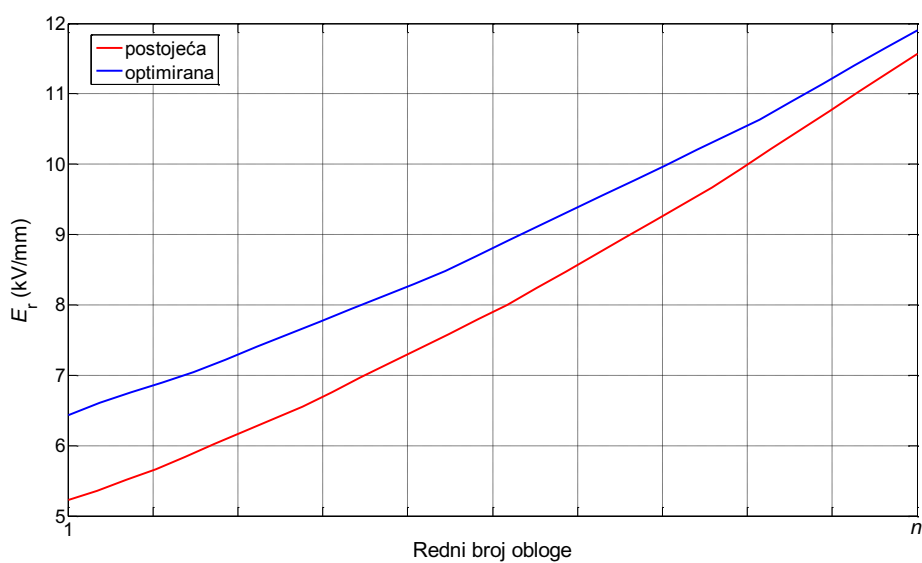


Slika 6.3 – Raspodjela aksijalnih polja za postojeću i optimiranu inačicu

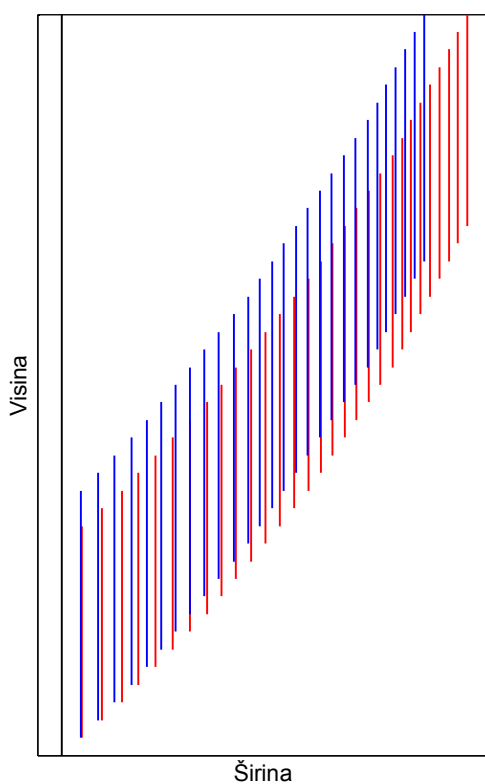


Slika 6.4 – Raspodjela polja na rubovima obloga za postojeću i optimiranu inačicu

Slika 6.5 prikazuje raspodjelu radijalnih polja među oblogama za postojeću i optimiranu inačicu izolacijskog sustava. Maksimalno radijalno polje optimirane inačice veće je za 2,85 %. Dielektrička naprezanja optimiranog sustava ne razlikuju se znatno od naprezanja početnog sustava, a debljina izolacije smanjena je za 12,3 % čime je omogućena uporaba užeg porculanskog izolatora. Slika 6.6 prikazuje raspored kondenzatorskih obloga za početnu i optimiranu inačicu dobivenu korištenjem potprograma OPTIZO\_1. Vidljivo je kako je radijus zadnje obloge optimirane inačice manji, dok su obloge dulje za 14,3 %.



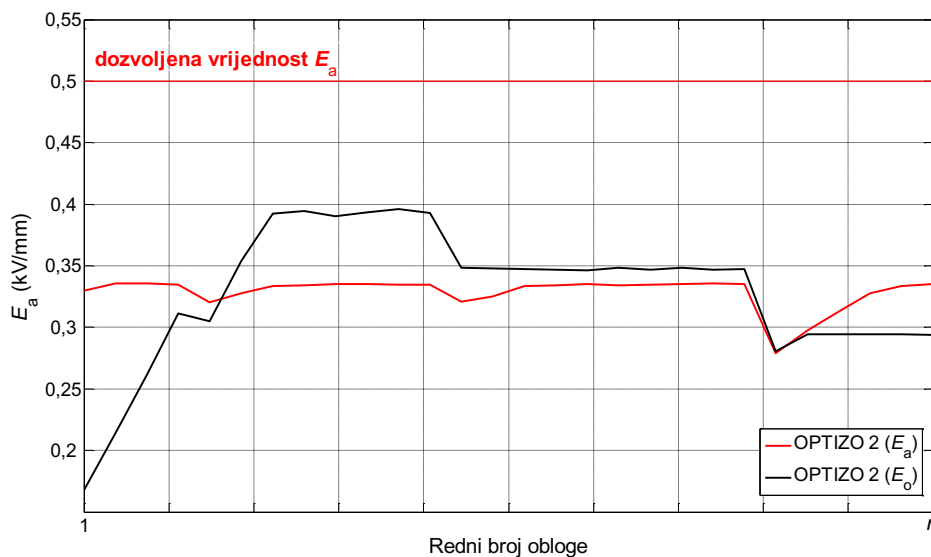
Slika 6.5 – Raspodjela radijalnih polja za postojeću i optimiranu inačicu



Slika 6.6 – Obloge postojećeg (crvene) i optimiranog (plave) izolacijskog sustava dobivenog korištenjem potprograma OPTIZO\_1

Jakosti aksijalnih polja optimirane inačice su još uvijek znatno ispod dozvoljenih vrijednosti, što izolacijski sustav čini izrazito pouzdanim. Iako u ovom slučaju nisu potrebne dodatne manipulacije duljinama oblogama, jer su sva polja ispod dozvoljenih vrijednosti, pokazat će se kako takav zahvat može dodatno smanjiti određena naprezanja.

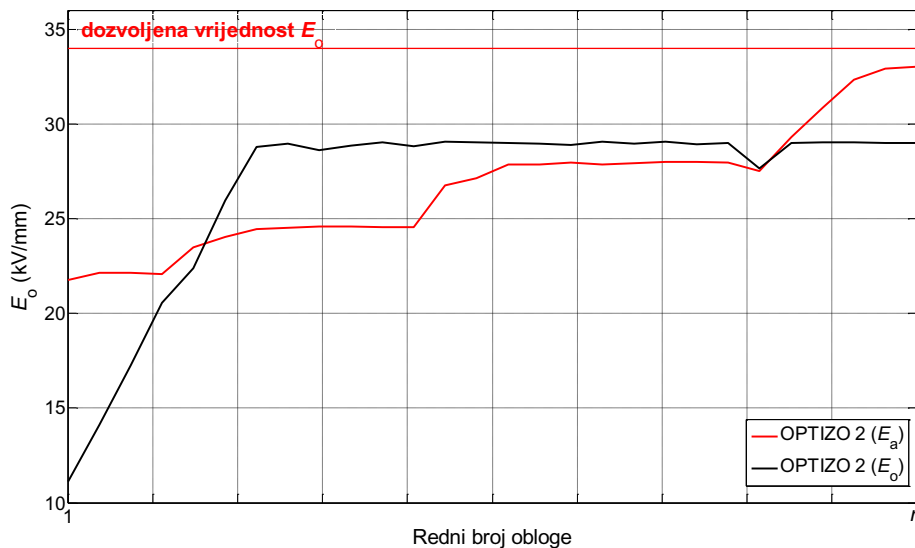
Potprogram OPTIZO\_2 preuzima radijuse i aksijalne razmake optimirane inačice dobivene potprogramom OPTIZO\_1. Duljine svih obloga osim posljednje postavljaju se na minimalnu dozvoljenu duljinu  $l_{\min}$  te se izračunaju raspodjele potencijala i polja. Slijedi analiza rezultata proračuna i ovisno o odabranom kriteriju optimiranja korigiraju se duljine obloga. Neka je npr. kriterij optimiranja aksijalno polje i zadana je njegova dozvoljena vrijednost. Ako je aksijalno polje među susjednim oblogama veće od zadanog, tada će se produljiti obloga sa manjim rednim brojem za zadanu duljinu  $\Delta l$ . Time će porasti kapacitet između produljene obloge i susjedne obloge sa većim rednim brojem, smanjit će se pad napona među njima, a time i jakosti električnih polja. Ovaj postupak se ponavlja sve dok vrijednosti svih polja nisu manje od dozvoljenih vrijednosti ili dok obloge tijekom produljivanja ne dosegnu maksimalnu dozvoljenu visinu od ruba uzemljene cijevi do koje se mogu umetati obloge  $h_{\max}$ .



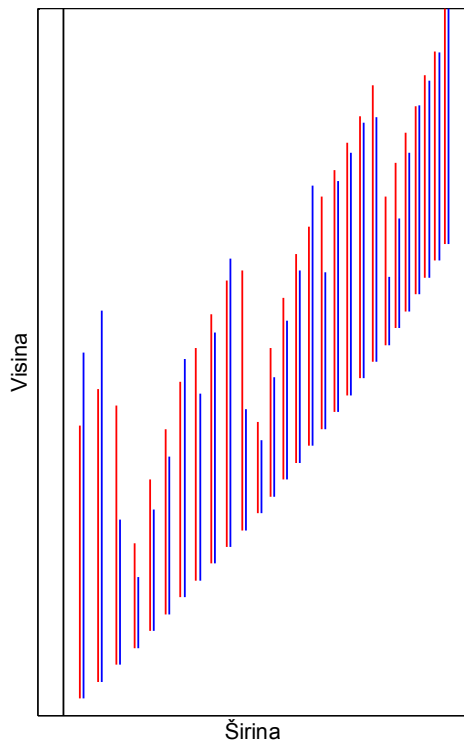
Slika 6.7 – Raspodjela aksijalnih polja nakon optimiranja duljina obloga uz  $E_a$  i  $E_o$  kao kriterij

U nastavku analiziraju se dva odvojena postupka optimiranja duljina obloga potprogramom OPTIZO\_2. U prvom je kao kriterij odabrano aksijalno polje, a u drugom polje na rubu obloge. Raspodjele aksijalnih polja za oba slučaja prikazuju

slike 6.7 i 6.8. Optimiranje duljina obloga uz  $E_{a,max}$  kao kriterij smanjuje maksimalno aksijalno polje za 8,1 %, ali i povećava  $E_{o,max}$  za 6,2 % u odnosu na inačicu izolacijskog sustava dobivenu potprogramom OPTIZO\_1.



Slika 6.8 – Raspodjela polja na rubovima nakon optimiranja duljina obloga uz  $E_a$  i  $E_o$  kao kriterij



Slika 6.9 – Obloge nakon optimiranja duljina korištenjem potprograma OPTIZO\_2 uz  $E_a$  (crvene obloge) i  $E_o$  (plave obloge) kao kriterij pri optimiranju

Ukoliko je kao kriterij zadano  $E_{o,max}$ , optimiranjem duljina obloga moguće je smanjiti maksimalno polje na rubu obloge za 6,5 %, ali se pritom povećava  $E_{a,max}$  za 8,1 %. Dakle, u analiziranom slučaju  $E_{a,max}$  se može dodatno smanjiti optimiranjem duljina obloga ukoliko postoji rezerva koja dozvoljava određeni porast  $E_{o,max}$  i obratno. Slika 6.9 prikazuje raspored kondenzatorskih obloga za inačice dobivene korištenjem potprograma OPTIZO\_2.

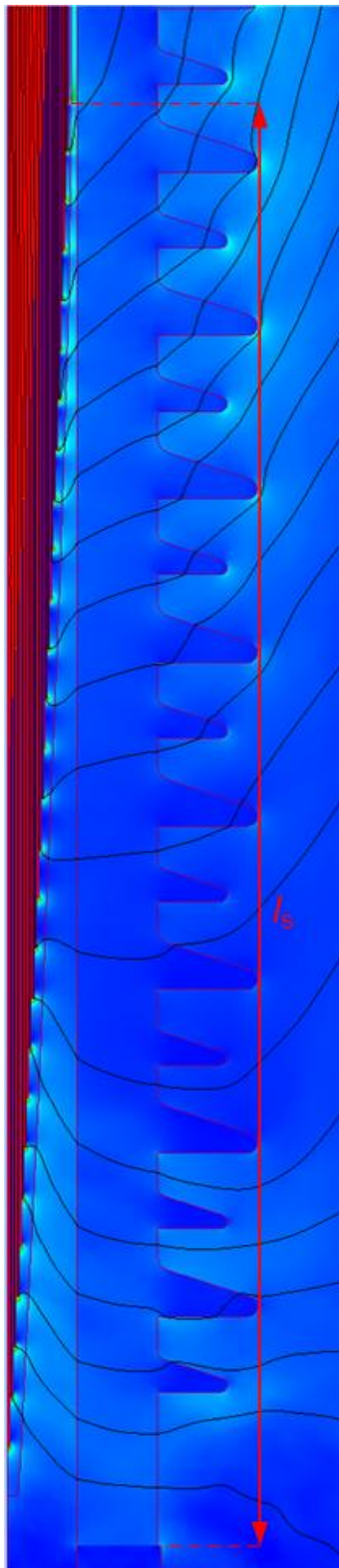
No, kako je već spomenuto, u ovom slučaju nije potrebno optimirati duljine obloga budući da su vrijednosti polja znatno ispod dozvoljenih. Zato je kao optimalna inačica odabrana ona koja je dobivena korištenjem potprograma OPTIZO\_1. Potrebno je još za odabranu inačicu numerički odrediti električno polje, kako bi se analizirala naprezanja koja nisu razmatrana prilikom optimiranja parametara obloga.

Za optimiranu inačicu, u kojoj su duljine svih obloga jednake, proračunato je električno polje u programskom paketu ElecNet. Slika 6.10 prikazuje rezultat proračuna polja za početnu inačicu s označenim okomitim zračnim razmakom između zadnje obloge i uzemljene prirubnice. Ukoliko je  $l_s$  nedovoljno velik doći će do preskoka u zraku ili proboja. Prema postupku opisanom u poglavlju 4.1, za zadani  $l_s$  dobiven je iz izraza (4.2)  $U_{50\%l_s} = 452,3$  kV, odnosno  $U_{10\%l_s} = 431$  kV. Duž razmaka  $l_s$  ne vlada puni primjenjeni napon, nego 74,1 % njegove vrijednosti pa će 50 % preskočni napon iznositi  $U_{50\%} = U_{50\%l_s} / 0,741 = 610,4$  kV, a podnosivi atmosferski udarni napon  $U_{10\%l_s} = 586,6$  kV. Tjemena vrijednost podnosivog atmosferskog udarnog napona za 123 kilovoltni mjerni transformator iznosi 550 kV, što je 6,2 % niže od računski određenog podnosivog napona  $U_{10\%}$ , pa je zaključak kako odabrani  $l_s$  zadovoljava s obzirom na dielektrička naprezanja u zraku.

