

Izvještaj laboratorijskih vježbi

-Tehnologija visokonaponske izolacije-

Ime i prezime: Haris Čapelj
Indeks broj: 16985
Grupa: I
Odsjek: EE

Potpis studenta:



Sadržaj

Laboratorijska vježba 1	4
Zadatak 1	4
Opis vježbe	4
Crtanje modela	4
Granični uslovi	4
Osobine materijala.....	4
Analiza rezultata.....	4
Zaključak	6
Zadatak 2	6
Opis vježbe	6
Crtanje modela	6
Granični uslovi	6
Osobine materijala.....	7
Analiza rezultata.....	7
Zaključak	8
Zadatak 3	9
Opis vježbe	9
Crtanje modela	9
Granični uslovi	9
Osobine materijala.....	10
Analiza rezultata.....	10
Zaključak	11
Laboratorijska vježba 2	12
Zadatak 1	12
Opis vježbe	12
Granični uslovi	12
Analiza rezultata.....	12
Poređenje sa analitičkim proračunom	15
Zaključak	15
Zadatak 2	16
Opis vježbe	16
Granični uslovi	16
Analiza rezultata.....	16
Zaključak	18
Laboratorijska vježba 3	19



Zadatak 1	19
Opis vježbe	19
Svrha gradiranja izolacije kabla	19
Analiza rezultata	19
Poređenje sa analitičkim proračunom	20
Zaključak	21
Zadatak 2	21
Opis vježbe	21
Svrha gradiranja izolacije kabla	21
Analiza rezultata	21
Poređenje sa analitičkim proračunom	22
Zaključak	23
Zadatak 3	23
Opis vježbe	23
Svrha gradiranja izolacije kabla	23
Analiza rezultata	24
Poređenje sa analitičkim proračunom	25
Zaključak	25
Laboratorijska vježba 4	26
Zadatak 1	26
Opis vježbe	26
Analiza rezultata	26
Zaključak	27
Zadatak 2	27
Opis vježbe	27
Analiza rezultata	27
Zaključak	29
Zadatak 3	29
Opis vježbe	29
Analiza rezultata	30
Zaključak	31

Laboratorijska vježba 1

Zadatak 1

Opis vježbe

Potrebno je modelirati cilindričnu konfiguraciju s aspekta raspodjele potencijala i električnih naprežanja u dielektriku napravljenom od umreženog polietilena (XLPE) relativne dielektrične propustljivosti 2,4. Podaci koji se odnose na geometriju su radijus unutarnjeg vodiča $R_1 = 0.1[m]$ i radijus vanjskog vodiča $R_2 = 0.2[m]$. Vodič kabela je na potencijalu $\varphi_0 = 10[kV]$ dok je vanjski plašt uzemljen. Model će biti kreiran u AC/DC modulu/sučelje Electrostatics.

Crtanje modela

Crtanje se izvršava tako što se prvo nacrtaju kružnice poluprečnika 0.5[m]. Unutar nje se ucrtavaju kružnice radijusa 0.2[m] i 0.1[m], tim redom. Kružnice se crtaju pomoću komande **Draw/Specify Object/Circle**, radi tačnih dimenzija. Koristeći se komandom **Draw/Create Composite Object** dobiva se prozor u kojem se oduzimaju i prave uniformne površine. Potrebno je oduzeti kružnice poluprečnika 0.2[m] i 0.1[m] od kružnice poluprečnika 0.5[m], da bi se dobila simulacijska površina, u kojoj se simulira zrak kao okruženje cilindrične konfiguracije. Ponovnim crtanjem kružnica poluprečnika 0.2[m] i 0.1[m] se dobivaju kružnice koje simuliraju sloj dielektrika napravljenog od umreženog polietilena, kao i vodiča unutar dielektrika. Oduzimanjem kružnice poluprečnika 0.2[m] od kružnice poluprečnika 0.1[m] komandom **Create Composite Object** se dobiva kompozitni sloj dielektrika. Logički, potrebno je ucrtati ponovo kružnicu poluprečnika 0.1[m] da bi se dobio kompozitni sloj vodiča.

Granični uslovi

Komandom **Physics/Boundary Settings** se otvara komandni prozor za unošenje graničnih uslova. Selektiranjem kružnice poluprečnika 0.1[m] i odabirom opcije *Electric Potencijal* se otvara mogućnost unošenja potencijala u razmatranom slučaju. Za selektiranu kružnicu se unosi potencijal $V_0 = 1000[V]$. Nakon toga se selektiraju preostale nacrtane kružnice, nakon što se na isti način otvori komandni prozor za unošenje graničnih uvjeta. Opcijom *Ground* se simuliraju kružnice kao da su uzemljene, da bi se vjerodostojno mogla izvršiti simulacija.

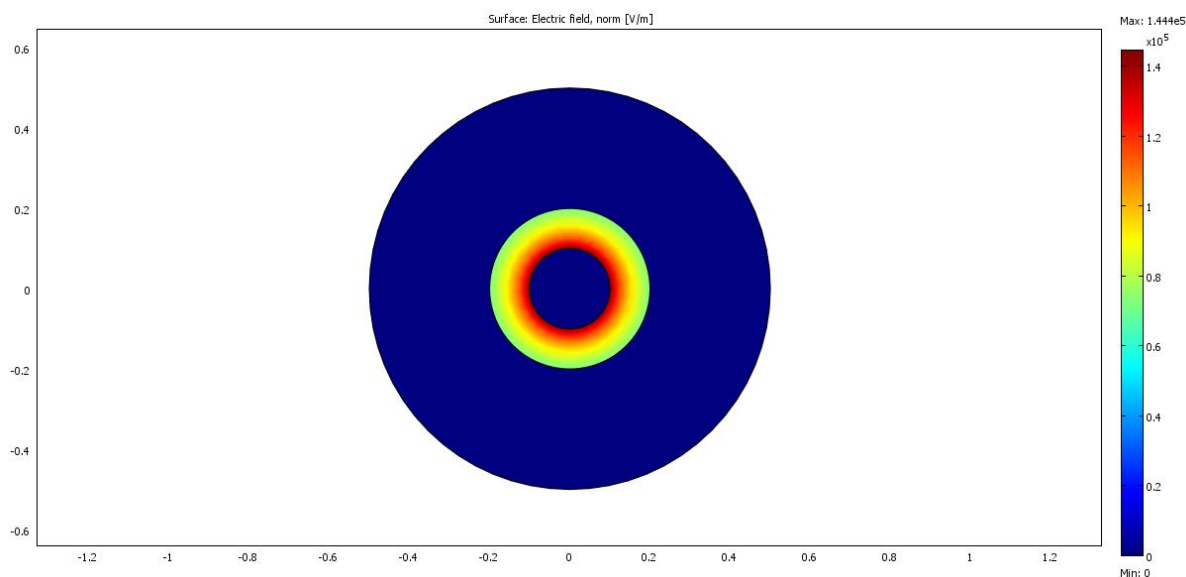
Osobine materijala

Prije simulacije je potrebno specificirati osobine materijala (za njihovu simulaciju). Odabirom komande **Physics/Subdomain Settings** se otvara komandni prozor za unošenje osobina pojedinih kompozitnih površina, da bi se simulirali pojedini materijali koji se koriste u ispitivanju. U komandnom prozoru se za kružnice poluprečnika 0.1[m] i 0.5[m] definiše $\epsilon_r = 1$, zato što te kružnice predstavljaju vodič i zrak (redom), a za kružnicu poluprečnika 0.2[m] se definiše $\epsilon_r = 2.4$, jer ta kružnica predstavlja sloj dielektrika od umreženog polietilena, koji ima specifičnu dielektričnu propustljivost jednaku upravo 2.4.

Analiza rezultata

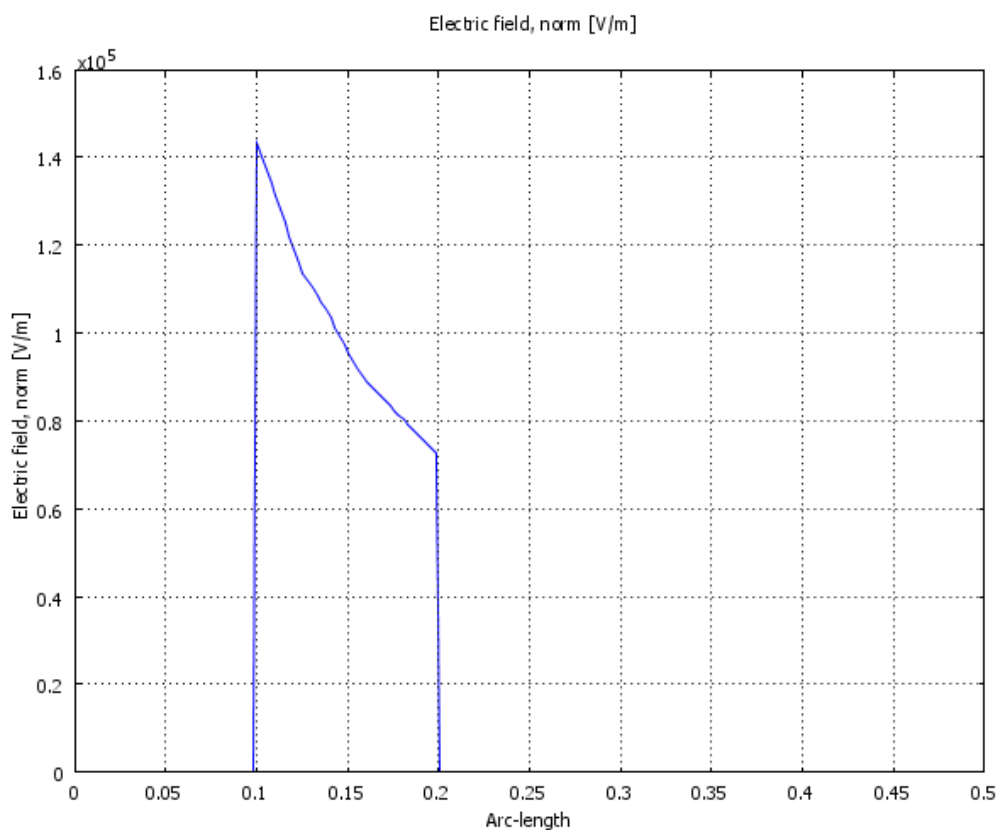
Posljedni koraci prije dobivanja rezultata je inicijalizacija mreže konačnim elementima. To se postiže odabirom komande **Mesh/Initialize Mesh**. Vidljivo je nakon odabira te komande da se razmatrani model podijelio na elemente, pomoću kojih se iterativnim metodama vrši

proračun zadatog modela, a korištena metoda je metoda konačnih elemenata. Odabirom komande **Solve/Solve Problem** se dobije slijedeća slika:



Slika 1. Prikaz raspodjele električnog polja u dielektriku

Komandom **Postprocessing/Plot Parameters** se dobiva komandni prozor za analizu rezultata. U odjeljku *Surface*, se za opciju *Predefined quantities* bira opcija *Electric field, norm*, da bi se prikazalo električno polje za uneseni model. Sa glavnog prozora i komandne trake na lijevoj strani, bira se opcija **Draw Line for Cross-Section Line Plot**, te se povlači linija od centra kružnica pa do kraja kružnice poluprečnika 0.5[m], da bi se prikazala promjena električnog polja dužinom razmatranog cilindričnog modela. Dobiva se slijedeći grafik:



*Slika 2.
Promjena
jačine
električnog
polja kroz
dielektrik*

Zaključak

Prema dobivenim rezultatima, može se zaključiti da je simulacija dala očekivane rezultate. Sa dobivenih grafika se zaključuje da se jačina el. polja smanjuje sa udaljavanjem od centra cilindrične konfiguracije vodiča sa dielektrikom od umreženog polietilena. Na grafiku se vidi da je jačina el. polja najveća na samoj kružnici poluprečnika 0.1[m] (površini provodnika), te da opada sve do same kružnice poluprečnika 0.2[m] (površina dielektričnog materijala), na kojoj nestaje električno polje, zbog toga što je ta površina uzemljena.

Zadatak 2

Opis vježbe

Potrebno je modelirati pločasti kondenzator s aspekta raspodjele potencijala i električnih naprežanja u dielektriku napravljenom od umreženog polietilena (XLPE) relativne dielektrične propustljivosti 2,4. Kondenzator je priključen na izvor istosmjernog napona $U = \varphi_1 - \varphi_0 = 10[kV]$. Budući da je geometrija kondenzatora nacrtana u formi pravougaonika, podaci koji se odnose na geometriju su:

1. Elektrode - pravougaonik površine $0.1m \times 1m$ uz odgovarajuću razmjeru radnog prostora za crtanje.
2. Izolacijski sloj - pravougaonik površine $0.8m \times 1m$ uz odgovarajuću razmjeru radnog prostora za crtanje.
3. Simulacijski sloj - pravougaonik površine $15m \times 5m$ uz odgovarajuću razmjeru radnog prostora za crtanje.

Crtanje modela

Model se izvodi pomoću pravougaonika, da bi se dobio traženi oblik za simulaciju. Prvi korak je crtanje pravougaonika za simulacijski sloj, koji će predstavljati zrak kao okolinu pločastog kondenzatora. Simulacijski pravougaonik se crta pomoću komande **Draw/Specify Object/Rectangle**, gdje se otvara komandni prozor za crtanje pravougaonika. Selektira se poravnanje *Center*, te se unose dimenzije 15 i 5, kao vrijednosti širine i visine, redom. Nakon toga se crta izolacijski sloj pomoću istih komandi i istog poravnanja, samo su dimenzije 0.8 i 1, što predstavlja širinu i visinu, redom. Preostaje crtanje elektroda. Otvaranjem opcije za crtanje pravougaonika, selektira se poravnanje *Corner*, te se crta jedna elektroda sa dimenzijama 0.1 i 1 (širina i visina), ali gdje je vrijednost pomjeranja po x -0.45, dok druga na isti način, samo sa pomjeranje po x 0.45. Na taj način se elektrode dodaju tačno na krajeve izolacijskog sloja, te se može postići precizno crtanje. Oduzimanjem svih manjih pravougaonika od simulacijskog pravougaonika komandom **Draw/Create Composite Object** se osigurava tačan prostor za izvršavanje modelacije. Ponavljanjem postupaka crtanja pravougaonika za izolacijski sloj i za elektrode, te oduzimanjem elektroda od izolacijskog sloja se pravi kompozitni objekat izolacijskog sloja, koji predstavlja zaseban sloj. Nakon toga se crtaju pravougaonici elektroda na isti način, te se dobivaju i ta dva zasebna objekta.

Granični uslovi

Granični uslovi se unose komandom **Physics/Boundary Settings**. Nakon što se otvori komandni prozor, selektiraju se stranice pravougaonika lijeve elektrode, te se postavljaju na

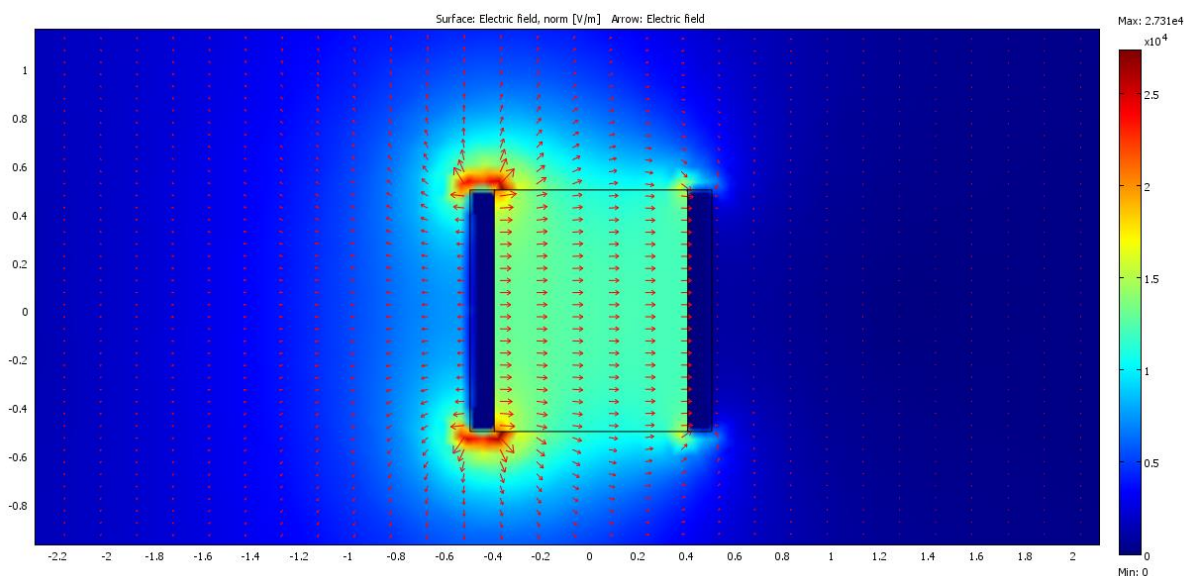
potencijal $V_0 = 1000[V]$. Slijedeći korak je selektiranje stranica pravougaonika desne elektrode, koji se postavljaju na opciju *Ground*, simulirajući da je ta elektroda uzemljena. Nakon toga se selektiraju gornja i donja stranica pravougaonika izolacijskog sloja, te se postavljaju na opciju *Continuity*, koja predstavlja granični uslov za dvije homogene sredine različitog karaktera: $n \cdot (D_2 - D_1) = 0$. Posljedni korak je postavljanje stranica simulacijskog pravougaonika na opciju *Ground*.

Osobine materijala

Osobine materijala se simuliraju pomoću komande **Physics/Subdomain Settings**. U razmatranom primjeru, izolacijski sloj je sačinjen od umreženog polietilena, te je njegova vrijednost specifične dielektrične propustljivosti $\epsilon_r = 2.4$. Korištenjem komandnog prozora nakon što se pokrene navedena komanda, za pravougaonik izolacijskog sloja se postavlja vrijednost $\epsilon_r = 2.4$, dok za ostale pravougaonike je $\epsilon_r = 1$, zbog toga što oni simuliraju provodne elektrode i zrak, gdje je vrijednost specifične dielektrične propustljivosti upravo 1.

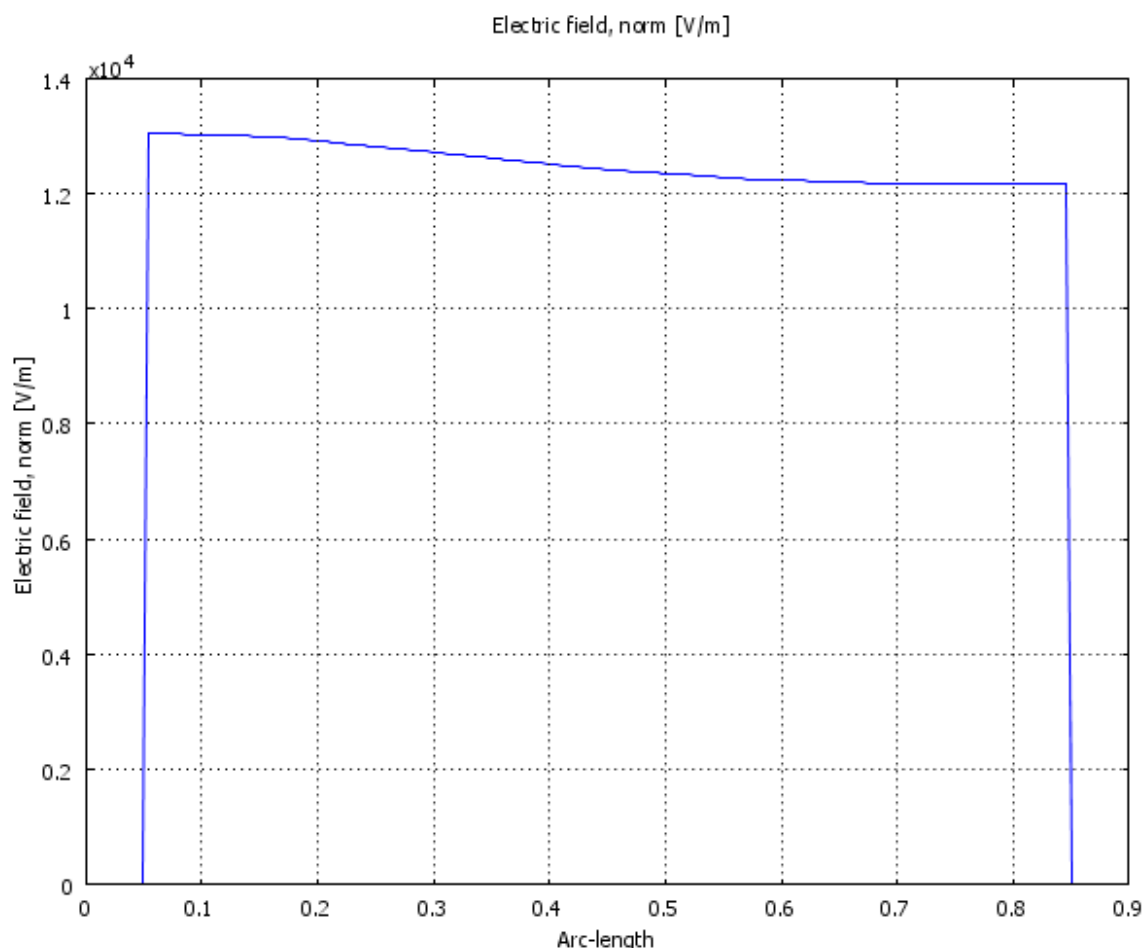
Analiza rezultata

Rezultati za modelirani slučaj se dobivaju pomoću metode konačnih elemenata. Podjela unese modulacije se izvršava korištenjem komande **Mesh/Initialize Mesh**. Nakon što se modelirani pločasti kondenzator podijeli na elemente, koristi se komanda **Solve/Solve Problem** za pokretanje proračuna modela. Dobiveni rezultati, sa selektiranom opcijom *Electric field, norm* u odjeljku *Surface* u komandnom prozoru koji se dobije nakon pokretanja komande **Postprocessing/Plot Parameters**, su:



Slika 3. Raspodjela električnog polja u pločastom kondenzatoru

Povlačenjem linije od lijeve elektrode ka desnoj elektrodi, preko sredine pločastog kondenzatora, dobiva se grafik koji opisuje ponašanje el. polja sa udaljavanjem od elektrode koja je na potencijalu u odnosu na drugu, uzemljenu elektrodu. Linija se povlači pomoću komande **Draw Line for Cross-Section Line Plot**, a rezultat toga je:



Slika 4. Promjena električnog polja u pločastom kondenzatoru

Zaključak

Razmatrana simulacija se ponaša fizikalno onako kako je i očekivano. Sa dobivenih grafika se može zaključiti kako se prostire električno polje kroz pločasti kondenzator sa dielektrikom od umreženog polietilena. Očekivano je da je jačina električnog polja najveća na površini elektrode koja je na potencijalu od 10000[V] (lijeva elektroda), te da se vrijednost električnog polja smanjuje sve više, kako se prostire kroz dielektrik pločastog kondenzatora.

Jačina el. polja na desnoj elektrodi pada na vrijednost $0 \left[\frac{V}{m} \right]$, jer je ta elektroda uzemljena. Sa

prve slike se vidi da je jačina električnog polja najveća na uglovima (rubovima) lijeve elektrode, što je i fizikalno objašnjeno. Najviše naboja se generira i zadržava na neravninama i lukovima, a najviše na rubovima, gdje je ugao između dvije površine jednak 90° .

Zadatak 3

Opis vježbe

Potrebno je modelirati pločasti kondenzator s aspekta raspodjele potencijala i električnih naprežanja u dielektriku napravljenom od umreženog polietilena (XLPE) relativne dielektrične propustljivosti 2,4 i zračnog procjepa relativne dielektrične propustljivosti 1. Kondenzator je priključen na izvor istosmjernog napona $U = \varphi_1 - \varphi_0 = 10[kV]$. Budući da je geometrija kondenzatora nacrtana u formi pravougaonika, podaci koji se odnose na geometriju su:

1. Elektrode - pravougaonik površine $0.1m \times 1m$ uz odgovarajuću razmjeru radnog prostora za crtanje.
2. Izolacijski sloj - pravougaonik površine $0.8m \times 1m$ uz odgovarajuću razmjeru radnog prostora za crtanje.
3. Zračni procjep - pravougaonik površine $0.8m \times 1m$ uz odgovarajuću razmjeru radnog prostora za crtanje.
4. Simulacijski sloj - pravougaonik površine $15m \times 5m$ uz odgovarajuću razmjeru radnog prostora za crtanje.

Crtanje modela

Model se izvodi pomoću pravougaonika, da bi se dobio traženi oblik za simulaciju. Prvi korak je crtanje pravougaonika za simulacijski sloj, koji će predstavljati zrak kao okolinu pločastog kondenzatora. Simulacijski pravougaonik se crta pomoću komande **Draw/Specify Object/Rectangle**, gdje se otvara komandni prozor za crtanje pravougaonika. Selektira se poravnanje *Center*, te se unose dimenzije 15 i 5, kao vrijednosti širine i visine, redom. Nakon toga se crta izolacijski sloj pomoću istih komandi i istog poravnanja, samo su dimenzije 0.8 i 1, što predstavlja širinu i visinu, redom. Preostaje crtanje elektroda. Otvaranjem opcije za crtanje pravougaonika, selektira se poravnanje *Corner*, te se crta jedna elektroda sa dimenzijama 0.1 i 1 (širina i visina), ali gdje je vrijednost pomjeranja po x -0.45, dok druga na isti način, samo sa pomjeranje po x 0.45. Na taj način se elektrode dodaju tačno na krajeve izolacijskog sloja, te se može postići precizno crtanje. Oduzimanjem svih manjih pravougaonika od simulacijskog pravougaonika komandom **Draw/Create Composite Object** se osigurava tačan prostor za izvršavanje modelacije. Ponavljanjem postupaka crtanja pravougaonika za izolacijski sloj i za elektrode, te oduzimanjem elektroda od izolacijskog sloja se pravi kompozitni objekat izolacijskog sloja, koji predstavlja zaseban sloj. Nakon toga se crtaju pravougaonici elektroda na isti način, te se dobivaju i ta dva zasebna objekta. Posljednji korak crtanja modela za simulaciju je dodavanje zračnog procjepa, koji je dimenzije elektrode. On se dodaje u izolacijski sloj, uz komandu za crtanje pravougaonika, sa dimenzijama širine i visine 0.1 i 1, redom. Koristi se *Center* poravnanje, a udaljenost na x poziciji je 0.35. Na taj način se procjep stvara odmah do desne elektrode. Oduzimanjem dodanog pravougaonika od izolacijskog objekta se stvara šupljina, te ponovnim dodavanjem pravougaonika zračnog procjepa se stvara zaseban kompozitni objekat, kojeg je moguće modelirati kao zračni procjep.

Granični uslovi

Granični uslovi se unose komandom **Physics/Boundary Settings**. Nakon što se otvori komandni prozor, selektiraju se stranice pravougaonika lijeve elektrode, te se postavljaju na potencijal $V_0 = 1000[V]$. Slijedeći korak je selektiranje stranica pravougaonika desne elektrode, koji se postavljaju na opciju *Ground*, simulirajući da je ta elektroda uzemljena.

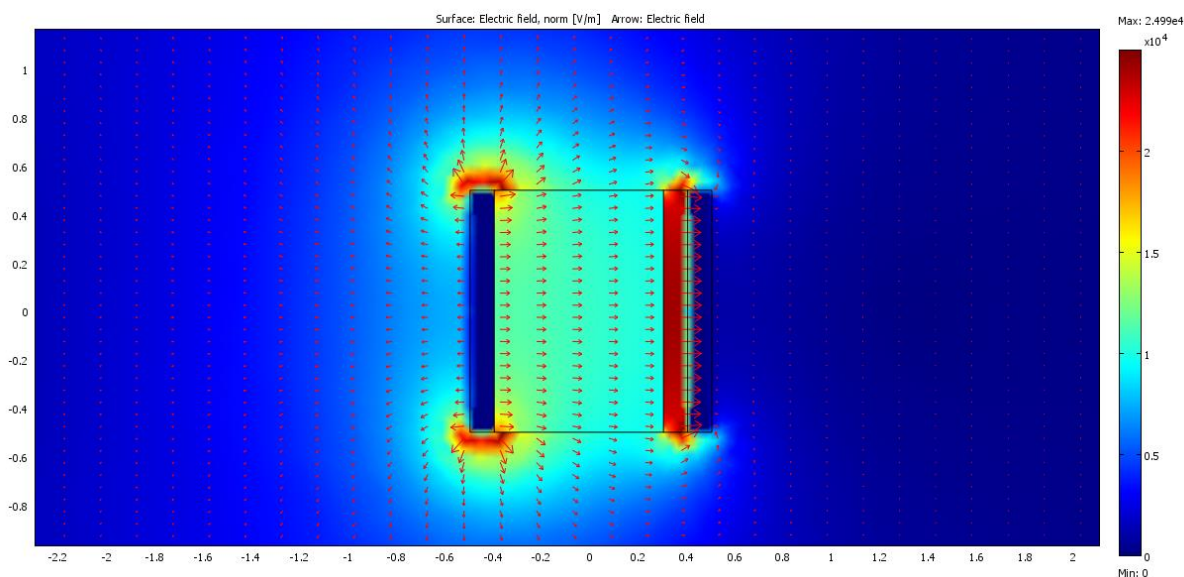
Nakon toga se selektiraju gornja i donja stranica pravougaonika izolacijskog sloja, kao i lijeva, gornja i donja stranica pravougaonika zračnog raspora, te se postavljaju na opciju *Continuity*, koja predstavlja granični uslov za dvije homogene sredine različitog karaktera: $n \cdot (D_2 - D_1) = 0$. Posljedni korak je postavljanje stranica simulacijskog pravougaonika na opciju *Ground*.

Osobine materijala

Osobine materijala se simuliraju pomoću komande **Physics/Subdomain Settings**. U razmatranom primjeru, izolacijski sloj je sačinjen od umreženog polietilena, te je njegova vrijednost specifične dielektrične propustljivosti $\varepsilon_r = 2.4$. Korištenjem komandnog prozora nakon što se pokrene navedena komanda, za pravougaonik izolacijskog sloja se postavlja vrijednost $\varepsilon_r = 2.4$, dok za ostale pravougaonike je $\varepsilon_r = 1$, zbog toga što oni simuliraju provodne elektrode i zrak, gdje je vrijednost specifične dielektrične propustljivosti upravo 1.