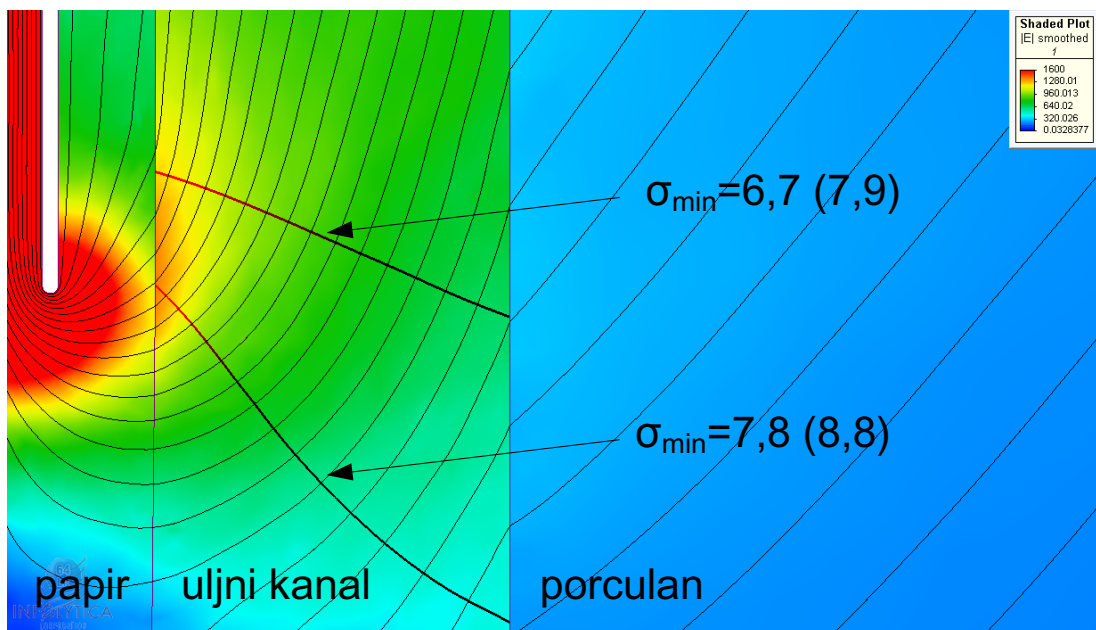
Kontrola dielektričkih naprezanja u uljnom kanalu, koji je odvaja papirnu izolacijom od visokonaponskog izolatora, zahtjeva analizu linija kritičnog polja. One premošćuju uljni kanal i slijede silnice električnog polja. Slika 6.11 prikazuje dvije od nekoliko analiziranih takvih linija u uljnom kanalu u blizini ruba zadnje obloge, od kojih donja započinje iz točke koja je u razini ruba obloge, a gornja iz točke koja je za 1 mm pomaknuta u okomitom smjeru. Iako gornja linija kritičnog polja započinje iz točke u kojoj je električno polje manje u odnosu na donju liniju, pripadajuća dielektrička naprezanja su nepovoljnija, a faktor sigurnosti je manji. To pokazuje kako se izbor polazišta linije kritičnog polja ne može ograničiti samo na područje s lokalnim maksimumom polja i jednu liniju, nego valja analizirati više linija. Rezultati



pokazuju kako su naprezanja u uljnim kanalima znatno manja od dopuštenih. Faktori sigurnosti u zgradama odnose se na početnu inačicu izolacijskog sustava.



*Slika 6.10 – Rezultat numeričkog proračuna električnog polja za optimiranu inačicu*



Slika 6.11 – Kritične linije polja i minimalni faktori sigurnosti u uljnom kanalu u blizini ruba zadnje obloge. Vrijednosti van zagrada odnose se na optimiranu inačicu, a vrijednosti u zagradama na postojeću inačicu.

Može se primijetiti da su se faktori sigurnosti manji za optimiranu inačicu. To je posljedica zamjetnog smanjenja obujma izolacije, ali i dobro dimenzionirane postojeće inačice izolacijskog sustava. Naime, kod lošije dimenzioniranih sustava moguće je optimiranjem dobiti novi sustav sa slabijim poljima i manjim obujmom izolacije.

Minimalni faktor sigurnosti za tangencijalno polje na granici papira i ulja iznosi 3,6 za početnu, odnosno 3,4 za optimiranu inačicu. Navedene vrijednosti udovoljavaju kriterijima za naprezanja u ulju koji su definirani u 4. poglavlju.

### 6.3 Optimiranje duljina obloga primjenom genetskog algoritma

Broj načina na koje je moguće odabrati duljine obloga jako je velik, uz uvjet da duljine izražene u milimetrima moraju biti cijeli brojevi, pa je zbog ograničenosti računala gotovo nemoguće izračunati naprezanja za sve kombinacije. Uzme li se npr. sustav s 30 obloga, uz uvjet da duljina svake obloge može poprimiti samo dvije vrijednosti, tada je broj mogućih kombinacija  $2^{30} \approx 10^9$ . Prethodno opisana metoda optimiranja duljina obloga ciljano provodi korekciju duljina onih obloga čija su dielektrička naprezanja veća od dozvoljenih. Na ovaj način nikad se ne pretraži

ogroman prostor potencijalnih rješenja pa nije moguće tvrditi kako je pronađeno ono optimalno.

Genetski algoritam kao metoda optimiranja nastao je oponašanjem prirodnog evolucijskog procesa, a analogija među njima očituje se u procesu selekcije i reprodukcije. Koristi se za rješavanje težih optimizacijskih problema za koje ne postoji egzaktna matematička metoda rješavanja. Po načinu djelovanja ubraja se u metode usmjerenog slučajnog pretraživanja prostora rješenja. Prvi su se pojavili još u ranim sedamdesetima, a u posljednjih nekoliko godina pokazali su se vrlo moćnim i općenitim alatom za rješavanje čitavog niza problema iz inženjerske prakse ([47], [48], [49], [50]). Prednost genetskog algoritma leži u sposobnosti određivanja globalnog optimuma u prostoru s više lokalnih ekstrema, za razliku od klasičnih metoda optimizacije koje se uvijek kreću prema lokalnom minimumu ili maksimumu [51].

Genetski algoritam provodi genetske operacije nad populacijom kromosoma. Kromosomi, tj. potencijalna rješenja, sastoje se od gena, a pridjeljuje im se vrijednost funkcije dobrote. Za zadani optimizacijski problem najveću poteškoću predstavlja definiranje funkcije dobrote, koja treba vjerno odražavati problem koji se rješava. Što je dobrotu jedinke veća, jedinka ima veću vjerojatnost preživljavanja i križanja pa je funkcija dobrote ključ za proces selekcije. Nakon što se generira početna populacija, genetski algoritam ciklički obavlja selekciju boljih jedinki, koje pritom sudjeluju u reprodukciji, sve dok nije zadovoljen uvjet završetka evolucijskog procesa. Reprodukcija ili proces stvaranja novih kromosoma vrši se genetskim operatorima križanja i mutacije, pri čemu prvi operator prenosi svojstva roditelja na djecu, a drugi slučajno mijenja svojstva jedinke [52].

Optimiranje duljina kondenzatorskih obloga genetskim algoritmom izvršeno je alatom *Genetic Algorithm Tool*, dijelom programskog paketa Matlab specijaliziranom za optimiranje primjenom genetskog algoritma. Korišteni su vlastiti potprogrami za određivanje matrice kapaciteta te proračun raspodjele napona i jakosti električnog polja. Iako je prethodno razvijen i vlastiti program za optimiranje duljina obloga genetskim algoritmom koji je uspješno primjenjen [19], *Genetic Algorithm Tool* korišten je zbog znatno bržeg izvođenja što omogućuje zadavanje populacija s velikim brojem jedinki.

Izolacijski sustav prema terminologiji genetskog algoritma naziva se kromosom, a načinjen je od određenog broja duljina kondenzatorskih obloga tj. gena. Na početku procesa optimiranja nasumično se stvara početna populacija od  $n$

izolacijskih sustava tj. biraju se za svakog od njih, nasumce iz zadanog intervala, duljine obloga.

U sljedećem koraku računa se raspodjela napona za svaki izolacijski sustav. Raspodjela napona ima ulogu funkcije dobrote, što znači da jedinke koje imaju bolju raspodjelu napona imaju veće izgleda za preživljavanje. U literaturi se funkcija dobrote ili funkcija ocjene kvalitete jedinke naziva još i *fitness* funkcija, funkcija sposobnosti ili funkcija cilja. Kako je cilj što ujednačenija raspodjela napona, funkcija dobrote  $f_d$  je obrnuto proporcionalna najvećem odstupanju pada napona između susjednih obloga  $u_{\%max}$  od linearne raspodjele potencijala:

$$f_d = \frac{1}{u_{\%max}}. \quad (6.8)$$

Samo pri stvaranju početne populacije u *Genetic Algorithm Tool*, duljine obloga biraju se iz zadanog intervala vrijednosti  $[l_{min} \ l_{max}]$  pri čemu se  $l_{min}$  zadaje, a  $l_{max}$  određuje iz izraza (6.2). U sljedećim generacijama algoritam bira i duljine obloga koje nisu iz zadanog intervala. Tako se dogodi da pojedine obloge budu preduge ili prekratke. Za sustave čije duljine obloga nisu iz zadanog intervala vrijednosti ne provode se proračuni nego im se odmah dodjeli jako loša ocjena kako bi se smanjila vjerojatnost njihova ponovnog pojavljivanja.

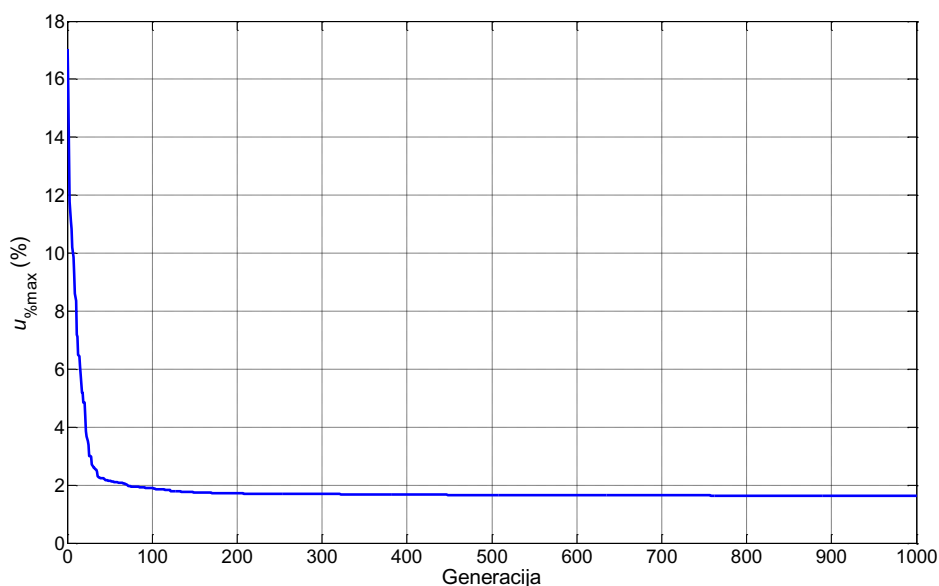
Nakon što su određene raspodjele napona za svaki od  $n$  izolacijskih sustava slijedi njihovo rangiranje, a zatim selekcija  $n_e$  jedinki koje imaju najbolje raspodjele napona. Te se jedinke direktno prenose u sljedeću generaciju. Ova vrsta selekcije naziva se elitizam i karakteristična je po mehanizmu zaštite od izmjene ili eliminacije najbolje jedinke tijekom evolucijskog procesa. Prednost elitizma je ta što najbolje rješenje ostaje očuvano i nema opasnosti njegova nestanka zbog djelovanja genetskih operatora. Važno je napomenuti kako broj jedinki u svakoj generaciji ostaje nepromijenjen, pa se preostalih  $n-n_e$  jedinki nove generacije stvara križanjem i mutacijom. Križanje i mutacija su genetski operatori koji u svakoj iteraciji modificiraju populaciju.

Faktor križanja određuje postotak jedinki sljedeće generacije, izuzev onih odabranih elitizmom, koje nastaju križanjem, dok se preostale jedinke stvaraju mutacijom. Mutacija doprinosi genetskoj raznolikosti tako da čini sitne, slučajne promjene na genima i time pospješuje pretraživanje većeg područja u prostoru rješenja. Korištena je Gaussova mutacija koja produljuje ili skraćuje duljine obloga prema Gaussovoj razdiobi s očekivanjem 0. Križanje je proces nastajanja novih

jedinki kombiniranjem genetskog materijala dviju postojećih jedinki iz iste generacije, tj. roditelja. Križanju prethodi selekcija roditelja, a vjerojatnost odabira roditelja proporcionalna je dobroti njemu pripadajuće raspodjele napona. Korištena je funkcija križanja koja stvara binarni vektor veličine kromosoma slučajnim odabirom. Ukoliko je vrijednost gena 1, tada novonastala jedinka dobiva gen na toj poziciji od prvog roditelja. U slučaju da je vrijednost gena 0, novonastala jedinka dobiva gen na toj poziciji od drugog roditelja.

Nakon stvaranja početne populacije određuje se funkcija dobrote za svaku jedinku i stvara nova populacija prema opisanim postupcima, sve dok nisu zadovoljeni određeni kriteriji za zaustavljanje procesa optimiranja, a oni mogu biti:

- najveća vrijednost pada napona između susjednih obloga manja je ili jednaka zadanoj,
- dosegnut je određeni broj generacija,
- genetski sastav najbolje jedinke nije se promijenio u posljednjih nekoliko generacija, tzv. kriterij stagnacije,
- vrijeme izvođenja.



*Slika 6.12 – Najveće postotno odstupanje maksimalnog pada napona od linearne raspodjele potencijala za najbolji sustav u svakoj generaciji*

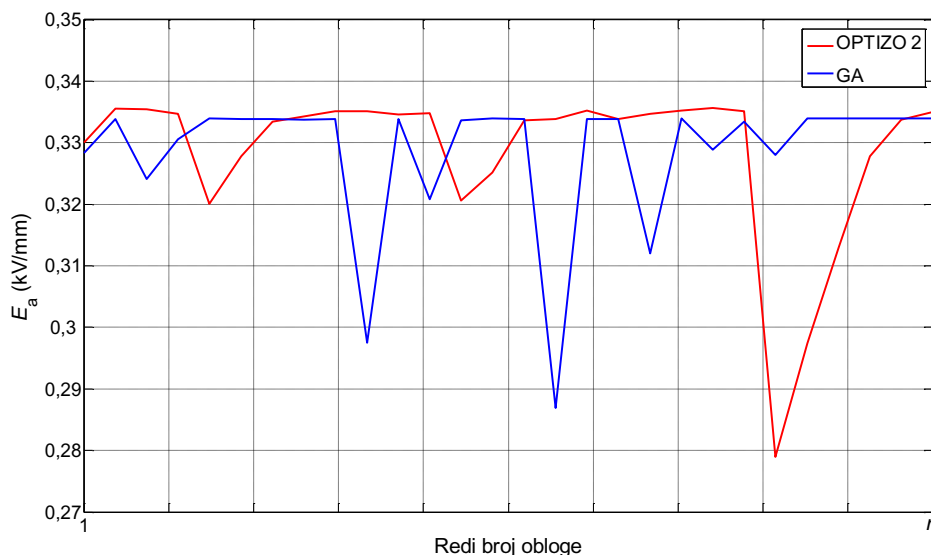
Primjena genetskog algoritma u zadaćama optimiranja parametara kondenzatorskih obloga unutar izolacijskog sustava daje zanimljive rezultate. Duljine obloga optimirane su korištenjem genetskog algoritma na strujnom transformatoru za najviši napon opreme 123 kV, a kojem su optimalan broj i radijusi obloga određeni u poglavlju 6.2.

Postavke genetskog algoritma su sljedeće:

- veličina populacije od 5000 jedinki,
- 50 jedinki se selektira po principu elitizma,
- faktor križanja 0,8 (80 % preostalih jedinki nastaje križanjem)
- proces se zaustavlja nakon 1000 generacija.

Slika 6.12 prikazuje najveće postotno odstupanje od stupanje maksimalnog pada napona od linearne raspodjele potencijala za najbolji sustav u svakoj generaciji. Veliko poboljšanje postignuto je u svega 36 generacija pri čemu je najveće odstupanje sa 17,05 % smanjeno na čak 2,31 %. Nakon 1000 generacija najveće odstupanje napona poprima vrijednost 1,62 %.

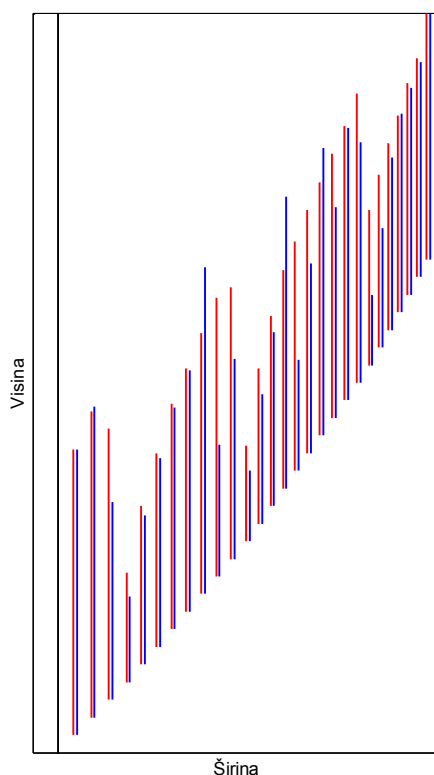
Zanimljivo je usporediti geometrijske parametre dobivene optimiranjem potprogramom OPTIZO\_2 i one dobivene primjenom genetskog algoritma (Slika 6.14). Može se primijetiti kako se oni relativno dobro podudaraju, što ukazuje kako bi sustav s optimalnom raspodjelom naprežanja mogao slično izgledati budući da genetski algoritam pretražuje prostor mogućih rješenja slučajnim odabirom. Točnost genetskog algoritma potvrđuje se ponovljivošću, pa je provedeno još nekoliko proračuna s istim i ponešto izmijenjenim postavkama koji su dali slične rezultate.



Slika 6.13 – Raspodjela aksijalnih polja za inačice optimirane potprogramom OPTIZO\_2 i genetskim algoritmom, uz  $E_a$  kao kriterij

Najveće postotno odstupanje napona od linearne raspodjele potencijala sustava dobivenog potprogramom OPTIZO\_2 iznosi 2,14 %, a kod sustava dobivenog genetskim algoritmom 1,68 %. Maksimalno aksijalno polje u sustavu

dobivenom potprogramom OPTIZO\_2 iznosi 0,336 kV/mm, odnosno 0,334 kV/mm za sustav dobiven primjenom genetskog algoritma. Nadalje, najveće polje na rubu obloge za sustav dobiven potprogramom OPTIZO\_2 iznosi 33,03 kV/mm, a za sustav dobiven genetskim algoritmom 32,91 kV/mm. Dakle, genetski algoritam daje neznatno bolje rezultate pa je optimiranje duljina obloga izvedivo na oba načina.



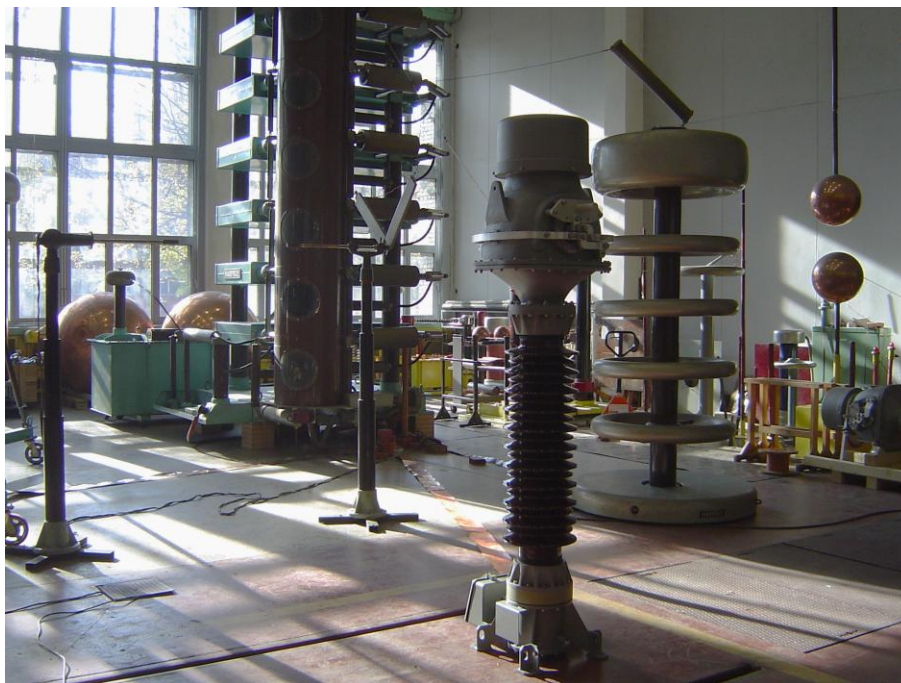
*Slika 6.14 – Obloge nakon optimiranja duljina korištenjem programa OPTIZO\_2 (crveni) i genetskog algoritma (plavi), uz  $E_{a,max}$  kao kriterij*

U budućnosti bi se genetski algoritam, s obzirom na dosadašnje rezultate, mogao primijeniti na složenim zadaćama kao što je optimiranje parametara pomoćnih obloga u izolacijskim sustavima s više glavnih obloga.

#### **6.4 Eksperimentalna provjera rezultata optimiranja**

Prema rezultatima optimiranja potprogramom OPTIZO\_1 izrađen je u Končar – Mjernim transformatorima prototip strujnog transformatora s užim visokonaponskim izolatorom u odnosu prema postojećem rješenju. Novi izolacijski sustav ima 2 obloge manje od postojećeg, debljina izolacije smanjena je za 12,3 %,

a masa cijelog transformatora za 11,1 %. Novi strujni transformator uspješno je izdržao tipska i rutinska ispitivanja u skladu sa zahtjevima međunarodne norme [5]. Slike 6.15 i 6.16 prikazuju novi transformator za vrijeme tipskih dielektričkih ispitivanja.



*Slika 6.15 – Ispitivanje novog strujnog transformatora udarnim naponom*

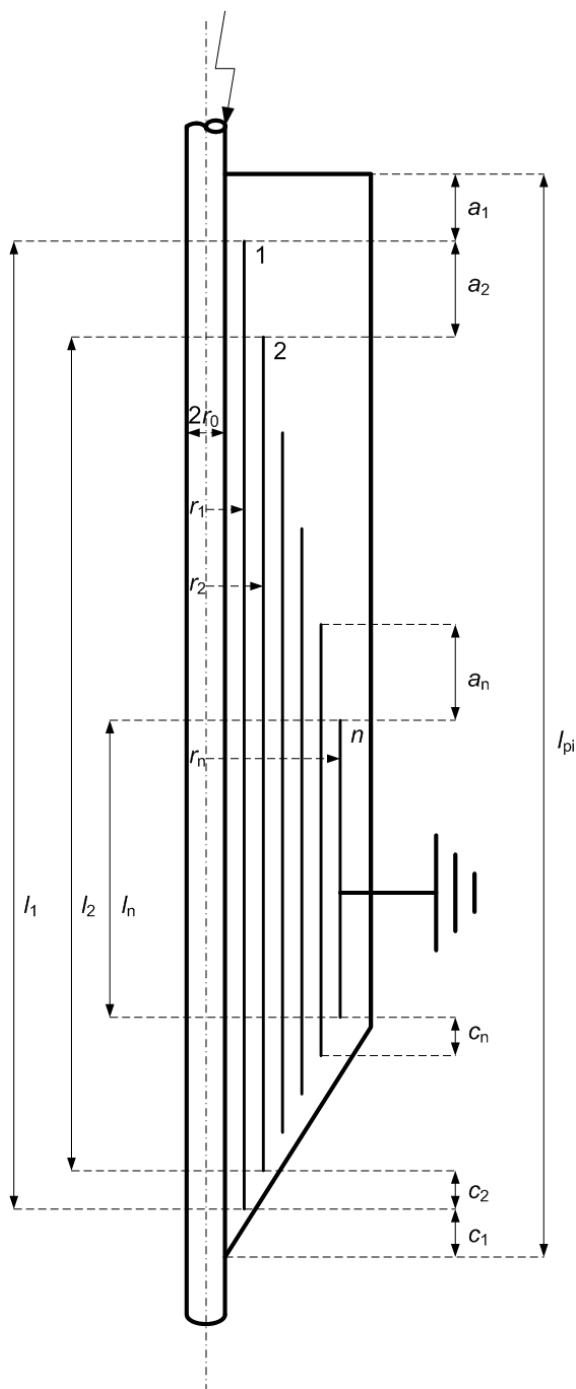


*Slika 6.16 – Ispitivanje novog strujnog transformatora podnosivim naponom industrijske frekvencije na umjetnoj kiši*



## 7. Dielektrička naprežanja uljno-papirne izolacije provodnika

Kondenzatorsko tijelo provodnika načinjeno je od uljno papirne izolacije i vodljivih obloga kojima se smanjuju i ujednačuju dielektrička naprežanja. Obloge su postavljene oko zajedničke osi, koaksijalno, i tvore sustav serijski povezanih cilindričnih kondenzatora (Slika 7.1).



Slika 7.1 - Shematski prikaz kondenzatorskog tijela provodnika

Centralna cijev na koju je namotano kondenzatorsko tijelo je na 100 % potencijala, a posljednja obloga u sustavu, koja zakriljuje prirubnicu, je uzemljena. Obloge su označene brojevima od 1 do  $n$ , njihove duljine s  $l$ , a radijusi na koje se umeću s  $r$ . Aksijalni razmaci među oblogama sa zračne strane označeni su s  $a$ , dok su oni s uljne strane označeni s  $c$ . Parametri obloga moraju osigurati da dielektrička naprezanja u uljno-papirnoj izolaciji ne premaše dozvoljene vrijednosti: 0,5 kV/mm za aksijalna polja sa zračne strane, 1,3 kV/mm za aksijalna polja s uljne strane te 100 kV/mm za polja na rubu kondenzatorskih obloga.

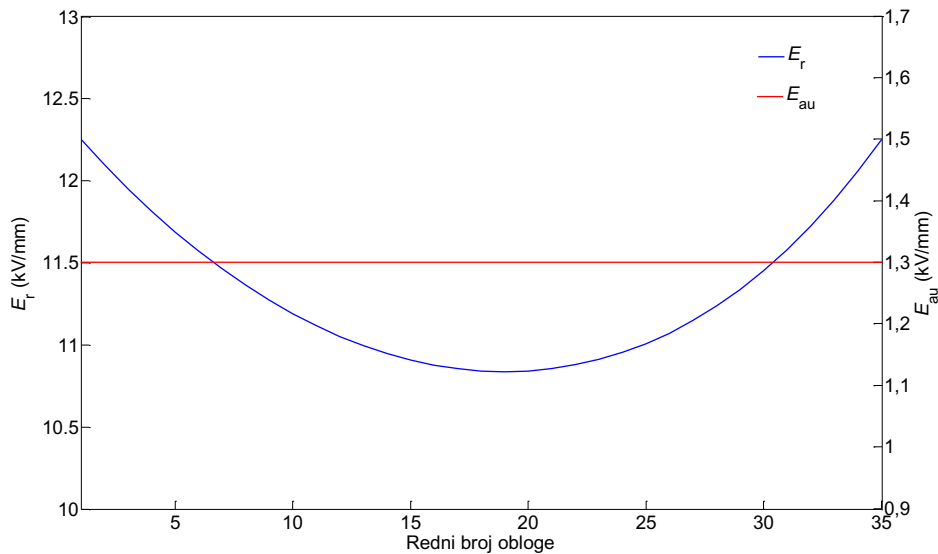
Posebnu pažnju treba posvetiti razmaku od vrha posljednje obloge, koja je uzemljena, do glave provodnika koja je na 100 % potencijala. Naime, ako je predmetni razmak kratak, može doći do preskoka ili proboja od ruba posljednje obloge kroz uljno-papirnu izolaciju, uljni kanal, visokonaponski izolator i naposljetku zrak prema glavi provodnika. Naprezanja vanjske izolacije obrađena su u poglavlju 4.1. Naprezanja u uljnim kanalima provjeravaju se usporedbom s Weidmannovim kriterijima opisanim u poglavlju 4.2.

U suštini postoje tri izvedbe kondenzatorskog tijela provodnika. U prvoj izvedbi, koja se i najčešće susreće u primjeni naročito za  $U_m > 66$  kV, kapaciteti među susjednim oblogama su jednaki kao i aksijalni razmaci među njima. Drugom izvedbom obuhvaćeni su provodnici kojima su kapaciteti među susjednim oblogama jednaki, uz jednaku debljinu izolacije među njima. Treća izvedba odnosi se na provodnike kojima je jednaka debljina izolacije i jednaki aksijalni razmaci među oblogama [53]. U ovom poglavlju razrađen postupak određivanja optimalnih parametara obloga provodnika čije je kondenzatorsko tijelo načinjeno prema prvoj izvedbi.

## **7.1 Proračun parametara obloga**

Proračun parametara obloga provodnika nešto je jednostavniji u odnosu na mjerne transformatore. Razlog je činjenica da u izolacijskom sustavu provodnika postoje samo kapaciteti među susjednim oblogama. Kako su aksijalni razmaci među oblogama sa zračne i uljne strane stalni, uz linearnu raspodjelu potencijala, bit će ujednačena i aksijalna naprezanja sa zračne i uljne strane. Pritom raspodjela radijalnih polja nije jednolika, nego poprima sedlast oblik uz podjednako maksimalno radijalno polje između centralne cijevi i prve obloge te predzadnje i zadnje obloge, dok su maksimalna radijalna polja između ostalih obloga manja. Tipična raspodjela

maksimalnih radijalnih polja  $E_r$  i aksijalnih polja s uljne strane  $E_{au}$  među oblogama prikazana je na slici 7.2.



Slika 7.2 - Tipična raspodjela maksimalnih radijalnih i aksijalnih polja među oblogama s uljne strane

Već je istaknuto kako je dielektrička čvrstoća u aksijalnom smjeru višestruko manja od one u radijalnom smjeru. Zato se teži ujednačenju aksijalnih napreznja uz kontrolu radijalnih. Prema novom pristupu, koji je predstavljen u ovoj radnji, umjesto radijalnih kontrolirat će se vrijednosti polja na rubovima obloga.