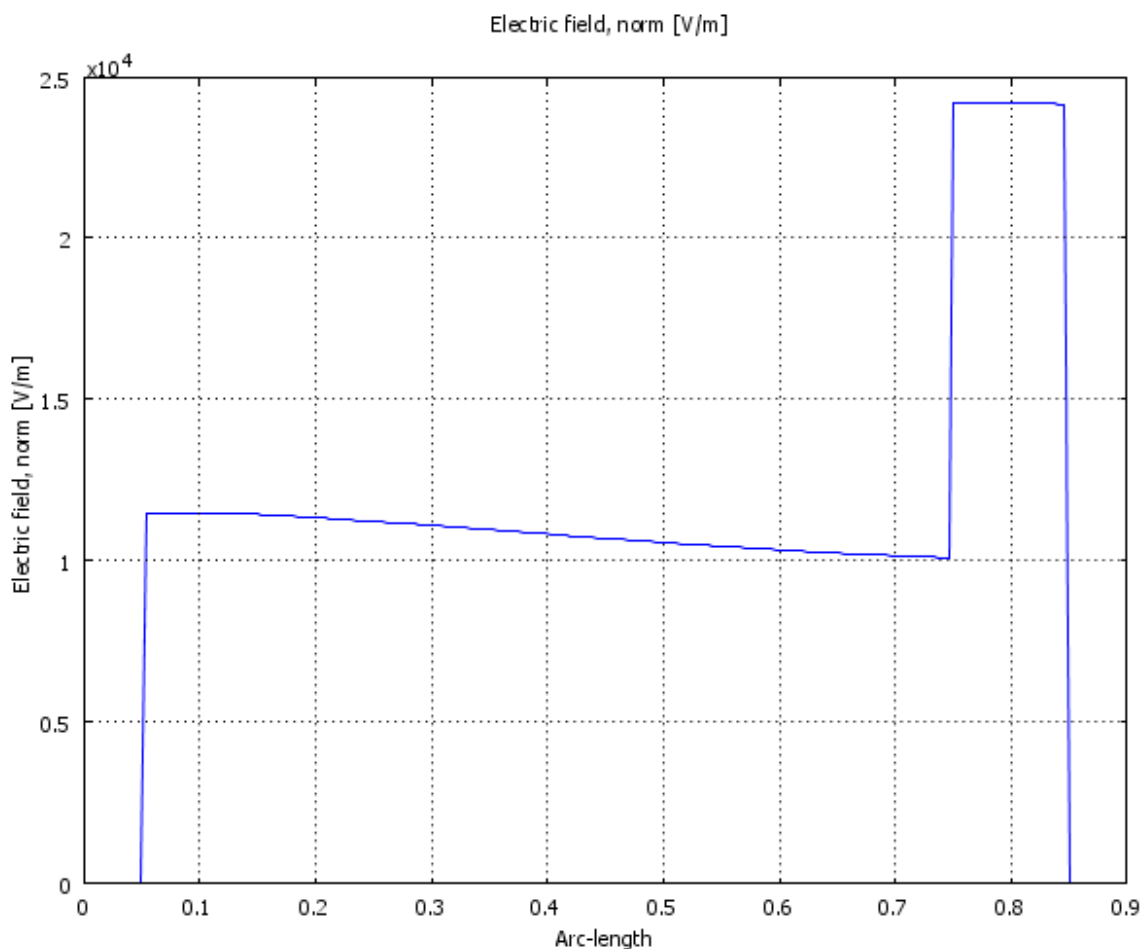
Analiza rezultata

Rezultati za modelirani slučaj se dobivaju pomoću metode konačnih elemenata. Podjela unese modulacije se izvršava korištenjem komande **Mesh/Initialize Mesh**. Nakon što se modelirani pločasti kondenzator podijeli na elemente, koristi se komanda **Solve/Solve Problem** za pokretanje proračuna modela. Dobiveni rezultati, sa selektiranom opcijom *Electric field, norm* u odjeljku *Surface* u komandnom prozoru koji se dobije nakon pokretanja komande **Postprocessing/Plot Parameters**, su:



Slika 5. Raspodjela električnog polja u pločastom kondenzatoru sa zračnim rasporom u izolacijskom sloju

Povlačenjem linije od lijeve elektrode ka desnoj elektrodi, preko sredine pločastog kondenzatora i kroz zračni raspor, dobiva se grafik koji opisuje ponašanje el. polja sa udaljavanjem od elektrode koja je na potencijalu u odnosu na drugu, uzemljenu elektrodu. Linija se povlači pomoću komande **Draw Line for Cross-Section Line Plot**, a rezultat toga je:



Slika 6. Promjena električnog polja u pločastom kondenzatoru sa zračnim rasporedom u izolacijskom sloju

Zaključak

Razmatrana simulacija se ponaša fizikalno onako kako je i očekivano. Sa dobivenih grafika se može zaključiti kako se prostire električno polje kroz pločasti kondenzator sa dielektrikom od umreženog polietilena, sa slučajem pojavljivanja zračnog rasporeda u izolacijskom sloju. U zadatku 2, jačina električnog polja je bila najveća na lijevoj elektrodi, koja je postavljena na potencijal od 10000[V], no u ovom slučaju dolazi do povećavanja električnog polja na mjestu nastanka rasporeda. Ova pojava se dešava zato što dolazi do promjene homogene sredine, bez da je to mjesto uzemljeno. Ovo je matematički moguće dokazati

relacijom: $E_2 = \frac{U}{d_2 + d_1 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}$, gdje ε_2 je opisano sa specifičnom dielektričnom propustljivošću

zraka $\varepsilon_r = 1$. Sa smanjenjem nazivnika (a to se dešava jer je $1 < 2.4$) se povećava jačina električnog polja, što se i pomoću simulacije može vidjeti. Ponovna pojava je izraženo električno polje na rubovima pravougaonika pločastog kondenzatora, zbog pojave da na neravnim površinama dolazi do povećane koncentracije (nagomilavanja) naboja.

Laboratorijska vježba 2

Zadatak 1

Opis vježbe

U toku vježbe bit će izvršeno modeliranje energetskog kabela s PILC (paper insulated lead covered) izolacijom položenog u zemlju. Vodič je izrađen od bakra a izolacija od uljem impregniranog papira. Podaci o parametrima kabela dati su u tabeli. Izvršit će se simulacija funkcioniranja kabela pri normalnim eksploatacijskim uvjetima. Vježba je podijeljena na dva dijela. Prvi dio obuhvata crtanje modela energetskog kabela, dok se drugi dio odnosi na spomenute simulacije.

	Vodič	Prvi izolacijski sloj	Drugi izolacijski sloj	Simulacijski sloj
Primjenjeni napon (V)	10 000	Continuity	Ground	Ground
Radius (m)	0.005	0.01	0.015	0.2

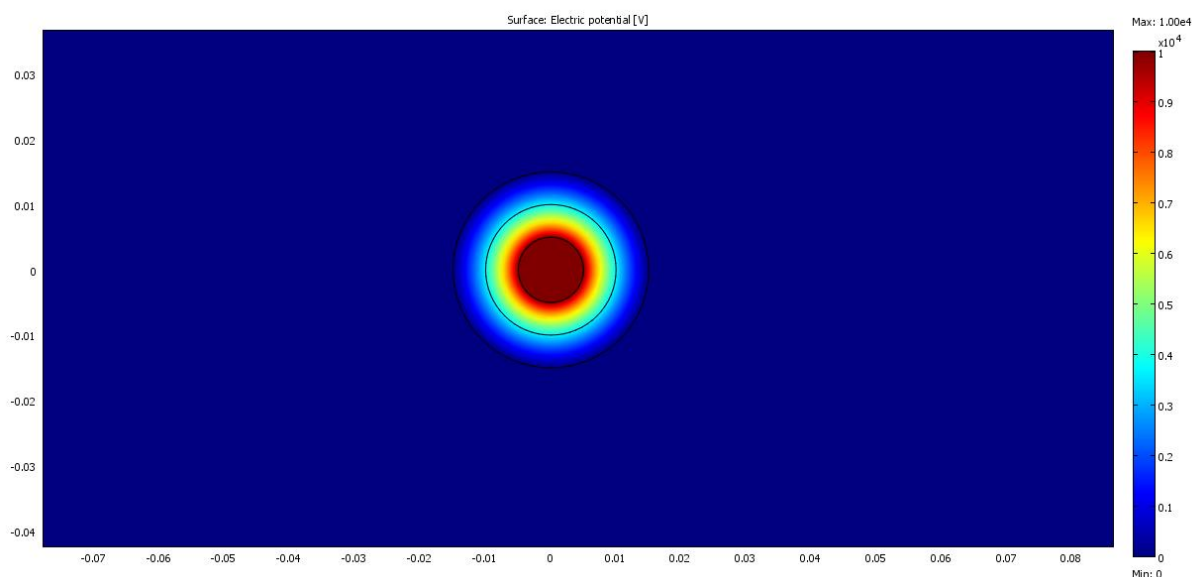
Tabela 1. Podaci o slojevima energetskog kabela sa izolacijom od uljem impregniranog papira

Granični uslovi

Granični uslovi se postavljaju odabirom komande **Physics/Boundary Settings**. Kada se otvori komandni prozor za unošenje graničnih uslova, koristimo se tabelom koja je data u opisu vježbe. Kružnica koja služi za simulaciju vodiča energetskog kabela se postavlja pomoću opcije *Electric potencial* na vrijednost potencijala od 10000[V], tako što se odaberu sve stranice te kružnice, a zatim se odabere već pomenuta opcija. Slijedeća kružnica predstavlja prvi izolacijski sloj, te za taj granični sloj se, nakon što se odaberu svi dijelovi druge kružnice, odabira opcija *Continuity*, pomoću koje se simulira ponašanje tog sloja kao izolacijskog sloja. Posljednji korak jeste da preostale dvije kružnice postavimo na potencijal zemlje, zato što drugi izolacijski sloj kabla predstavlja plašt, koji je uzemljen, a simulacijski sloj zapravo predstavlja zemlju, jer je kabl ukopan. To se radi pomoću opcije *Ground*.