Aksijalni razmak  $a$  među rubovima susjednih obloga sa zračne strane određen je izrazom:

$$a = \frac{U}{n \cdot E_{azz}}, \quad (7.1)$$

pri čemu je  $U$  vrijednost primjenjenog napona,  $n$  broj obloga i  $E_{azz}$  zadana vrijednost aksijalnog polja sa zračne strane. Slično je aksijalni razmak  $c$  među rubovima susjednih obloga s uljne strane određen izrazom:

$$c = \frac{U}{n \cdot E_{auz}}, \quad (7.2)$$

gdje je  $E_{auz}$  zadana vrijednost aksijalnog polja s uljne strane. Maksimalno radijalno polje između obloga s rednim brojem  $i-1$  te  $i$  određuje se iz izraza:

$$E_{vi} = \frac{U_i}{r_{i-1} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}, \quad (7.3)$$

gdje je  $U_i$  napon na  $i$ -tom kondenzatoru, tj. pad napona između obloga s rednim brojevima  $i-1$  i  $i$ . Iz izraza (7.3) slijedi:

$$\frac{U_i}{r_{i-1} E_{vi}} = \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}. \quad (7.4)$$

Sumiranjem izraza (7.4) za  $i=1 \dots n-1$  dobije se:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{U_i}{r_{i-1} E_{vi}} = \sum_{i=1}^{n-1} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}} = \ln \frac{r_{n-1}}{r_0}, \quad (7.5)$$

što se može napisati i kao:

$$\ln \frac{r_{n-1}}{r_0} - \ln \frac{r_1}{r_0} = \sum_{i=2}^{n-1} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}. \quad (7.6)$$

Linearna raspodjela potencijala po oblogama ostvarena je ukoliko su kapaciteti među oblogama jednaki:

$$\frac{2\pi\epsilon l_1}{\ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{2\pi\epsilon l_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \dots = \frac{2\pi\epsilon l_n}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}. \quad (7.7)$$

Iz jednakosti kapaciteta između prve obloge i centralne cijevi sa svim ostalim kapacitetima slijedi:

$$\ln \frac{r_i}{r_{i-1}} = \frac{l_i}{l_1} \ln \frac{r_1}{r_0}. \quad (7.8)$$

Uvrštavanjem (7.8) u (7.6) dobije se:

$$\ln \frac{r_{n-1}}{r_0} - \ln \frac{r_1}{r_0} = \left( \sum_{i=2}^{n-1} \frac{l_i}{l_1} \right) \ln \frac{r_1}{r_0}. \quad (7.9)$$

Izraz (7.9) može se zapisati i kao:

$$\ln \frac{r_{n-1}}{r_0} = \ln \frac{r_1}{r_0} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{l_i}{l_1}. \quad (7.10)$$

U slučaju jednolike raspodjele aksijalnih polja, raspodjela radijalnih, kako je već spomenuto, ne može biti ujednačena, nego poprima sedlast oblik. Pritom je

najpovoljniji slučaj ukoliko vrijednosti maksimalnih radijalnih polja među oblogama za prvi i posljednji kondenzator budu jednake:

$$\frac{U_1}{r_0 \ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{U_n}{r_{n-1} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}. \quad (7.11)$$

Kako je raspodjela potencijala linearna, odnosno padovi napona na kondenzatorima su jednaki, iz izraza (7.11) slijedi:

$$\frac{r_0}{r_{n-1}} = \frac{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}{\ln \frac{r_1}{r_0}}. \quad (7.12)$$

Ako se desna strana jednakosti u (7.12) izrazi preko (7.8), uz  $i=n$ , dobije se:

$$\frac{r_0}{r_{n-1}} = \frac{l_n}{l_1} = \alpha, \quad (7.13)$$

gdje novouvedeni parametar  $\alpha$  predstavlja omjer duljina posljednje i prve obloge. Iz izraza (7.9) i (7.13) slijedi:

$$\ln \frac{r_1}{r_0} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{l_i}{l_1} = \ln \frac{1}{\alpha}. \quad (7.14)$$

Uvodimo još i parametar  $\lambda$  koji ovisi o primjenjenom naponu, promjeru centralne cijevi i zadanom radijalnom polju:

$$\lambda = \frac{U}{2r_0 E_{rz}}. \quad (7.15)$$

Najveće radijalno polje vlada u prvom i zadnjem kondenzatoru pa iz (7.15) i izraza za maksimalno radijalno polje u prvom kondenzatoru slijedi:

$$\ln \frac{r_1}{r_0} = \frac{2\lambda}{n}. \quad (7.16)$$

Nakon uvrštavanja izraza (7.16) u (7.14) i sređivanja dobije se:

$$-\frac{2\lambda}{nl_1} \sum_{i=1}^{n-1} l_i = \ln \alpha. \quad (7.17)$$

Duljina posljednje obloge  $l_n$  može se izraziti preko duljine prve  $l_1$ , broja obloga  $n$  te sume aksijalnih razmaka sa zračne  $a$  i uljne strane  $c$ :

$$l_n = l_1 - (n-1) a + c . \quad (7.18)$$

Iz (7.18), uz  $a+c=\Delta$ , slijedi:

$$\Delta = \frac{l_1 - l_n}{n-1} . \quad (7.19)$$

Suma duljina svih obloga osim zadnje može se iskazati preko duljine prve obloge, sume aksijalnih razmaka i broja obloga:

$$\sum_{i=1}^{n-1} l_i = l_1 + l_1 - \Delta + l_1 - 2\Delta + \dots + l_1 - (n-2) \Delta , \quad (7.20)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} l_i = (n-1) l_1 - \Delta (1+2+\dots+n-2) , \quad (7.21)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} l_i = (n-1) l_1 - \Delta \frac{(n-2)(n-1)}{2} , \quad (7.22)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} l_i = (n-1) \frac{2l_1 - (n-2) \Delta}{2} . \quad (7.23)$$

Nakon uvrštavanja (7.19) u (7.23):

$$\sum_{i=1}^{n-1} l_i = \frac{nl_1 + (n-2) l_n}{2} , \quad (7.24)$$

i zatim uvrštavanja (7.24) u (7.17) i sređivanja dobije se:

$$\lambda = - \frac{n \ln \alpha}{n-2} \frac{1}{\alpha + n} . \quad (7.25)$$

U izrazu (7.25) nepoznanica je samo omjer duljina posljednje i prve obloge  $\alpha$ . Ova jednačba nema analitičko rješenje pa se mora riješiti numerički. Nakon što se odredi  $\alpha$ , može se iz (7.19), uz  $l_n = \alpha l_1$ , odrediti duljina prve obloge iz izraza:

$$l_1 = \Delta \frac{n-1}{1-\alpha} , \quad (7.26)$$

a zatim i duljine svih ostalih obloga prema izrazu:

$$l_i = l_1 - i - 1 \Delta. \quad (7.27)$$

Konačno, kada su poznate duljine svih obloga njihovi se radijusi, počevši od prvog, računaju iz sljedećeg rekurzivnog izraza, koji se dobije nakon uvrštavanja (7.16) u (7.8) i sređivanja:

$$r_i = r_{i-1} \exp\left(\frac{2\lambda l_i}{nl_1}\right). \quad (7.28)$$

Dakle, za zadane ulazne parametre, iz izraza (7.1), (7.2) i (7.15), odrede se aksijalni razmaci sa zračne i uljne strane  $a$  i  $c$  te parametar  $\lambda$ , a zatim se numeričkim rješavanjem jednadžbe (7.25) odredi omjer duljina zadnje i prve obloge  $\alpha$ . Uz poznat parametar  $\alpha$  iz izraza (7.26) do (7.28) određuju se duljine i radijusi obloga koji osiguravaju idealnu raspodjelu napona. Program koji izvodi opisane operacije i određuje optimalne duljine i radijuse obloga napravljen je u programskom paketu Matlab. Ulazni podatci programa su:

1. Zadana vrijednost radijalnog polja  $E_{rz}$ .
2. Zadana vrijednost aksijalnog polja s uljne strane  $E_{auz}$ .
3. Zadana vrijednost aksijalnog polja sa zračne strane  $E_{azz}$ .
4. Ukupan broj obloga  $n$ .
5. Radijus centralne cijevi  $r_0$ .
6. Efektivna vrijednost podnosivog izmjeničnog napona  $U$ .
7. Visina papirne izolacije  $l_{pi}$ .

Izlazni podatci su:

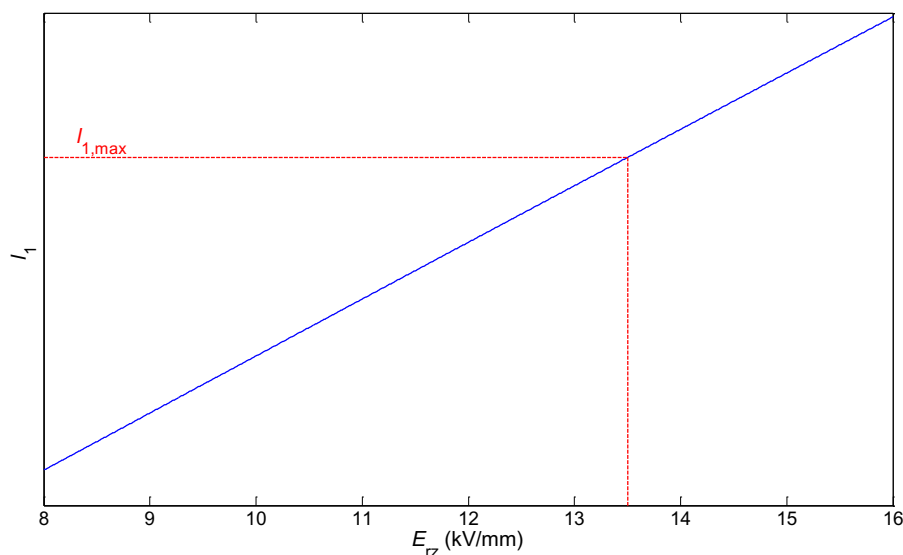
1. Geometrijski parametri obloga.
2. Aksijalna, radijalna i polja na rubovima obloga.
3. Okomiti razmak između glave provodnika i zadnje obloge  $l_s$ .

Vrijednost zadanog radijalnog polja  $E_{rz}$ , utječe na ukupnu debljinu papirne izolacije na način da veća dozvoljena vrijednost rezultira manjom debljinom izolacije, a manja dozvoljena vrijednost  $E_{rz}$  većom debljinom izolacije. Polja na rubovima obloga ovise o primjenjenom naponu i debljini izolacije među oblogama prema izrazu (4.7). To znači da zadavanjem  $E_{rz}$  utječemo na vrijednosti polja na rubovima obloga. Dozvoljene vrijednosti aksijalnih polja definiraju aksijalne razmake među oblogama.

## 7.2 Izbor ulaznih podataka za proračun parametara obloga

Od ulaznih podataka za proračun parametara obloga, samo su dva promjenjiva i to ukupan broj obloga  $n$  i zadana vrijednost radijalnog polja  $E_{rz}$ . Zadana aksijalna polja s uljne i zračne strane jednaka su maksimalnim dozvoljenim vrijednostima, a radijus centralne cijevi određen je nazivnom strujom provodnika. Iako je zadana vrijednost radijalnog polja  $E_{rz}$  potrebna za proračun parametara obloga, radijalno se polje ne uzima kao kriterij pri dimenzioniranju izolacije. Umjesto radijalnog polja, kao kriterij uzima se maksimalna jakost polja na rubu obloge  $E_{o,max}$ . Naime, prema rezultatima istraživanja na modelima izolacije upravo su rubovi obloga mjesta na kojima se javljaju jaka polja koja mogu dovesti do pojave parcijalnih izbijanja. Vrijednosti polja na rubovima obloga  $E_o$  ovise o zadanoj vrijednosti radijalnog polja  $E_{rz}$ .

Na primjeru izolacijskog sustava 245 kilovoltnog transformatorskog provodnika pokazat će se utjecaj izbora ulaznih na izlazne parametre. Obično se broj obloga bira tako da na svakih 10-15 kV podnosivog izmjeničnog napona dolazi po jedna obloga. Podnosivi izmjenični napon za 245 kilovoltni transformatorski provodnik ima vrijednost 506 kV pa je odabran broj obloga  $n=40$ . Zadana su još i dozvoljena aksijalna električna polja  $E_{azz}= 0,5$  kV/mm i  $E_{auz}= 1,3$  kV/mm. Iz izraza (7.1) i (7.2) izračunaju se aksijalni razmaci sa zračne i uljne strane,  $a=25,3$  mm i  $c=9,7$  mm.



Slika 7.3 – Ovisnost duljine prve obloge o zadanoj vrijednosti radijalnog polja

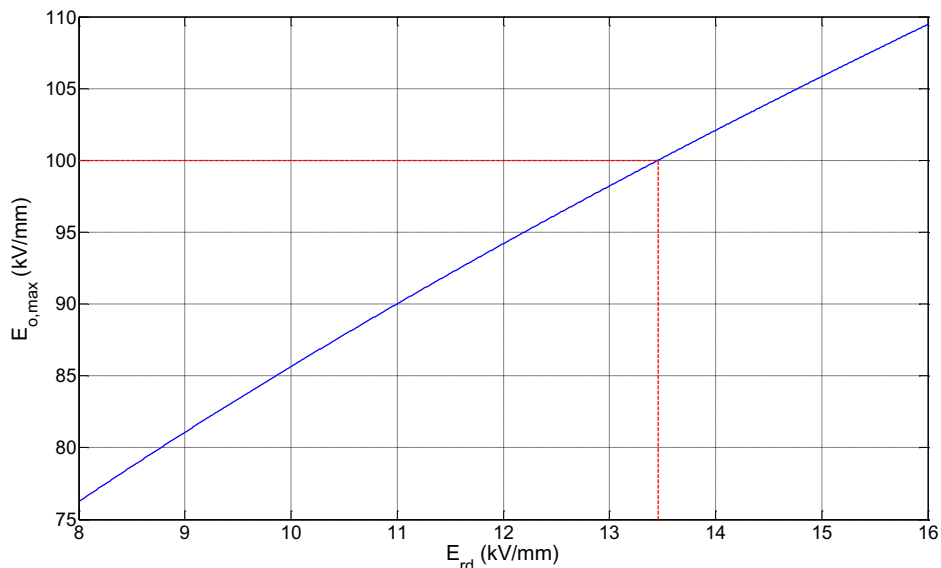


Maksimalna duljina prve obloge, koja je najdulja u sustavu, određena je visinom papirne izolacije  $l_{pi}$  i aksijalnim razmacima prema izrazu:

$$l_{1,max} = l_{pi} - a - c. \quad (7.29)$$

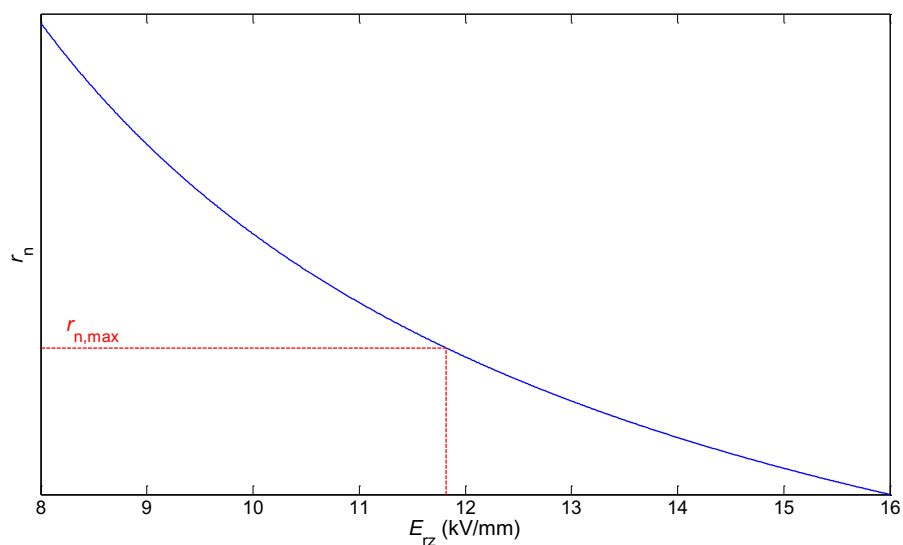
Za raspon vrijednosti  $E_{rz}$ , koje se u praksi očekuju, određeni su parametri obloga i jakosti električnih polja. Zadano radijalno polje  $E_{rz}$  varirano je od 8 kV/mm do 16 kV/mm u koracima 0,01 kV/mm. Slika 7.3 prikazuje ovisnost duljine prve obloge o zadanoj vrijednosti radijalnog polja.

Duljina prve obloge raste s porastom  $E_{rz}$ . S obzirom na  $l_{1,max}$ ,  $E_{rz}$  ne smije biti veće od 13,5 kV/mm. Najveće polje na rubu obloge  $E_{o,max}$  također raste s porastom zadanog radijalnog polja. Prema rezultatima na slici 7.4,  $E_{rz}$  ne smije biti veće od 13,46 kV/mm.