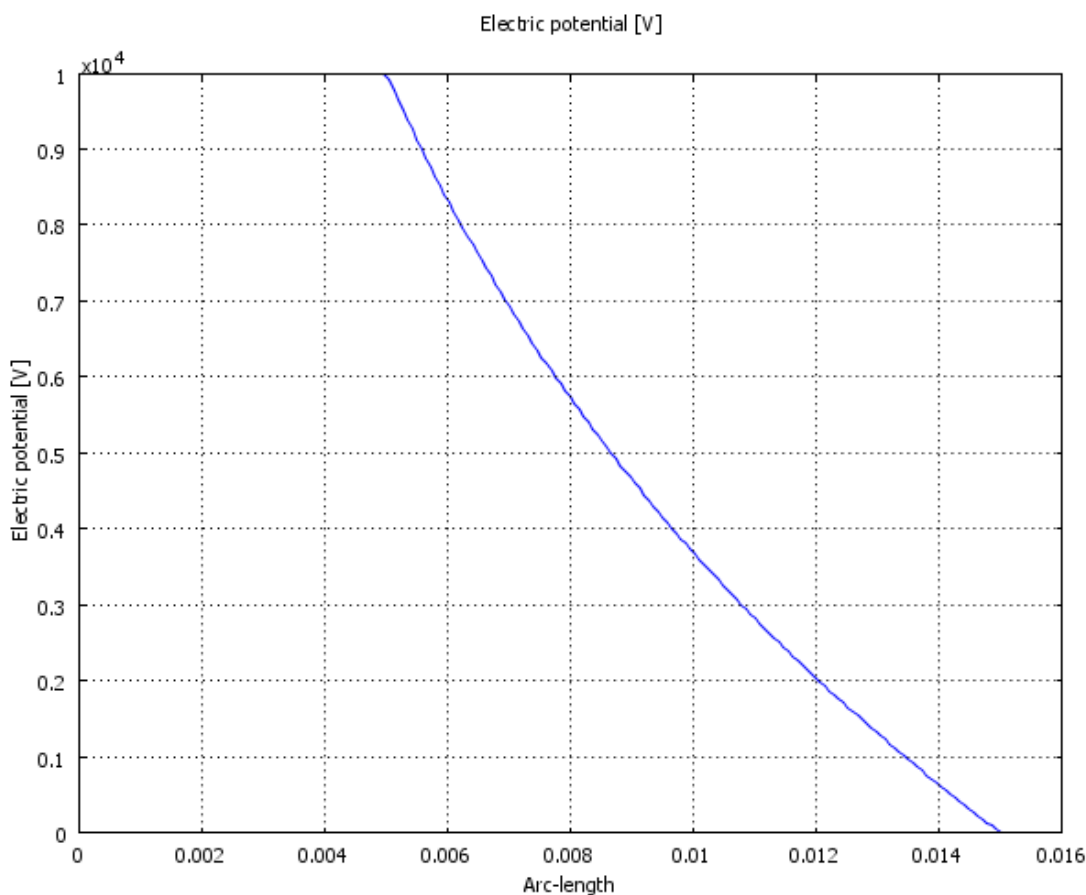
Analiza rezultata

U razmatranom primjeru, razmatraju se dva slučaja. U prvom slučaju je specifična dielektrična propustljivost prvog izolacijskog sloja $\epsilon_r = 1$, a u drugom slučaju je specifična dielektrična propustljivost prvog izolacijskog sloja $\epsilon_r = 4$. Svi ostali slojevi imaju vrijednost specifične dielektrične propustljivosti $\epsilon_r = 1$. Nakon što se izvrše svi opisani koraci u crtanju geometrije energetskog kabela, te nakon što se postave svi granični uslovi i opisane osobine materijala, vrši se podjela mreže na osnovne elemente i pristupa se metodi konačnih elemenata. Podjela se izvršava pomoću komande **Mesh/Initialize Mesh**, a proračun se izvršava pomoću komande **Solve/Solve Problem**. Za prvi slučaj se dobiva slijedeća raspodjela:



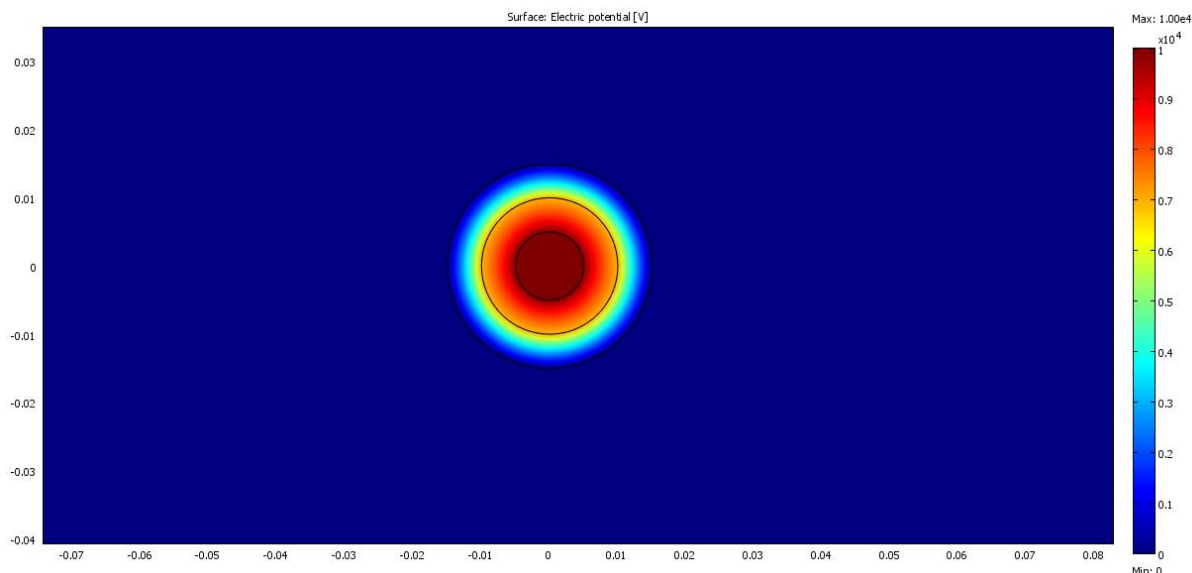
Slika 7. Raspodjela električnog potencijala u energetsom kabelu sa uljem impregniranim papirom – slučaj 1

Sa komandne trake sa lijeve strane prostora za crtanje i simulaciju, odabirom komande **Draw Line for Cross-Section Line Plot** i povlačenjem od centra kružnica prema dijelu simulacijskog sloja, dobiva se grafik koji predstavlja promjenu električnog potencijala:



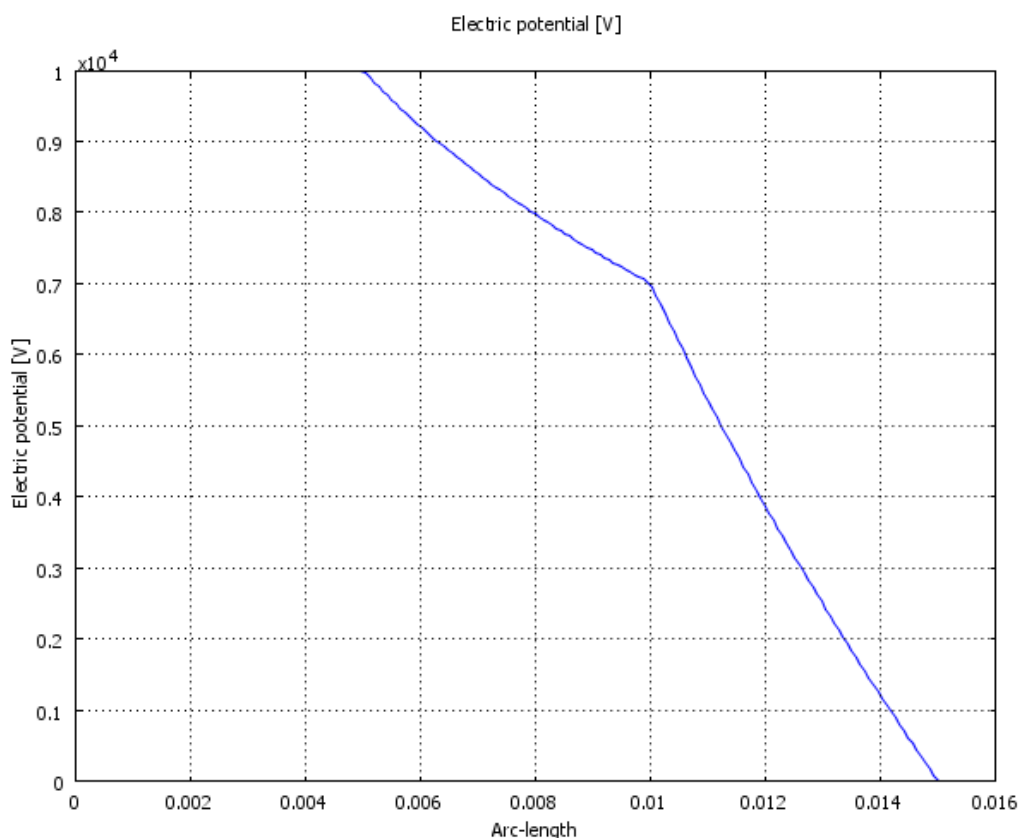
Slika 8. Promjena električnog potencijala u energetsom kabelu sa uljem impregniranim papirom – slučaj 1

Da bi se simulirao slučaj 2, potrebno je promijeniti vrijednost specifične dielektrične propustljivosti prvog izolacijskog sloja na $\epsilon_r = 4$. Ponavljajući iste postupke, dobija se raspodjela električnog potencijala:



Slika 9. Raspodjela električnog potencijala u energetsom kabelu sa uljem impregniranim papirom – slučaj 2

Korištenjem komande **Draw Line for Cross-Section Line Plot** i povlačenjem na isti način, dobiva se slijedeća promjena električnog potencijala:



Slika 10. Promjena električnog potencijala u energetsom kabelu sa uljem impregniranim papirom – slučaj 2

Poređenje sa analitičkim proračunom

Provjera sa analitičkim proračunom se vrši pomoću Laplace-ove parcijalne diferencijalne jednačine, koja za cilindrični koordinatni sistem glasi:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$$

Nakon dvostruke integracije, dolazi se do relacije za potencijal u prvom sloju (sloj između vodiča i prvog izolacijskog sloja), koja glasi:

$$\varphi(r) = \varphi_0 - (\varphi_0 - \varphi_m) \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, r_1 < r < r_2$$

Vrijednost poznatog potencijala iznosi $\varphi_0 = 1000[V]$, dok vrijednost potencijala φ_m se računa po relaciji:

$$\varphi_m = \varphi_0 \frac{\varepsilon_{r1} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{\varepsilon_{r1} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \varepsilon_{r2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Da bismo izvršili poređenje dobivenih vrijednosti modulacijom sa analitički proračunatim vrijednostima, potrebno je odrediti potencijal φ_m (potencijal na površini prvog izolacijskog sloja) za oba slučaja analitički, a zatim uporediti sa graphicima na slikama 8 i 10.

Za slučaj 1, izmjerena vrijednost je očitana sa grafika sa slike 8, i iznosi $\varphi_{m1,graf} = 3700[V]$, dok se analitički dobiva vrijednost $\varphi_{m1,ana} = 3690,7[V]$. Sa dobivenim vrijednostima se može zaključiti da je simulacija obavljena dobro, te se vrijednosti razlikuju zbog uzimanja u obzir efekata rasipanja, gubitaka, itd.

Za slučaj 2, izmjerena vrijednost je očitana sa grafika sa slike 10, i iznosi $\varphi_{m2,graf} = 7000[V]$, dok se analitički dobiva vrijednost $\varphi_{m2,ana} = 7005,854[V]$. Sa dobivenim vrijednostima se može zaključiti da je simulacija obavljena dobro, te se vrijednosti razlikuju zbog uzimanja u obzir efekata rasipanja, gubitaka, itd.

Zaključak

Iz dobivenih rezultata i dobivene simulacije, može se zaključiti da se modelirani slučaj energetskog kabla ukopanog u zemlju sa uljem impregniranim papirom kao izolacijom fizikalno ponaša. Jačina električnog polja opada prema funkciji prirodnog logaritma od maksimalne vrijednosti ka nuli, a to se dešava na površini drugog izolacionog sloja, koji je uzemljen. Kada se porede dva razmatrana slučaja, može se primijetiti efekat gradiranja izolacije, te da se prilikom gradiranja izolacije vrši linearnije raspodjeljivanje maksimalne jačine električnog polja (probojna jačina električnog polja) kroz čitav izolacioni sloj (prvi i drugi) energetskog kabla, što je povoljnije za praksu u odnosu na jedan izolacioni sloj iste specifične dielektričke propustljivosti. Također, u ovim ogledima se uviđaju prednosti korištenja iterativne metode proračuna problema u odnosu na analitički proračun, zbog tačnosti

rezultata (u razmatranom primjeru su uzeti u obzir efekti rasipanja i gubitaka), što daje vjerodostojnije rezultate.

Zadatak 2

Opis vježbe

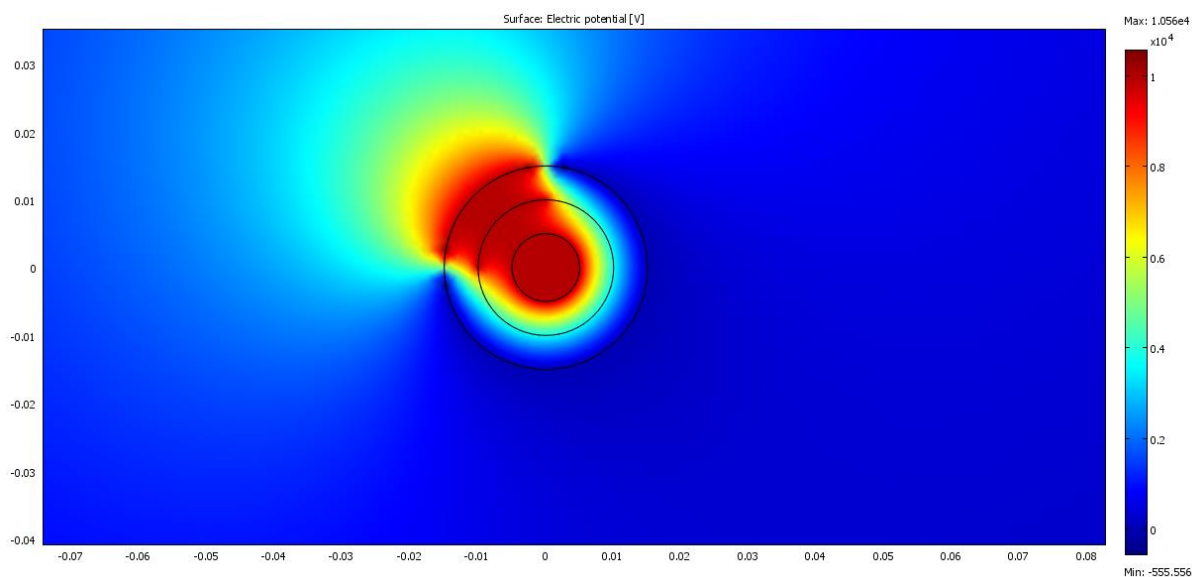
U toku vježbe bit će izvršeno modeliranje energetskog kabela s PILC (paper insulated lead covered) izolacijom položenog u zemlju. Vodič je izrađen od bakra a izolacija od uljem impregniranog papira. Podaci o parametrima kabela dati su u tabeli. Izvršit će se simulacija funkcioniranja kabela u slučaju električkog proboja, pri povišenom naponu. Vježba je podijeljena na dva dijela. Prvi dio obuhvata crtanje modela energetskog kabela, dok se drugi dio odnosi na spomenute simulacije.

Granični uslovi

Granični uslovi se postavljaju odabirom komande **Physics/Boundary Settings**. Kada se otvori komandni prozor za unošenje graničnih uslova, koristimo se tabelom 1. Kružnica koja služi za simulaciju vodiča energetskog kabela se postavlja pomoću opcije *Electric potencial* na vrijednost potencijala od 10000[V], tako što se odaberu sve stranice te kružnice, a zatim se odabere već pomenuta opcija. Da bi se simulirao električni proboj, odabire se dio kružnice prvog i drugog izolacijskog sloja, te se postavljaju na isti način na potencijal 10000[V]. Preostali dio kružnice prvog izolacijskog sloja se postavlja na opciju *Continuity*, jer simulira unutrašnji sloj izolacije, dok se preostali dio kružnice drugog sloja izolacije i simulacijski sloj postavljaju na *Ground*, jer drugi sloj izolacije se simulira da je uzemljen (pošto je ukopan u zemlju), a simulacijski sloj simulira zemlju.

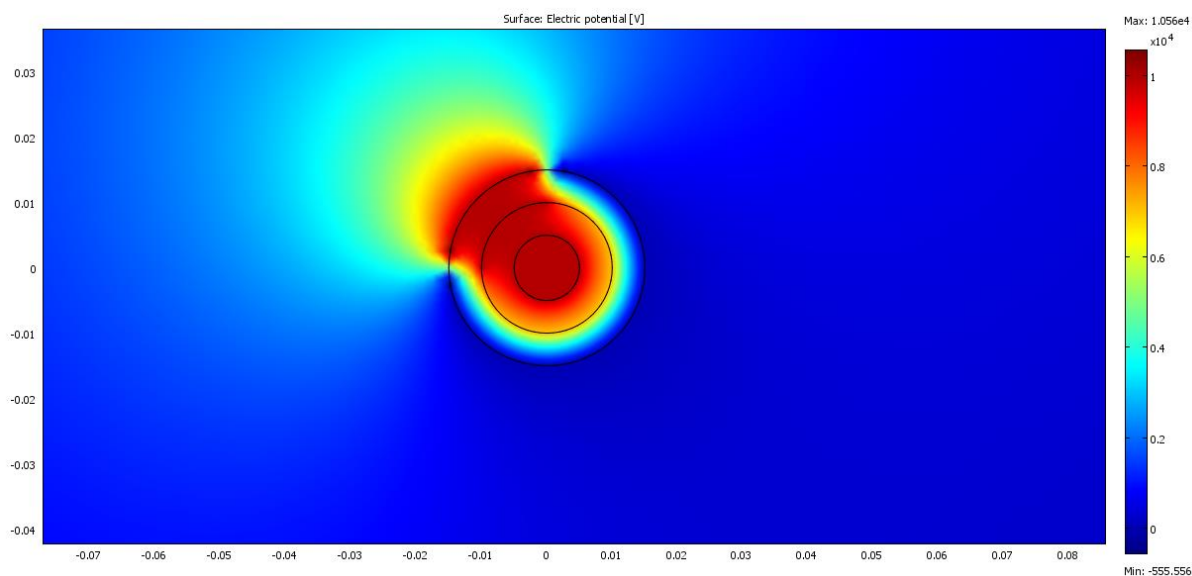
Analiza rezultata

U razmatranom primjeru, razmatraju se dva slučaja. U prvom slučaju je specifična dielektrična propustljivost prvog izolacijskog sloja $\varepsilon_r = 1$, a u drugom slučaju je specifična dielektrična propustljivost prvog izolacijskog sloja $\varepsilon_r = 4$. Svi ostali slojevi imaju vrijednost specifične dielektrične propustljivosti $\varepsilon_r = 1$. Nakon što se izvrše svi opisani koraci u crtanju geometrije energetskog kabela, te nakon što se postave svi granični uslovi i opisane osobine materijala, vrši se podjela mreže na osnovne elemente i pristupa se metodi konačnih elemenata. Podjela se izvršava pomoću komande **Mesh/Initialize Mesh**, a proračun se izvršava pomoću komande **Solve/Solve Problem**. Za prvi slučaj se dobiva slijedeća raspodjela:



Slika 11. Raspodjela električnog potencijala u energetsom kabelu uslijed električkog proboja sa uljem impregniranim papirom – slučaj 1

Da bi se simulirao slučaj 2, potrebno je promijeniti vrijednost specifične dielektrične propustljivosti prvog izolacijskog sloja na $\epsilon_r = 4$. Ponavljajući iste postupke, dobija se raspodjela električnog potencijala:



Slika 12. Raspodjela električnog potencijala u energetsom kabelu uslijed električkog proboja sa uljem impregniranim papirom – slučaj 2



Zaključak

Iz razmatrane simulacije se može primijetiti ponašanje energetskog kabela postavljenog u zemlju sa uljem impregniranim papirom kao izolacijom uslijed električkog proboja. Prema rezultatima simulacije, može se zaključiti da se veliki potencijal raspoređuje u okolinu samog kabela, što je veoma opasno za slučajeve prisustva drugih kabela/vodova, zbog moguće oštete izolacije na njima i eventualnog proboja. Pored toga, kako su simulirana dva slučaja, pri čemu prvi slučaj predstavlja slučaj izvođenja kabela bez gradiranja izolacije, a drugi slučaj sa gradiranjem, može se zaključiti da gradiranje izolacije ima prednost u ponašanju kabla prilikom kvara, jer se sveukupno manje potencijala rasporedi u okolni prostor uslijed gradiranja (primijetiti razliku boja na dobivenim simulacijama, te se zaključak može izvesti poređenjem skale boja sa intenzitetom potencijala).