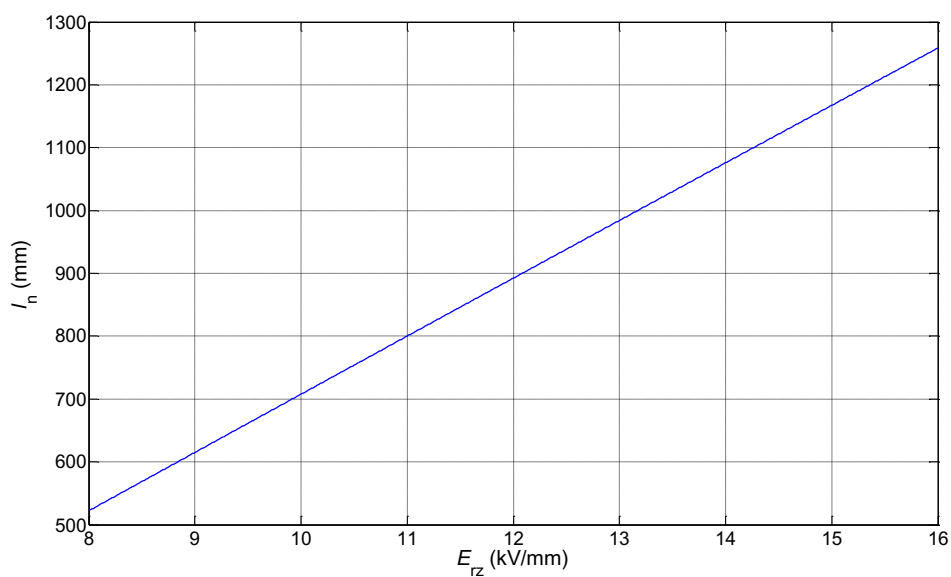


Slika 7.4 – Ovisnost maksimalnog polja na rubu obloge o dozvoljenoj vrijednosti radijalnog polja

Izbor  $E_{rz}$  ograničen je još i maksimalnim dozvoljenim radijusom zadnje obloge (Slika 7.5). U ovom slučaju  $E_{rz}$  ne smije biti manji od 11,8 kV/mm. Uzmu li se u obzir sva ograničenja,  $E_{rz}$  u kV/mm mora biti iz intervala  $11,8 \leq E_{rz} \leq 13,46$ . Izborom većeg  $E_{rz}$  smanjit će se radijus zadnje obloge, a time i debljina papirne izolacije. Međutim, s porastom  $E_{rz}$  raste i duljina zadnje obloge (Slika 7.6) pa se smanjuje razmak između zadnje obloge i glave provodnika  $l_s$ . Odabrani  $E_{rz}$  mora osigurati da  $l_s$  nije prekratak kako ne bi došlo do preskoka u zraku.

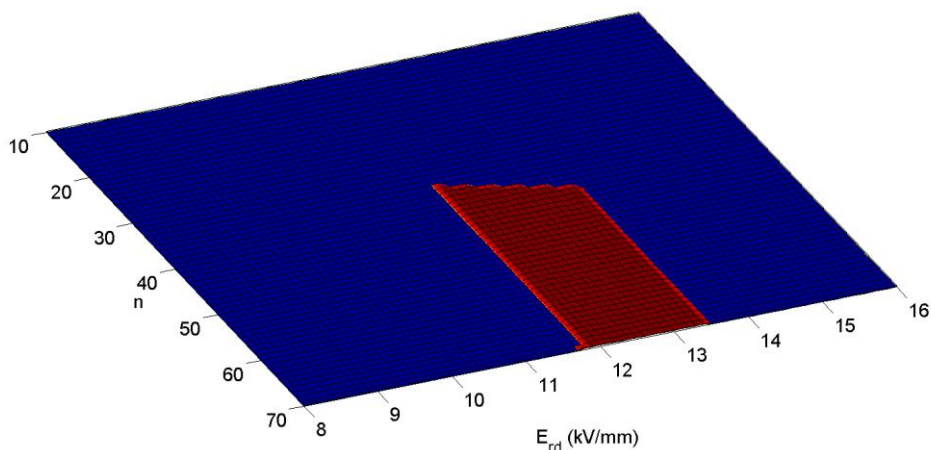


Slika 7.5 – Ovisnost radijusa zadnje obloge o zadanoj vrijednosti radijalnog polja



Slika 7.6 – Ovisnost duljine zadnje obloge o zadanoj vrijednosti radijalnog polja

U prethodnom razmatranju analiziran je sustav s 40 obloga, a pri optimiranju kondenzatorskog tijela valja provesti proračune za različite vrijednosti  $n$  i  $E_{rz}$ . U nastavku određeni su parametri obloga i jakosti električnih polja za vrijednosti zadanih podataka koje se u praksi očekuju;  $E_{rz}$  od 8 kV/mm do 16 kV/mm u koracima 0,1 kV/mm i za ukupan broj obloga  $n$  od 10 do 70. Ukupno je analiziran 4941 sustav, eliminirani su sustavi kojima su  $l_{1,max}$ ,  $r_{n,max}$  i  $E_{o,max}$  veći od dozvoljenih.

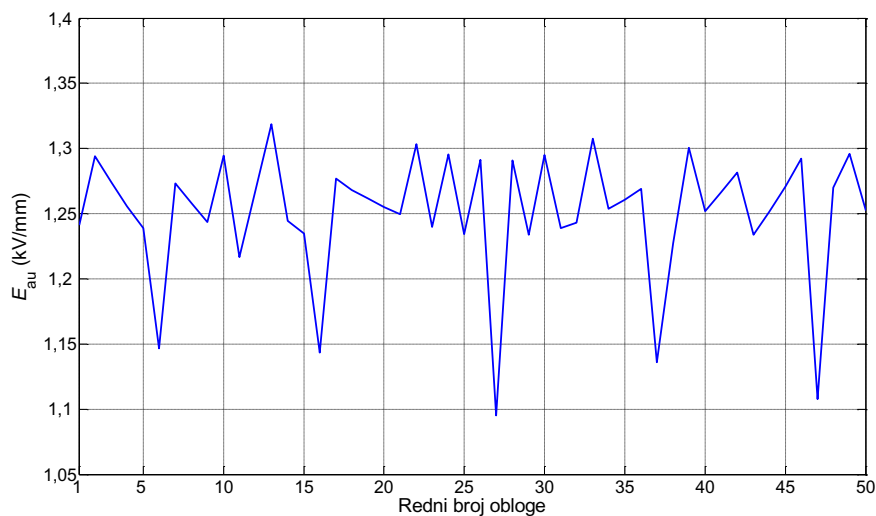


Slika 7.7 – Kombinacije ulaznih parametara za koje su pronađeni sustavi za koji zadovoljavaju s obzirom na  $I_{1,max}$ ,  $r_{n,max}$  i  $E_{o,max}$

Slika 7.7 prikazuje za koje  $E_{rz}$  i  $n$  se dobiju sustavi kojima su  $I_{1,max}$ ,  $r_{n,max}$  i  $E_{o,max}$  manji od dozvoljenih maksimalnih vrijednosti, a to je slučaj za  $n$  od 35 do 70 te za  $E_{rz}$  od 11,8 kV/mm do 13,4 kV/mm. Analizom rezultata utvrđeno je kako najmanju duljinu zadnje obloge ima sustav dobiven uz  $n=70$  i  $E_{rz}=11,8$  kV/mm, ali taj isti sustav ima i najdeblju izolaciju, odnosno najveći  $r_n$ . Najveću duljinu zadnje obloge ima sustav dobiven uz  $n=70$  i  $E_{rz}=13,4$  kV/mm, a isti sustav ima i najmanju debljinu izolacije, odnosno najmanji  $r_n$ .

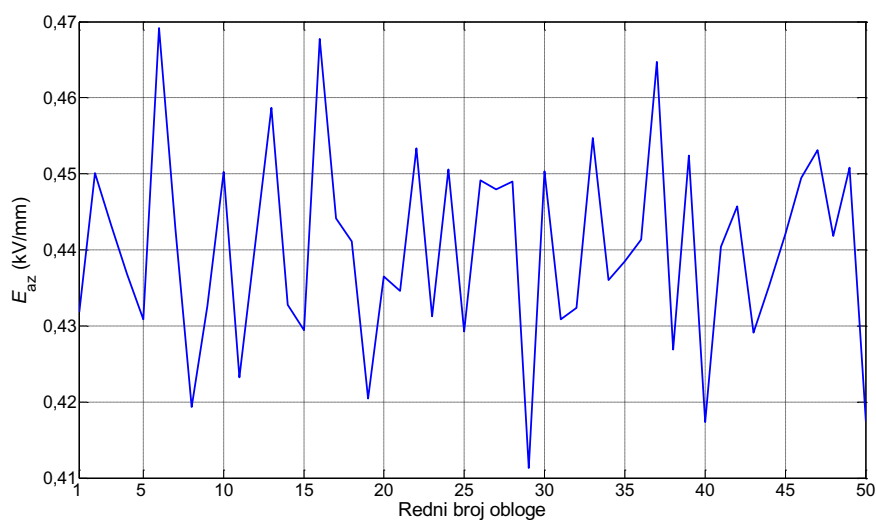
### 7.3 Prilagodba parametara obloga tehnološkim tolerancijama

Izračunati parametri obloga prema izrazima (7.26) do (7.28) osiguravaju linearnu raspodjelu potencijala po oblogama i pritom jednaka aksijalna naprezanja s uljne i zračne strane. Međutim, tako izračunati radijusi, duljine obloga i aksijalni razmaci među njima nisu ostvarivi u praksi zbog tehnoloških tolerancija. Zato duljine obloga i aksijalni razmaci među njima, trebaju biti cijeli brojevi izraženi u milimetrima, a radijusi na koje se umeću obloge moraju biti iskazani na desetinku milimetra. Posljedica prilagođavanja izračunatih parametara obloga tehnološkim tolerancijama je distorzija električnih polja, naročito aksijalnih s uljne strane koja, zbog kraćih aksijalnih razmaka u odnosu na zračnu stranu, jače ovise o malim promjenama parametara obloga. Pritom pojedine vrijednosti polja mogu premašiti dozvoljene pa stoga nije moguće, prilikom zadavanja ulaznih podataka, predvidjeti kakve će biti raspodjele napona i polja nakon prilagođavanja izračunatih parametara tehnološkim tolerancijama.



*Slika 7.8 – Utjecaj prilagodbe duljina obloga na aksijalna naprezanja s uljne strane*

Na primjeru izolacijskog sustava 245 kilovoltnog provodnika s 50 obloga analiziran je utjecaj prilagođavanja izračunatih parametara obloga tehnološkim tolerancijama na aksijalna polja. Slika 7.8 prikazuje vrijednosti aksijalnog polja s uljne strane nakon prilagodbe izračunatih parametara tehnološkim tolerancijama, uz zadanu vrijednost aksijalnog polja s uljne strane  $E_{auz}=1,25$  kV/mm. Može se uočiti kako čak četiri vrijednosti polja premašuju maksimalnu dozvoljenu vrijednost od 1,3 kV/mm, a najveće među njima ima vrijednost 1,32 kV/mm.



*Slika 7.9 – Utjecaj prilagodbe duljina obloga na aksijalna naprezanja sa zračne strane*

Prilagodba parametara tehnološkim tolerancijama narušava i raspodjelu aksijalnih polja sa zračne strane kako to prikazuje slika 7.9. U promatranom slučaju

sve su vrijednosti manje od maksimalno dozvoljenih 0,5 kV/mm, uz zadanu vrijednost aksijalnog polja sa zračne strane  $E_{azz}=0,44$  kV/mm.

Dakle, stvarne vrijednosti aksijalnih polja jednake su dozvoljenoj vrijednosti aksijalnih polja sa zračne i uljne strane samo u slučaju kada se duljine obloga i aksijalni razmaci ne prilagođuju tehnološkim tolerancijama. To u praksi nije slučaj pa konačna aksijalna i radijalna polja pri unosu zadanih vrijednosti nisu poznata, čime je proračun parametara obloga uvelike otežan. U pravilu, prilagodba parametara obloga potrebama proizvodnje ima veći utjecaj na aksijalna polja s uljne strane, jer su ti razmaci obično 2 do 3 puta kraći od zračnih. U svim daljnjim proračunima parametri obloga prilagođeni su tehnološkim tolerancijama.

#### **7.4 Optimiranje kondenzatorskog tijela 245 kilovoltnog provodnika**

Na primjeru izolacijskog sustava 245 kilovoltnog transformatorskog provodnika provest će se postupak određivanja optimalnih parametara kondenzatorskih obloga. Odabran je radijus centralnog vodiča je  $r_0$ , radijus zadnje obloge  $r_n$  određen je unutarnjim promjerom visokonaponskog izolatora, a maksimalna visina papirne  $l_{max}$  izolacije tehnološkim mogućnostima stroja za namatanje.

Zbog prilagodbe izračunatih parametara obloga tehnološkim tolerancijama dolazi do odstupanja električnih polja, prvenstveno aksijalnih, od zadanih vrijednosti. Ako su zadana aksijalna polja jednaka dozvoljenim vrijednostima, koja su definirana kao kriteriji za aksijalna naprezanja, može se dogoditi da stvarna polja, nakon prilagodbe parametara obloga tehnološkim tolerancijama, budu veća od dozvoljenih. Tada treba ponoviti proračun s nešto manjim vrijednostima zadanih aksijalnih polja.

Osim proračuna parametara obloga za različite kombinacije  $E_{rz}$  i  $n$ , zbog navedenih tehnoloških tolerancija, potrebno je provesti proračune i za različite vrijednosti  $E_{auz}$  i  $E_{azz}$ . U sljedećem primjeru računati su parametri obloga te raspodjele električnih polja i potencijala za ulazne podatke iz zadanih raspona vrijednosti.

Broj mogućih kombinacija ulaznih parametara je približno 1,3 milijuna i za svaku od njih napravljen je proračun raspodjele električnih polja i potencijala. Pohranjeni su sustavi čija su dielektrička naprezanja manja od dozvoljenih vrijednosti i koji zadovoljavaju s obzirom na ograničenja izbora duljina i radijusa obloga.

Po završetku proračuna, svega je 1670 sustava zadovoljavalo navedene uvjete, no i to je velik broj pa treba uspostaviti sustav njihova rangiranja. Svakom od pohranjenih sustava pridjeljuje se ocjena koja vrednuje kvalitetu promatranog, u usporedbi s ostalim sustavima. Ukupna ocjena sustava sastoji se od četiri ocjene koje uzimaju u obzir maksimalna aksijalna polja sa zračne i uljne strane, maksimalna polja na rubovima obloga i ukupan broj obloga. Svaka od tih ocjena vrednuje pojedini izolacijskog sustava s obzirom na minimalnu i maksimalnu vrijednost promatranog parametra unutar populacije sustava koji su zadovoljili. Ovdje treba razlikovati maksimalna polja u  $i$ -tom izolacijskom sustavu  $E_{i,max}$  od maksimalnog polja svih izolacijskih sustava:

$$E_{MAX} = \max E_{1,max}, E_{2,max}, \dots, E_{i,max}, \dots, E_{k,max} , \quad (7.30)$$

gdje je  $k$  broj svih sustava koji su zadovoljili s obzirom na dozvoljena dielektrička naprezanja i geometrijska ograničenja. Minimalna vrijednost pojedinog polja za sve izolacijske sustave koji su zadovoljili dana je sa

$$E_{MIN} = \min E_{1,max}, E_{2,max}, \dots, E_{i,max}, \dots, E_{k,max} . \quad (7.31)$$

Pojedine ocjene poprimaju vrijednosti između 1 i 10 pri čemu veća ocjena znači bolja svojstva. Npr. ako je najveće maksimalno polje na rubu obloge za sve sustave  $E_{o,MAX}=100$  kV/mm (ocjena 1), a najmanje  $E_{o,MIN}=80$  kV/mm (ocjena 10), tada će  $i$ -ti sustav čije je maksimalno polje na rubu obloge  $E_{oi,max}=90$  kV/mm dobiti ocjenu 5,5. Ocjene  $i$ -tog sustava za aksijalna polja s uljne i zračne strane te polja na rubovima obloga računaju se iz izraza:

$$OE_{aui} = \frac{1-10}{E_{au,MAX} - E_{au,MIN}} E_{aui,max} - E_{au,MIN} + 10, \quad (7.32)$$

$$OE_{azi} = \frac{1-10}{E_{az,MAX} - E_{az,MIN}} E_{azi,max} - E_{az,MIN} + 10, \quad (7.33)$$

$$OE_{oi} = \frac{1-10}{E_{o,MAX} - E_{o,MIN}} E_{oi,max} - E_{o,MIN} + 10. \quad (7.34)$$

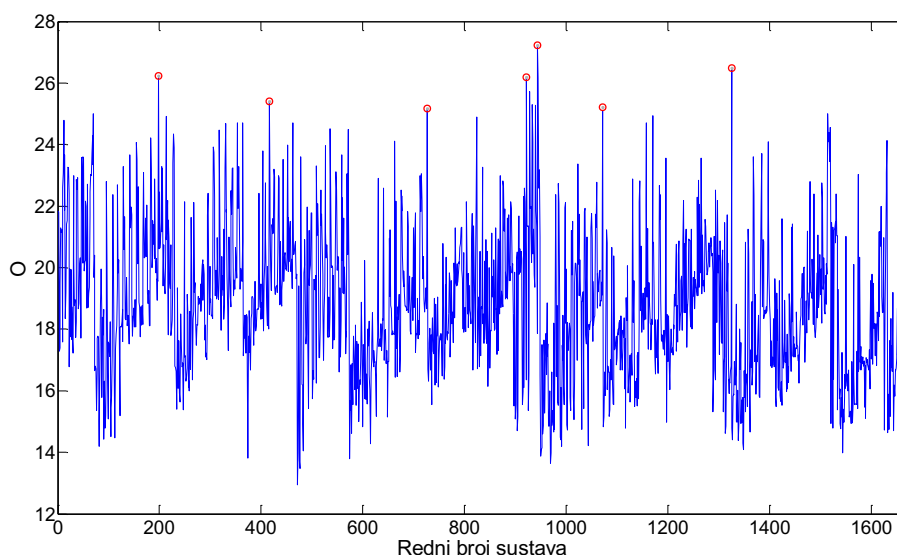
Sustave s manjim brojem obloga lakše je namatati pa najbolju ocjenu imaju sustavi s najmanjim brojem obloga:

$$On_i = \frac{1-10}{n_{max} - n_{min}} n_i - n_{min} + 10, \quad (7.35)$$

gdje su  $n_{\min}$  i  $n_{\max}$  najmanji i najveći broj obloga sustava koji su zadovoljili, a  $n_i$  je broj obloga promatranog sustava. Ukupna ocjena  $i$ -tog izolacijskog sustava  $O_i$  jednaka je sumi ocjena pojedinih parametara i određena je izrazom:

$$O_i = w_1 OE_{aui} + w_2 OE_{azi} + w_3 OE_{oi} + w_4 On_i, \quad (7.36)$$

gdje su s  $w_1$  do  $w_4$  označeni težinski faktori kojima je pridjeljena vrijednost 1, odnosno svi parametri koji formiraju ukupnu ocjenu su podjednako važni. U tom slučaju najveća moguća ocjena dobrote sustava je 40, a najmanja 4. Ocjene za pojedine sustave prikazuje slika 7.10. Najveća ocjena je 27,22, a crveno su označeni neki od sustava s ocjenama višim od 25 koji su detaljnije analizirani i za koje su ulazni i izlazni parametri dani u Tablici 7.1.

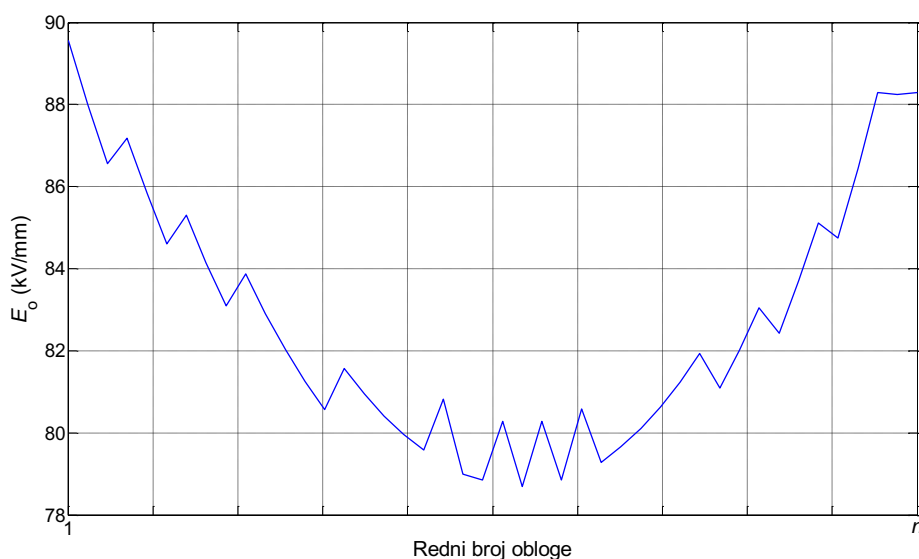


Slika 7.10 – Ocjene izolacijskih sustava koji su zadovoljili kriterije za dimenzioniranje izolacije

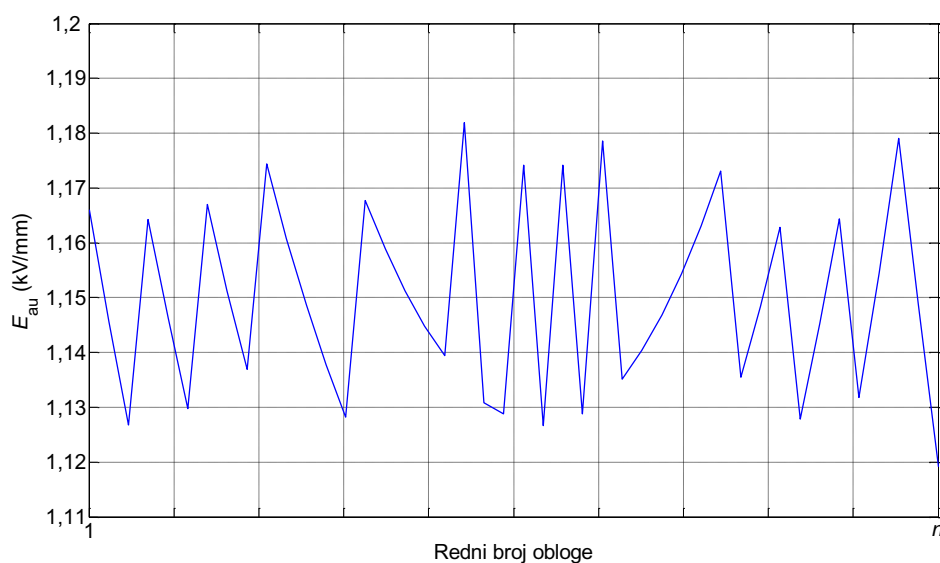
Tablica 7.1 –Ulazni i izlazni parametri proračuna za neke od sustava s ocjenama višim od 25

r.br. sustava	O	n	ulazni podatci			izračunate vrijednosti		
			$E_{rz,max}$ (kV/mm)	$E_{azz,max}$ (kV/mm)	$E_{auz,max}$ (kV/mm)	$E_{o,max}$ (kV/mm)	$E_{az,max}$ (kV/mm)	$E_{au,max}$ (kV/mm)
198	26,22	37	11,95	0,46	1,14	97,427	0,476	1,169
416	25,40	39	12,10	0,46	1,18	95,584	0,472	1,204
726	25,17	41	11,85	0,46	1,12	92,517	0,486	1,154
922	26,18	44	12,05	0,46	1,15	89,765	0,475	1,188
944	27,22	44	11,85	0,46	1,15	89,565	0,473	1,182
1072	25,10	45	11,85	0,46	1,12	88,302	0,486	1,166
1325	26,48	50	11,85	0,46	1,12	84,152	0,480	1,172

Može se primijetiti kako s porastom broja obloga opada maksimalno polje na rubu obloge  $E_{o,max}$ . Stvarna maksimalna aksijalna polja, zbog prilagođavanja parametara obloga tehnološkim tolerancijama, veća su od zadanih vrijednosti. Za daljnju analizu odabran je sustav s rednim brojem 944, koji ujedno ima i najvišu ocjenu. Raspodjelu polja na rubovima obloga i aksijalnih polja prikazuju slike 7.11, 7.12 i 7.13. U programskom paketu ElecNet numerički je proračunato električno polje i analizirana su naprezanja u ulju i vanjskoj izolaciji za koja je utvrđeno da su unutar dozvoljenih granica.

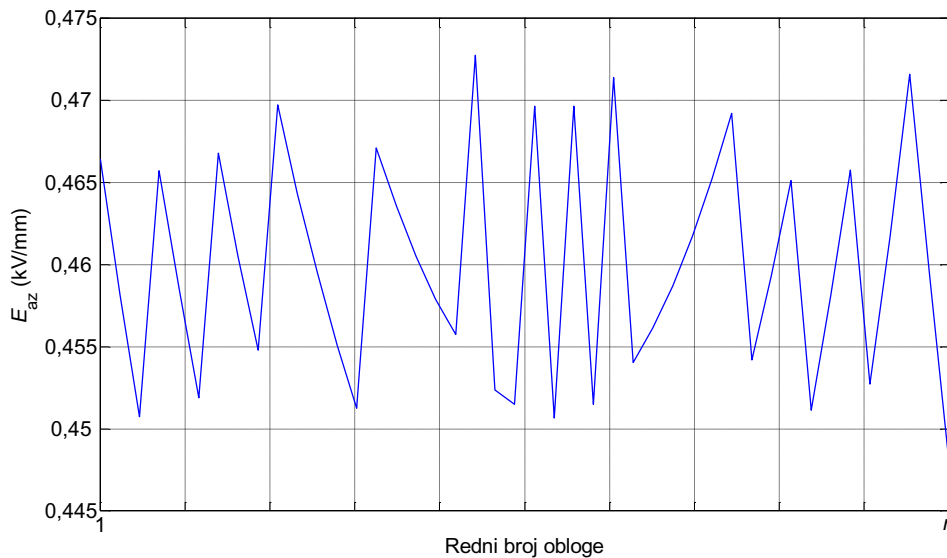


Slika 7.11 – Raspodjela polja na rubovima obloga za odabrani sustav



Slika 7.12 – Raspodjela aksijalnih polja s uljne strane za odabrani sustav



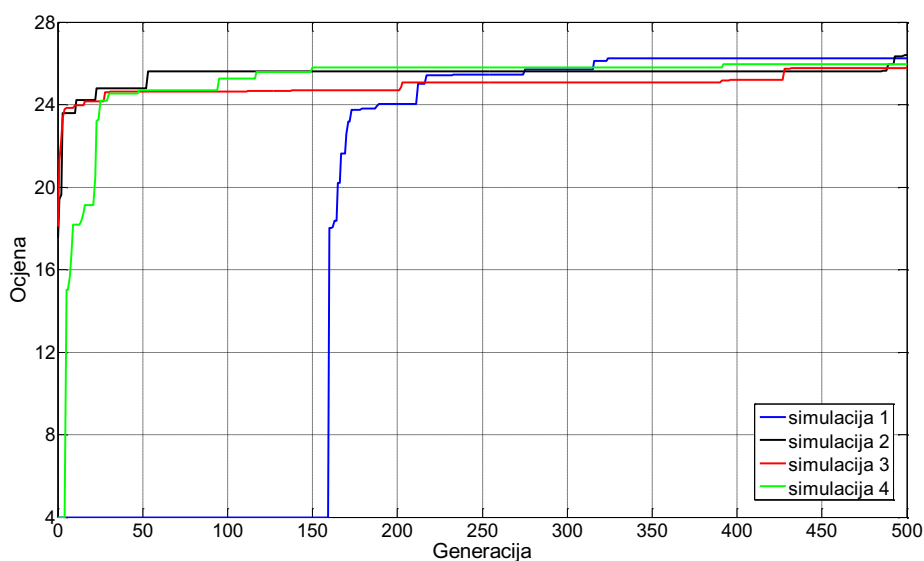


Slika 7.13 – Raspodjela aksijalnih polja sa zračne strane za odabrani sustav

## 7.5 Izbor ulaznih parametara genetskim algoritmom

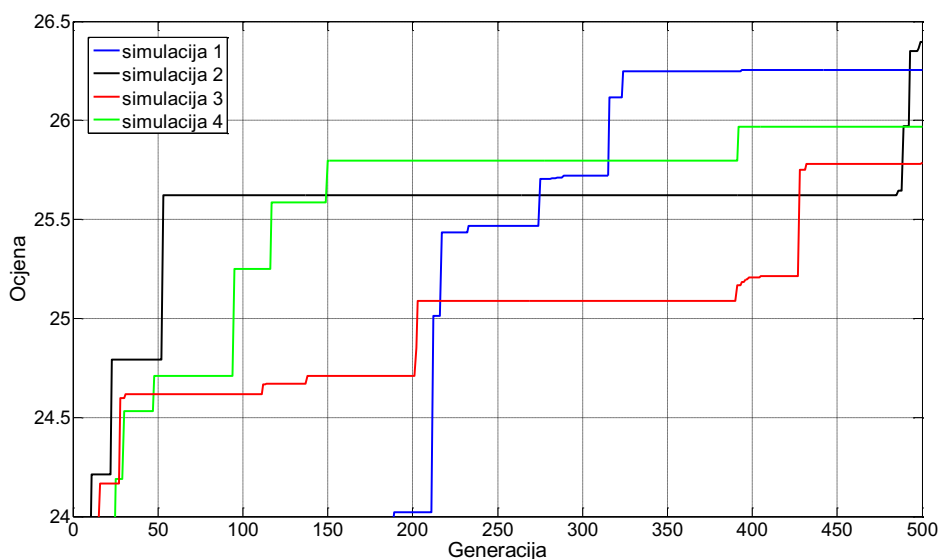
Genetski algoritam već je u prethodnom poglavlju primjenjen za određivanje optimalnih duljina obloga mjernih transformatora. Ovdje je korišten kako bi se odredila optimalna kombinacija ulaznih parametara. Za razliku od primjera iz prethodnog poglavlja, u kojem su zadani rasponi ulaznih parametara te koraci u kojima se oni biraju, genetski algoritam slučajno pretražuje prostor mogućih rješenja.

Kromosom čini kombinacija četiriju ulaznih parametara, tj. gena,  $n$ ,  $E_{rz}$ ,  $E_{azz}$  i  $E_{auz}$ . Početna populacija kromosoma stvara se slučajnim izborom gena iz zadanih intervala:  $n$  iz [10 100],  $E_{rz}$  iz [10 15],  $E_{azz}$  iz [0,35 0,50] i  $E_{auz}$  iz intervala [1,1 1,3]. U populaciji je 500 jedinki, broj jedinki koje se biraju po principu elitizma 10, a genetski se algoritam zaustavlja nakon 500 generacija. Ostale postavke genetskog algoritma identične su onima iz prethodnog poglavlja. Za funkciju dobrote odabrana je ocjena sustava definirana izrazom (7.36). Iako genetski algoritam slučajno pretražuje prostor mogućih rješenja, može ga se usmjeriti kako bi brže obavio svoju zadaću. Usmjeravanje je provedeno ograničavanjem izbora ulaznih parametara pa tako broj obloga mora biti cijeli broj iz zadanog intervala [10 100], što odgovara intervalu iz kojeg se stvara početna populacija.