Laboratorijska vježba 3

Zadatak 1

Opis vježbe

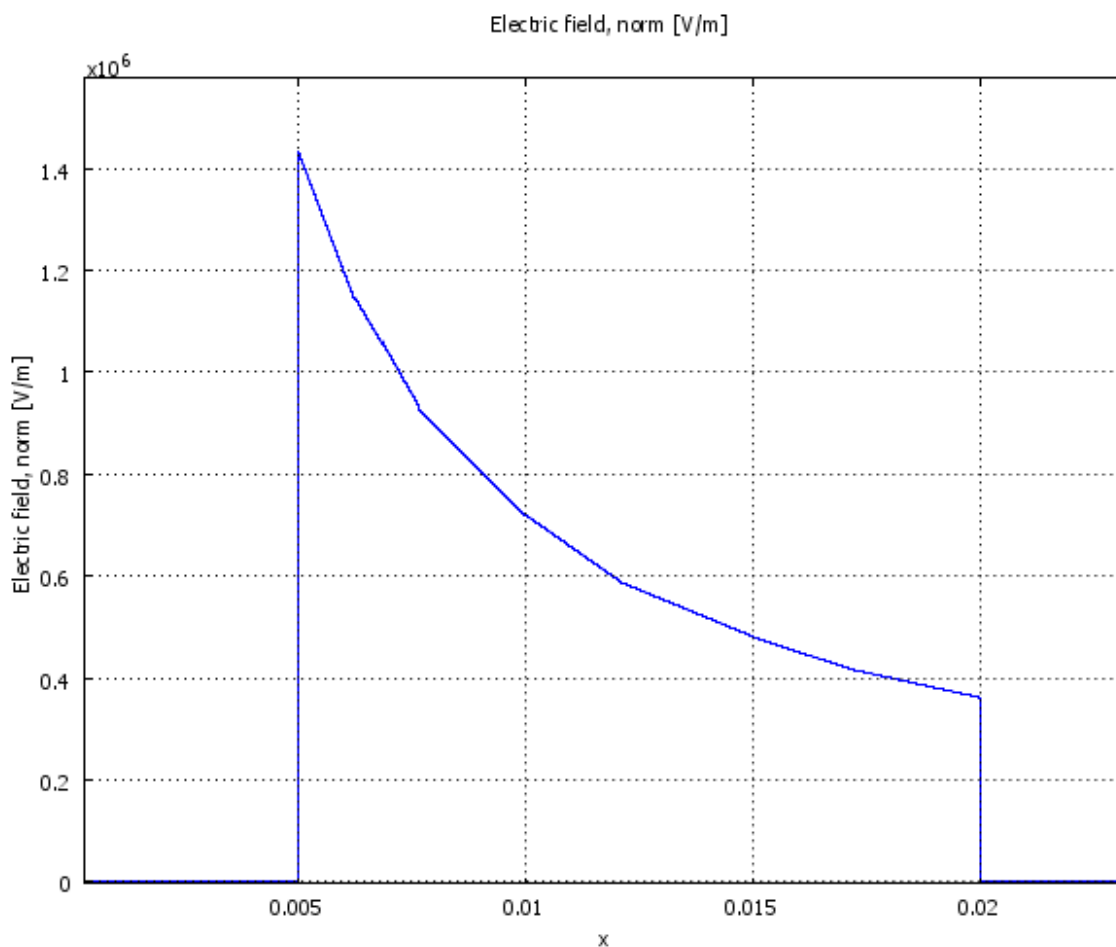
U toku vježbe bit će izvršena analiza pojednostavljenih modela kabela čiji su geometrijski modeli spašeni na računarima. Za realizaciju ove vježbe potrebno je analizirati probleme i riješiti postavljene zadatke. U ovom zadatku se ispituje kabel bez gradiranja izolacije.

Svrha gradiranja izolacije kabela

Gradiranje izolacije kabela se vrši iz mnogo razloga. Glavni razlog gradiranja izolacije jeste efektivnija raspodjela dielektrične čvrstoće proboja kroz kabl (maksimalna jačina električnog polja koju kabl može podnijeti, a da ne dođe do proboja ili do drugih oštećenja). Pošto jačina električnog polja se smanjuje sa povećanjem udaljenosti od vodiča, nije potrebno koristiti onda isti materijal na većim udaljenostima od vodiča, što znači da se mogu koristiti materijali manje dielektrične čvrstoće da obave istu funkciju, pri čemu je došlo do uštede materijala (materijali visoke dielektrične čvrstoće su skuplji). Također, korištenje različitih slojeva materijala za izolaciju otvara druge mogućnosti, a to su mjesto primjene kabela (neki materijal može imati manju dielektričnu čvrstoću, ali veću mehaničku, pa se može postaviti kao posljednji sloj za zaštitu od mehaničkih udara). Posmatrajući isto pitanje sa aspekta dielektrične čvrstoće, te sa grafičkim predstavljanjem dielektrične čvrstoće, može se primijetiti da je sa udaljavanjem od vodiča, dielektrična čvrstoća se ponaša „linearnije“, tj. ne dolazi do naglog smanjenja dielektrične čvrstoće kao kod slučaja sa jednim tipom izolacije.

Analiza rezultata

Nakon što se izvršilo crtanje modela i unošenje graničnih uslova, pristupa se modeliranju osobina materijala. U slučaju kabela bez gradiranja izolacije se postavljaju specifične dielektrične propustljivosti $\epsilon_r = 1$ za svaki sloj. Nakon što se izvrše komande **Mesh/Initialize Mesh** i **Solve/Solve Problem** redom, te kada se odabere opcija *Electric field, norm* u dijelu *Surface* u komandnom prozoru dobivenom komandom **Postprocessing/Plot Parameters**, te korištenjem komande **Draw Line for Cross-Section Line Plot** sa lijeve komandne trake kod simulacijskog prozora, dobiva se slijedeća promjena jačine električnog polja:



Slika 13. Promjena električnog polja u energetsom kabelu bez gradiranja izolacije

Poređenje sa analitičkim proračunom

Sa slike 13. se može vidjeti da je maksimalna vrijednost jačine električnog polja

$$E_{\max, \text{graf}} = 1.43 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right] = 1.43 \left[\frac{\text{kV}}{\text{mm}} \right].$$

Da bi se analitički mogla proračunati maksimalna vrijednost jačine električnog polja, potrebno je prvo definisati vrijednosti. Sa dobivene geometrije dobivenog problema, očitavaju se vrijednosti :

$$\varphi_0 = 10000 [\text{V}]$$

$$r_1 = 0.005 [\text{m}]$$

$$r_4 = 0.02 [\text{m}]$$

Analitički, maksimalna vrijednost se dobije:

$$E_{\max, \text{ana}} = \frac{\varphi_0}{r_1 \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_1}\right)} = 1.443 \left[\frac{\text{kV}}{\text{mm}} \right], \text{ što odgovara vrijednosti koja je dobivena simulacijom.}$$

Razlika u rezultatima postoji uslijed raznih zanemarenja uslijed analitičkog proračuna (efekat rasipanja, gubici, tačnost proračuna, itd.).

Zaključak

Može se zaključiti da je korištenje kabla bez gradiranja najjednostavnija izvedba, ali i najmanje efikasna izvedba, zbog svih prednosti koje pruža gradiranje izolacije. U primjeru se može zaključiti da je simulacija izvršena dobro, jer se analitički proračun slaže sa dobivenim rezultatima simulacije.

Zadatak 2

Opis vježbe

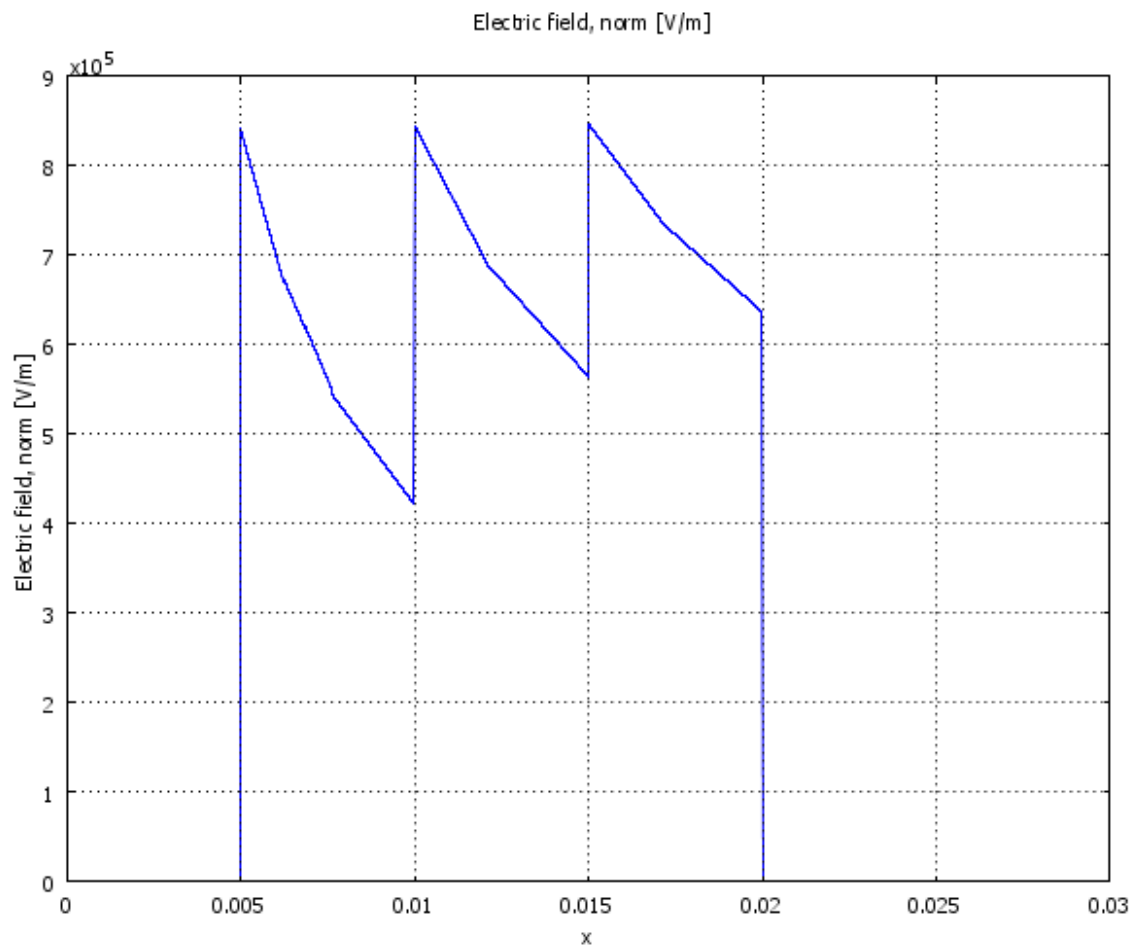
U toku vježbe bit će izvršena analiza pojednostavljenih modela kabla čiji su geometrijski modeli spašeni na računarima. Za realizaciju ove vježbe potrebno je analizirati probleme i riješiti postavljene zadatke. U ovom zadatku se ispituje kabel sa kapacitivnim gradiranjem polja.