Slika 7.14 – Ocjene dobrote izolacijskih sustava

Najveće dozvoljeno aksijalno polje u ulju ne smije biti veće od 1,3 kV/mm, a u zraku od 0,5 kV/mm. Sve vrijednosti zadanih dozvoljenih polja moraju biti veće od nule. Naravno, genetski algoritam bira i ulazne parametre koji nisu iz definiranih intervala, ali tada se ne provodi proračun parametara obloga, potencijala i električnih polja, nego se takvom sustavu odmah daje loša ocjena. Provedene su četiri simulacije, a ocjene najboljih sustava u pojedinoj generaciji prikazuju slike 7.14 i 7.15.



Slika 7.15 – Ocjene dobrote izolacijskih sustava, uvećan prikaz po osi ordinata

U drugoj simulaciji pronađen je sustav čija ocjena u 500. generaciji ima vrijednost 26,39. Ovo je ujedno i najbolja ocjena dobivena korištenjem genetskog algoritma. Zanimljivi su rezultati prve simulacije gdje je tek u 160. generaciji pronađen sustav koji ima ocjenu veću od minimalne. Trendovi rasta ocjene u posljednjim generacijama najizraženiji su u drugoj simulaciji, što ukazuje kako bi se uz veći broj generacija i veću populaciju, mogli postići još bolji rezultati. U Tablici 7.2 dani su ulazni i izlazni parametri za najbolje sustave dobivene za sve četiri simulacije.

*Tablica 7.2 – Ulazni i izlazni parametri proračuna za sustave dobivene primjenom genetskog algoritma*

r.br. simulacije	O	n	ulazni podatci			izračunate vrijednosti		
			$E_{rz}$ (kV/mm)	$E_{azz}$ (kV/mm)	$E_{auz}$ (kV/mm)	$E_{o,max}$ (kV/mm)	$E_{az,max}$ (kV/mm)	$E_{au,max}$ (kV/mm)
1	26,26	40	11,824	0,463	1,144	93,389	0,491	1,177
2	26,39	40	11,815	0,464	1,149	93,340	0,478	1,173
3	25,79	39	11,872	0,463	1,177	94,684	0,472	1,202
4	25,97	37	11,824	0,463	1,144	97,416	0,482	1,224

Genetskim algoritmom pronađeni su sustavi s dobrim ocjenama koji bi se, uz zadovoljavajuće rezultate numeričkog proračuna jakosti polja, mogli praktično primijeniti. Ovime je pokazana opravdanost korištenja i potreba za daljnjim upotrebom genetskog algoritma, ali i ostalih evolucijskih metoda, u problemima optimiranja izolacijskih sustava.

## **7.6 Eksperimentalna provjera rezultata optimiranja**

Prema rezultatima optimiranja iz poglavlja 7.4, najvišu ocjenu dobio je sustav s rednim brojem 944 i prema njemu je u Končar – Energetskim transformatorima napravljen prototip 245 kilovoltnog provodnika. Slika 7.16 prikazuje proces namatanja kondenzatorskog tijela.

Prototip provodnika ispitan je u skladu sa zahtjevima međunarodne norme [3] u visokonaponskom laboratoriju Končar – Instituta za elektrotehniku gdje su provedena sljedeća ispitivanja:

- a) Mjerenje kapaciteta i kuta dielektričkih gubitaka  $\tan\delta$
- b) Ispitivanje atmosferskim udarnim naponom (+1050 kV, -1155 kV) i odrežanim naponom (-1271 kV)
- c) Ispitivanje sklopnim udarnim naponom (+750 kV, -825 kV)
- d) Dugotrajno ispitivanje izmjeničnim naponom uz mjerenje parcijalnih izbijanja

- e) Ispitivanje podnosivim naponom industrijske frekvencije na umjetnoj kiši, 460 kV
- f) Mjerenje parcijalnih izbijanja
- g) Ponovljeno mjerenje kapaciteta i kuta dielektričkih gubitaka  $\tan \delta$



*Slika 7.16 – Namatanje kondenzatorskog tijela 245 kilovoltnog provodnika*

Slike 7.17 i 7.18 prikazuju provodnik za vrijeme dielektričkih ispitivanja. Prototip 245 kilovoltnog provodnika uspješno je izdržao sva navedena ispitivanja.



*Slika 7.17 – Ispitivanje 245 kilovoltnog provodnika udarnim naponima*



*Slika 7.18 – Ispitivanje 245 kilovoltnog provodnika izmjeničnim naponom*

## 8. Zaključak

Uljno - papirni izolacijski sustavi kondenzatorskog tipa su, zbog izuzetnih svojstava, u upotrebi dugi niz godina i imaju široku primjenu u visokonaponskim uređajima. Odlikuju se velikom dielektričkom čvrstoćom i malim gubitcima. Unutar papirne izolacije umeću se kondenzatorske obloge koje čine sustav cilindričnih kondenzatora, a zadatak im je ujednačiti dielektrička naprezanja. Geometrijski parametri obloga, tj. njihova duljina, aksijalni razmaci među njima i radijus na koji se umeću, određuju vrijednosti dozemnih i kapaciteta među oblogama pa time direktno utječu na raspodjele potencijala i električnih polja.

Prema tradicionalnom pristupu dimenzioniranju izolacije, pažnja se posvećuje ujednačenju aksijalnih i radijalnih naprezanja, ne uzimajući u obzir polja na rubovima kondenzatorskih obloga. Upravo su rubovi obloga mjesta na kojima se javljaju lokalno jaka električna polja koja mogu dovesti do pojave parcijalnih izbijanja, ubrzanog starenja i u krajnjoj liniji proboja izolacijskih sustava. Kriteriji za naprezanja na rubovima obloga dobiveni su spregom eksperimentalnih istraživanja na modelima izolacijskih sustava mjernih transformatora i provodnika kondenzatorskog tipa te rezultata numeričkog proračuna električnog polja. Eksperimentalni rezultati, nakon obrade primjenom Weibullove razdiobe, daju informaciju kolika je vjerojatnost pojave parcijalnih izbijanja za određeni napon i vrijeme trajanja njegove primjene. Rezultat numeričkog proračuna električnog polja je jakost polja na rubu obloge za zadani napon, a time je dovedena u vezu vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja s jakosti električnog polja. Jakost polja na rubu obloge pri kojoj je vjerojatnost nastanka parcijalnih izbijanja 1 % uz trajanje primjenjenog napona u vremenu od jedne minute, novi je kriterij korišten za dimenzioniranje izolacije, umjesto starog koji uzima u obzir dozvoljena radijalna naprezanja. U budućnosti bi se ovaj kriterij mogao poboljšati tako da se umjesto vrijednosti polja na rubu obloge uzme u obzir obujam izolacije koji je izložen određenim naprezanjima ili da se analiziraju naprezanja duž silnica u blizini ruba obloge.

Proračun električnog polja na rubu obloge odvija se u dva koraka zbog nepovoljnog omjera najveće i najmanje izmjere u računskom modelu te nemogućnosti postizanja kvalitetne mreže konačnih elemenata. Najprije se izračuna električno polje za cijeli model s dovoljno fino odabranom mrežom kako bi se što točnije proračunao potencijal u blizini ruba obloge, a zatim se određuju granice

novog modela i pripadajuća mreža konačnih elemenata za proračun polja na rubu obloge. Ovaj postupak je zahtjevan i nepraktičan uzme li se u obzir da visokonaponski mjerni transformatori i provodnici imaju od nekoliko do više desetaka takvih obloga. Zato je određena funkcijska ovisnost polja na rubu o geometrijskim parametrima obloga i primjenjenom naponu.

Detaljno su istraženi utjecaji promjene geometrijskih parametara obloga mjernih transformatora na raspodjele električnog polja i potencijala. Pokazalo se kako koncentriranje obloga prema zadnjoj oblozi u sustavu, tj. smanjivanje debljine izolacije među oblogama s porastom njihova rednog broja, povoljno djeluje na aksijalna i naprezanja na rubovima obloga, a nepovoljno na radialna naprezanja. Izvedeni su izrazi za izračun optimalnih radijusa obloga koji osiguravaju idealnu raspodjelu napona. Povećanje broja obloga, uz optimalne radijuse, povoljno djeluje na raspodjelu polja na rubovima obloga. Povećanjem duljina svih obloga smanjuju se i ujednačuju dielektrička naprezanja.

Pri izradi programa za optimiranje parametara obloga mjernih transformatora, uzeti su u obzir navedeni utjecaji pojedinih parametara obloga na raspodjele električnog polja i potencijala. Program je podijeljen na dva potprograma, prvi određuje optimalan broj i radijuse obloga uz jednake duljine svih obloga, dok drugi po potrebi optimira duljine obloga. Algoritam je primjenjen pri optimiranju parametara obloga inverznog strujnog transformatora za  $U_m=123$  kV. Novi izolacijski sustav ima nešto manje obloga od postojećeg, debljina izolacije smanjena je za 12,3 %, a masa cijelog transformatora za 11,1 %. Novi strujni transformator uspješno je izdržao tipska i rutinska ispitivanja u skladu sa zahtjevima relevantne međunarodne norme.

Istražena je mogućnost primjene genetskog algoritma za optimiranje duljina obloga mjernih transformatora. Napravljena je usporedba rezultata dobivenih genetskim algoritmom i potprogramom za optimiranje duljina obloga. Jakosti polja su podjednake za oba slučaja, što pokazuje kako bi se u budućnosti genetski algoritam mogao primijeniti na zadaćama optimiranja složenih izolacijskih sustava s više glavnih obloga.

Ulazni podatci za proračun parametara obloga transformatorskih provodnika navedeni su u poglavlju 7.1. Aksijalni razmaci među oblogama s uljne i zračne strane računaju se iz dozvoljenih aksijalnih naprezanja, broja obloga i primjenjenog napona. Zatim se, uz zadana dozvoljena radialna naprezanja, rješava jednadžba u

kojoj je nepoznanica omjer duljina zadnje i prve obloge, a nakon toga se računaju duljine i radijusi obloga.

Zbog prilagodbe izračunatih parametara obloga tehnološkim tolerancijama dolazi do odstupanja električnih polja, prvenstveno aksijalnih, od zadanih vrijednosti i može se dogoditi da vrijednosti polja budu veće od dozvoljenih. Zbog toga je, osim proračuna parametara obloga za različite kombinacije dozvoljenog radijalnog polja i broja obloga, potrebno provesti proračune i za različite vrijednosti dozvoljenih aksijalnih polja. Kako bi se optimirala geometrija obloga potrebno je provesti velik broj proračuna za različite kombinacije ulaznih podataka.

Ulazne podatke za proračun parametara obloga provodnika može se izabrati primjenom genetskog algoritma. Kromosom se tada sastoji od četiri gena koji predstavljaju ulazne podatke: zadana aksijalna polja s uljne i zračne strane, zadano radijalno polje i broj obloga. Genetskim algoritmom pronađeni su sustavi s dobrim karakteristikama koji bi se, uz zadovoljavajuće rezultate numeričkog proračuna jakosti polja, mogli praktično primijeniti. Dobiveni rezultati ukazuju kako bi u budućim istraživanjima trebalo sve više upotrebljavati genetski algoritam ili slične evolucijske metode optimiranja.

Prema rezultatima optimiranja iz poglavlja 7.4 napravljen je prototip transformatorskog provodnika za  $U_m=245$  kV. Novi provodnik uspješno je izdržao tipska dielektrička ispitivanja u skladu sa zahtjevima relevantne međunarodne norme.



## Literatura

- [1] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, Newnes, Oxford, 2000, pp. 201-394
- [2] V. Bego, *Mjerni transformatori*, Školska knjiga, Zagreb, 1977
- [3] International Electrotechnical Commission, *IEC 60137 : Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V*, July 2008
- [4] A. Mikulecky, *Dijagnostika kondenzatorskih provodnika transformatora*, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2003
- [5] International Electrotechnical Commission, *IEC 60137 : Instrument Transformers – Part 1: General requirements*, December 2007
- [6] M. Poljak, *Mjerni transformatori*, skripta, Zagreb, 1995
- [7] I. Uglešić, *Tehnika visokog napona*, skripta, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2003
- [8] M. Poljak, D. Filipović-Grčić, *Optimiranje izolacijskog sustava mjernih transformatora*, HO CIGRE, 7 savjetovanje, Cavtat 2005.
- [9] Z. Fang, J. Jicun, Z. Ziyu, *Optimal Design of HV Transformer Bushing*, Proceedings of the 3rd International Conference on properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, 1991., pp 434-437
- [10] J.V. Champion, S.J. Dodd, *Inter-Foil Electrical Breakdown in High Voltage ERIP Condenser Bushing*, WG 12.03 of the Study Committee 12 of the International CIGRE, Electra (France), no. 67, pp. 17-28, December 1979
- [11] M. Poljak, D. Filipović-Grčić, *Istraživanje naponskih napreznja na modelima izolacije mjernih transformatora*, elaborat, Končar – Institut za elektrotehniku, 2006
- [12] D. Filipović-Grčić, *Istraživanje naponskih napreznja na modelima izolacije provodnih izolatora*, elaborat, Končar – Institut za elektrotehniku, 2007
- [13] J.A. Güemes, M. Postigo, A. Ibero, *Influence of Leader Shields in the Electric Field Distributon in Current Transformers*, 10th Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON 2000., Vol. III, Nicosia, Cyprus, 2000., pp. 958-961
- [14] J.A. Güemes, M. Postigo, F.E. Hernando, *Influence of Leader Shields in the Electric Field Distributon in Bushings*, Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Vol. I, Rome, Italy, 2000, pp. 698-703
- [15] E. Lesniewska, *The Use of 3-D Electric Field Analysis and the Analytical Approach for Improvement of a Combined Instrument Tranformer Insulation System*, IEEE Transaction on Magnetics, vol.38, no.2, March 2002
- [16] E. Lesniewska, *New Approach of Applying Capacitance Control in the Main Insulation of HV Instrument Transformers*, International symposium on electromagnetic fields in mechatronics, electrical and electronic engineering ISEF 2005, Baiona, Spain, September 2005
- [17] M. Poljak, D. Filipović-Grčić, *Dielectric Stresses Determination in Active Part of the Combined Transformer*, The 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON, Málaga, Spain, May 2006

- [18] D. Filipović-Grčić, M. Poljak, Ž. Štih, *Optimization of Combined Transformer Active Part*, The 16th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields COMPUMAG 2007, Aachen, Germany, June 2007
- [19] D. Filipović-Grčić, M. Poljak, Ž. Štih, *Optimization of the Paper-Oil Insulation of High Voltage Inverse Current Transformer Using Genetic Algorithm*, International symposium on electromagnetic fields in mechatronics, electrical and electronic engineering ISEF 2007, Prague, Czech Republic, September 2007
- [20] M. Poljak, *Izolacijski sustav kombiniranih mjernih transformatora*, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2006
- [21] S. Yakov, *Volt-Time Relationships for PD Inceptions in Oil-Paper Insulation*, WG 12.03 of the Study Committee 12 of the International CIGRE, Electra (France), no. 67, pp. 17-28, December 1979
- [22] Accelerated Life Testing Reference, [www.weibull.com](http://www.weibull.com) March, 2010
- [23] J D Edwards, *An Introduction to ElecNet for Static 2D Modeling*, Infolytica Corporation 2007
- [24] *MagNet/ElecNet/ThermNet/FullWave Scripting Manual*, Infolytica Corporation 2004
- [25] On-Line Customer Support Center, [www.infolytica.com/en/support/](http://www.infolytica.com/en/support/), March, 2010
- [26] V. Shrikrishna et al., *Transformer engineering: design and practice*, Dekker, April, 2007, Chapter 8
- [27] M. S. Naidu, V. Kamaraju, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, McGraw-Hill, 1999, pp. 12-47
- [28] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, CRC Taylor & Francis Group, 1999, Chapters 1 and 13
- [29] T. Shindo, T. Suzuki, *A New Calculation Method of Breakdown Voltage-Time Characteristic of Long Air Gaps*, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 6, June 1985
- [30] F. A. M. Rizk, *A Model for Switching Impulse Leader Inception and Breakdown of Long Air-Gaps*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989
- [31] F. A. M. Rizk, *Switching Impulse Strength of Air Insulation: Leader Inception Criterion*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, October 1989
- [32] J. H. Mathews, K. D. Fink, *Numerical Methods Using Matlab – Third Edition*, Prentice Hall, 1999, pp. 458-474
- [33] International Electrotechnical Commission, *IEC 60060-1 : High-Voltage Test Techniques – Part 1: General definitions and test requirements*, November 1989
- [34] V. Dahinden, K. Schultz, A. Küchler, *Function of Solid Insulation in Transformers*, Forum der Technik, München, 1998, pp. 41-54
- [35] F. Derler et al., *Development of a Design Method for Insulating Structures Exposed to Electric Stress in Long Oil Gaps and Along Oil Transformerboard Interfaces*, 9th CEPSI Conference on Electric Power Supply Industry, Hong Kong, 1992

- [36] A. Mikulecky, 'Predavanja', Specijalistički studij transformatori, FER
- [37] K. Kato, X. Han, H. Okubo, *Insulation Optimization by Electrode Contour Modification Based on Breakdown Area/Volume Effects*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 2, April 2001, pp. 162-167
- [38] Z. Guoqiang, Z. Yunalu, C. Xiang, *Optimal Design of High Voltage Bushing Electrode in Transformer With Evolution Strategy*, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 35, No. 3, May 1999
- [39] S. Monga et al., *Design Optimization of High Voltage Bushing Using Electric Field Computations*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, No. 6, December 2006, pp. 1217-1224
- [40] A. Mikulecky, *Upute za dimenzioniranje uljnobarjerne izolacije*, Elaborat, Končar - Institut za elektrotehniku, d.d., Biblioteka autorskih radova, rad br. A 21510-36, 1998
- [41] Ž. Štih, *High Voltage Insulating System Design by Application of Electrode and Insulator Contour Optimization*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol EI-24, No. 4. August 1986, pp 579-578
- [42] M. Abdel – Salam, A. Mufti, *Optimizing Field Stress on High Voltage Bushings*, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA, June 1994
- [43] Eva Mårtensson, *Modelling Electrical Properties of Composite Materials*, PhD thesis, Kungl Tekniska Högskolan, Department of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2003, pp 13-16
- [44] J.P. Rivenc, T. Lebey, *An Overview of Electrical Properties for Stress Grading Optimization*, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 3, June 1999, pp. 309-318
- [45] H.J. Wei, S. Jayaram, E. Chereny, *A Study of Electrical Stress Grading of Composite bushings by Means of a Resistive Silicone Rubber Coating*, Journal of electrostatics, Vol. 63, No. 3-4, June 1999, pp. 273-283
- [46] L. Donzel, M. Hagemeister, *Nonlinear field control of high voltage bushings*, 15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007
- [47] F. Zaoui, C. Marchand, *Using Genetic Algorithm for the Optimization of Electromagnetic Devices*, COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 63, No. 3-4, June 1999, pp. 181-185
- [48] B. Baodong et al, *Optimal Transposition Design of Transformer Windings by Genetic Algorithms*, IEEE Transaction on Magnetics, vol.31, no.6, November 1995
- [49] F. Wurtz et al, *A Few Results for Using Genetic Algorithms in the Desing of Electrical Machines*, IEEE Transaction on Magnetics, vol.33, no.2, March 1997
- [50] C. Xudong et al, *An Improved Genetic Algorithm for Global Optimization of Electromagnetic Problems*, IEEE Transaction on Magnetics, vol.37, no.5, September 2001
- [51] M. Golub, *Genetski algoritam*, verzija 2.3, skripta, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2004

- [52] R. L. Haupt, S. E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, Second Edition, John Wiley & Sons, 2004
- [53] *Design of high-voltage stress-controlled condenser-type bushings and capacitors*, Technical report reference Q/T123a, The British Electrical and Allied Industries Research Association, 1953

## **Sažetak**

U radu su analizirane mogućnosti optimiranja izolacije kondenzatorskog tipa od uljem impregniranog papira. Pokazalo se kako su kritična mjesta unutar uljno-papirne izolacije rubovi kondenzatorskih obloga na kojima se javljaju jaka lokalna električna polja. Jakost polja na rubu je novi kriterij korišten za dimenzioniranje izolacije umjesto starog koji uzima u obzir dozvoljena radijalna naprezanja. Novi kriterij temelji se na rezultatima numeričkih proračuna električnog polja i mjerenja parcijalnih izbivanja na modelima uljno-papirne izolacije. Određena je funkcijska ovisnost polja na rubu obloge o geometrijskim parametrima i primjenjenom naponu.

Detaljno su istraženi utjecaji promjene geometrijskih parametara obloga mjernih transformatora na raspodjele električnog polja i potencijala. Izvedeni su izrazi za izračun optimalnih radijusa obloga koji osiguravaju idealnu raspodjelu napona. Razvijen je program koji optimira parametre obloga mjernih transformatora. Istražena je mogućnost primjene genetskog algoritma na optimiranje duljina obloga mjernih transformatora te na izbor ulaznih podataka proračuna parametara obloga provodnika.

Uspješno su provedene eksperimentalne verifikacije dimenzioniranja izolacijskih sustava kondenzatorskog tipa.

## ***Summary***

### **OPTIMIZATION OF CONDENSER TYPE INSULATION SYSTEM MADE OF OIL IMPREGNATED PAPER**

The possibilities for optimization of the condenser type insulation system made of oil impregnated paper were analyzed. It has been shown that the critical locations within oil-paper insulation are capacitive shield edges, due to high local electric fields. Field strength at the edge of the shield is a new criterion used for insulation design instead of taking into account the permissible radial stresses. The new criterion is based on the results of numerical calculation of electric field and partial discharge measurements on oil-paper insulation models. Analytical expression for field at the edge of the shield, as function of geometrical parameters and the applied voltage, was derived.

Influences of geometric parameters of capacitive shields on voltage and electric field distributions were closely investigated. The expressions for calculation of the optimal radius of shields, that provide an ideal voltage distribution, were derived. The program that optimizes the parameters of instrument transformers capacitive shields was developed. The possibilities of genetic algorithm application in optimization tasks, such as determination of optimal shield lengths and selection of input data for calculation of bushing shields parameters, were investigated.

The experimental verifications of condenser type insulation systems design were successfully performed.

## ***Ključne riječi - Keywords***

uljno-papirna izolacija

optimizacija

kondenzatorsko tijelo

obloge

mjerni transformator

provodnik

parcijalna izbijanja

numerički proračun

dielektrička naprezanja

genetski algoritam

oil-paper insulation

optimization

condenser body

shields

instrument transformer

bushing

partial discharges

numerical calculation

dielectric stresses

genetic algorithm

## ***Životopis***

Dalibor Filipović-Grčić je rođen u Sinju 1980. godine, gdje je završio osnovnu školu i opću gimnaziju. Diplomirao je 2004. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Od 2004. godine zaposlen je u Končar – Institutu za elektrotehniku u Zavodu za transformatore kao istraživač, gdje se bavi visokonaponskim ispitivanjima te razvojem mjernih transformatora. Znanstveni novak postaje 2007. godine na projektu „Numerički proračun elektromagnetskih polja transformatora“. Trenutno obnaša dužnost rukovoditelja Visokonaponskog laboratorija.

Autor je pet znanstvenih članka na međunarodnim skupovima te jednog članka na savjetovanju nacionalnog ogranka Cigre. Autor je ili koautor dvadesetak stručnih izvještaja i elaborata iz područja izolacijskih sustava mjernih i energetske transformatora te transformatorskih provodnika.

Član je tehničkih odbora HZN/TO E 38 Mjerni transformatori i HZN/TO E 42 Visokonaponska ispitivanja.



## ***Curriculum Vitae***

Dalibor Filipović-Grčić was born in Sinj in 1980. He finished his elementary school and gymnasium in Sinj. He graduated in 2004. at the Faculty of Electrical Engineering and Computing in Zagreb. Since 2004. he has been working in Končar – Electrical Engineering Institute, Transformer department, on high-voltage tests and development of instrument transformers. From 2007. he is a scientific novice on the project „Numerical calculation of transformer electromagnetic fields“. At present he is the head of High-Voltage Laboratory.

He is the author of five scientific papers on international conferences and one on the national Cigre symposium. He authored or co-authored about twenty reports and studies which deal with insulation systems of instrument and power transformers and transformer bushings.

He is a member of technical committees HZN/TO E 38 Instrument Transformers and HZN/TO E 42 High voltage test techniques.

## Popis oznaka

- $a$ ..... aksijalni razmak među oblogama sa zračne strane  
 $a$ ..... stalnica Weibullove distribucije (3. poglavlje)  
 $A$ ..... stalnica Weibullove distribucije (3. poglavlje)  
 $c$ ..... aksijalni razmak među oblogama s uljne strane  
 $C$ ..... parametar volt-sekundnih krivulja  
 $C_1$ ..... glavni kapacitet provodnika  
 $C_2$ ..... kapacitet između mjernog priključka i prirubnice  
 $C_{i-1,i}$ ..... kapacitet između susjednih obloga  
 $C_{i,0}$ ..... dozemni kapacitet  $i$ -te obloge  
 $\mathbf{C}_M$ ..... matrica kapaciteta među oblogama  
 $\mathbf{C}_Z$ ..... vektor dozemnih kapaciteta obloga  
 $d$ ..... debljina izolacije među oblogama  
 $d_0$ ..... debljina obloge  
 $d_{p,min}$ ..... minimalna dozvoljena debljina papirne izolacije između susjednih obloga  
 $d_u$ ..... širina uljnog kanala  
 $E_0$ ..... srednji gradijent napona potreban za nastanak *leadera*  
 $E_a$ ..... jakost polja u aksijalnom smjeru  
 $E_{a,max}$ ..... maksimalna jakost polja u aksijalnom smjeru  
 $E_{au}$ ..... jakost polja u aksijalnom smjeru s uljne strane  
 $E_{au,max}$ ..... maksimalna jakost polja u aksijalnom smjeru s uljne strane  
 $E_{auz}$ ..... zadana jakost polja u aksijalnom smjeru s uljne strane  
 $E_{az}$ ..... jakost polja u aksijalnom smjeru sa zračne strane  
 $E_{az,max}$ ..... maksimalna jakost polja u aksijalnom smjeru sa zračne strane  
 $E_{azz}$ ..... zadana jakost polja u aksijalnom smjeru sa zračne strane  
 $E_o$ ..... jakost polja na rubu obloge  
 $E_{o,max}$ ..... maksimalna jakost polja na rubu obloge  
 $E_r$ ..... jakost polja u radijalnom smjeru  
 $E_{r,max}$ ..... maksimalna jakost polja u radijalnom smjeru  
 $E_{rz}$ ..... zadana jakost polja u radijalnom smjeru  
 $E_t$ ..... jakost tangencijalnog polja na granici papira i ulja  
 $E_{t,max}$ ..... maksimalna jakost tangencijalnog polja na granici papira i ulja  
 $E_{pd}$ ..... dozvoljena jakost polja u uljnom kanalu

$E_{sr}$ .....	srednje polje u uljnom kanalu
$h_i$ .....	udaljenost ruba $i$ -te obloge od ruba uzemljene cijevi
$h_{max}$ .....	maksimalna dozvoljena visina od ruba uzemljene cijevi do koje se mogu umetati obloge
$h_{n,min}$ .....	minimalni dozvoljeni aksijalni razmak između ruba uzemljene cijevi i zadnje obloge
$h_{n,max}$ .....	maksimalni dozvoljeni aksijalni razmak između ruba uzemljene cijevi i zadnje obloge
$i, j$ .....	brojila
$k$ .....	stalnica u jednadžbi koja opisuje nastanak <i>leadera</i> , ovisi o razmaku i obliku elektroda
$K_1$ .....	parametar u analitičkom izrazu za jakost električnog polja na rubu obloge
$K_2$ .....	parametar u analitičkom izrazu za jakost električnog polja na rubu obloge
$l_{i-1,i}$ .....	duljina preklopa između susjednih obloga
$l_i$ .....	duljina $i$ -te obloge
$l_{i,max}$ .....	maksimalna dozvoljena duljina $i$ -te obloge
$l_{min}$ .....	minimalna dozvoljena duljina obloge
$l_p$ .....	duljina preklopa među oblogama
$l_{pi}$ .....	duljina papirne izolacije
$l_s$ .....	okomiti razmak od gornjeg ruba zadnje obloge do glave provodnika, odnosno okomiti razmak od donjeg ruba zadnje obloge do donje prirubnice mjernog transformatora
$l_{zi}$ .....	duljina $i$ -te obloge kojom je definiran dozemni kapacitet
$n$ .....	broj obloga
$n$ .....	broj jedinki u generaciji genetskog algoritma (poglavlje 6.3)
$n_e$ .....	broj jedinki selektiranih prema kriteriju elitizma
$N_j$ .....	broj nastanaka parcijalnih izbivanja na određenoj naponskoj razini
$N$ .....	ukupan broj mjerenja parcijalnih izbivanja na određenoj naponskoj razini
$OE_{oj}$ .....	ocjena sustava s obzirom na polja na rubovima obloga
$OE_{au}$ .....	ocjena sustava s obzirom na aksijalno polje s uljne strane
$OE_{azi}$ .....	ocjena sustava s obzirom na aksijalno polje sa zračne strane
$On_i$ .....	ocjena sustava s obzirom na broj obloga
$P$ .....	vjerojatnost nastanka parcijalnih izbivanja

$r_0$ .....	radijus cijevi na koju se namata izolacija
$r_i$ .....	radijus na koji se umeće $i$ -ta obloga
$u_{\%}$ .....	postotno odstupanje pada napona među susjednim oblogama od linearne raspodjele potencijala
$U$ .....	napon
$U_{50\%}$ .....	pedeset postotni preskočni napon
$U_{10\%}$ .....	deset postotni preskočni napon
$U_m$ .....	najviši napon za opremu
$t$ .....	vrijeme
$t_R$ .....	referentno vrijeme na volt-sekundnim krivuljama
$\tan\delta$ .....	faktor dielektričkih gubitaka
$v$ .....	brzina širenja <i>leadera</i>
$w$ .....	težinski faktor
$x$ .....	duljina nepremoštenog dijela zračnog rasporeda (poglavlje 4.1)
$x$ .....	duljina duž koje se računa srednje polje u uljnom kanalu (poglavlje 4.2)
$Y$ .....	matrica admitancija
$\alpha_p$ .....	parametar koji koncentrira obloge mjernih transformatora u radijalnom smjeru prema uzemljenoj cijevi
$\alpha_k$ .....	parametar koji koncentrira obloge mjernih transformatora u radijalnom smjeru prema zadnjoj oblozi
$\beta$ .....	stalnica Weibullove distribucije
$\gamma$ .....	stalnica volt-sekundnih krivulja
$\Delta l$ .....	korak promjene duljina obloga pri optimiranju
$\epsilon_0$ .....	apsolutna dielektričnost
$\epsilon_r$ .....	relativna dielektričnost
$\Phi$ .....	vektor potencijala čvorova
$\sigma$ .....	faktor sigurnosti
$\sigma_{\min}$ .....	minimalni faktor sigurnosti