Svrha gradiranja izolacije kabla

Gradiranje izolacije kabla se vrši iz mnogo razloga. Glavni razlog gradiranja izolacije jeste efektivnija raspodjela dielektrične čvrstoće proboja kroz kabl (maksimalna jačina električnog polja koju kabl može podnijeti, a da ne dođe do proboja ili do drugih oštećenja). Pošto jačina električnog polja se smanjuje sa povećanjem udaljenosti od vodiča, nije potrebno koristiti onda isti materijal na većim udaljenostima od vodiča, što znači da se mogu koristiti materijali manje dielektrične čvrstoće da obave istu funkciju, pri čemu je došlo do uštede materijala (materijali visoke dielektrične čvrstoće su skuplji). Također, korištenje različitih slojeva materijala za izolaciju otvara druge mogućnosti, a to su mjesto primjene kabla (neki materijal može imati manju dielektričnu čvrstoću, ali veću mehaničku, pa se može postaviti kao posljednji sloj za zaštitu od mehaničkih udara). Posmatrajući isto pitanje sa aspekta dielektrične čvrstoće, te sa grafičkim predstavljanjem dielektrične čvrstoće, može se primijetiti da je sa udaljavanjem od vodiča, dielektrična čvrstoća se ponaša „linearnije“, tj. ne dolazi do naglog smanjenja dielektrične čvrstoće kao kod slučaja sa jednim tipom izolacije. Kapacitivno gradiranje se izvršava korištenjem različitih materijala sa svojim zasebnim dielektričnim sposobnostima, te se ti materijali postavljaju redom, koji se prethodno analizira proračunom. Kapacitivno gradiranje kabla je najefikasnije kada se materijali sa što većom specifičnom dielektričnom propustljivošću postavljaju što bliže vodiču, krenuvši od najveće, ka najmanjoj.

Analiza rezultata

Nakon što se izvršilo crtanje modela i unošenje graničnih uslova, pristupa se modeliranju osobina materijala. U slučaju kabla sa kapacitivnim gradiranjem izolacije se postavljaju specifične dielektrične propustljivosti na posebne vrijednosti, koje se analitički odrede, za svaki sloj. Nakon što se izvrše komande **Mesh/Initialize Mesh** i **Solve/Solve Problem** redom, te kada se odabere opcija *Electric field, norm* u dijelu *Surface* u komandnom prozoru dobivenom komandom **Postprocessing/Plot Parameters**, te korištenjem komande **Draw Line for Cross-Section Line Plot** sa lijeve komandne trake kod simulacijskog prozora, dobiva se slijedeća promjena jačine električnog polja:



Slika 14. Promjena električnog polja u energetsom kabelu sa kapacitivnim gradiranjem izolacije

Poređenje sa analitičkim proračunom

Sa slike 14. se može vidjeti da je maksimalna vrijednost jačine električnog polja

$$E_{\max, graf} = 8.39 \cdot 10^5 \left[\frac{V}{m} \right] = 0.839 \left[\frac{kV}{mm} \right].$$

Da bi se analitički mogla proračunati maksimalna vrijednost jačine električnog polja, potrebno je prvo definisati vrijednosti. Sa dobivene geometrije dobivenog problema, očitavaju se vrijednosti :

$$\varphi_0 = 10000[V]$$

$$r_1 = 0.005[m]$$

$$r_2 = 0.01[m]$$

$$r_3 = 0.015[m]$$

$$r_4 = 0.02[m]$$

$$\varepsilon_{r1} = 1$$

$$\varepsilon_{r2} = 7$$

Da bi se mogle izračunati vrijednosti specifične dielektrične propustljivosti, koriste se relacije:

$$\varepsilon_{r1} \cdot r_1 = \varepsilon_{r2} \cdot r_2 = \varepsilon_{r3} \cdot r_3 = \varepsilon_{r4} \cdot r_4$$

Iz prethodne relacije vrijedi:

$$\varepsilon_{r3} = \varepsilon_{r2} \frac{r_2}{r_3} = 3.5$$

$$\varepsilon_{r4} = \varepsilon_{r3} \frac{r_3}{r_4} = 2.33$$

Analitički, maksimalna vrijednost se dobije:

$$E_{\max, ana} = \frac{\varphi_0}{r_1 \cdot \left[\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r3}} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r4}} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) \right]} = 0.845 \left[\frac{kV}{mm} \right], \text{ što odgovara vrijednosti koja}$$

je dobivena simulacijom. Razlika u rezultatima postoji uslijed raznih zanemarenja uslijed analitičkog proračuna (efekat rasipanja, gubici, tačnost proračuna, itd.).

Zaključak

Iz rezultata modeliranja razmatranog primjera i analitičkog proračuna, može se zaključiti da je postignuta vjerodostojna simulacija energetskog kabla sa kapacitivnim gradiranjem izolacije. Sa slike 14. se mogu primijetiti da su odnosi između maksimalnih i minimalnih vrijednosti jačine električnog polja za svaki izolacioni nivo jednaki, čime je postignuto stvaranje karakteristike promjene električnog polja idealnijoj. Kapacitivno gradiranje izolacije kabla daje najbolje rezultate uslijed gradiranja, ali je i najskuplja izvedba.

Zadatak 3

Opis vježbe

U toku vježbe bit će izvršena analiza pojednostavljenih modela kabla čiji su geometrijski modeli spašeni na računarima. Za realizaciju ove vježbe potrebno je analizirati probleme i riješiti postavljene zadatke. U ovom zadatku se ispituje kabl sa gradiranjem izolacije putem aluminijskih folija.

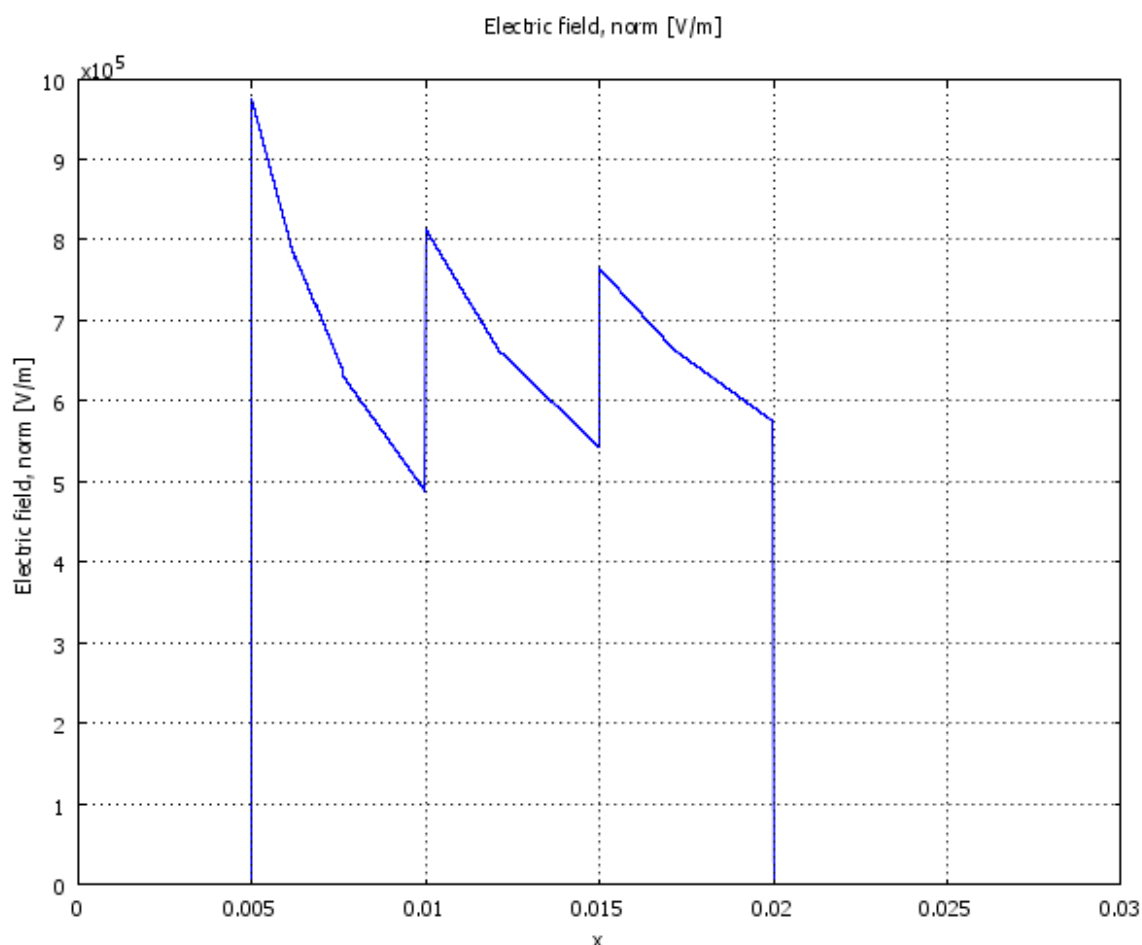
Svrha gradiranja izolacije kabla

Gradiranje izolacije kabla se vrši iz mnogo razloga. Glavni razlog gradiranja izolacije jeste efektivnija raspodjela dielektrične čvrstoće proboja kroz kabl (maksimalna jačina električnog polja koju kabl može podnijeti, a da ne dođe do proboja ili do drugih oštećenja). Pošto jačina električnog polja se smanjuje sa povećanjem udaljenosti od vodiča, nije potrebno koristiti onda isti materijal na većim udaljenostima od vodiča, što znači da se mogu koristiti materijali manje dielektrične čvrstoće da obave istu funkciju, pri čemu je došlo do uštede materijala (materijali visoke dielektrične čvrstoće su skuplji). Također, korištenje različitih slojeva materijala za izolaciju otvara druge mogućnosti, a to su mjesto primjene kabla (neki

materijal može imati manju dielektričnu čvrstoću, ali veću mehaničku, pa se može postaviti kao posljednji sloj za zaštitu od mehaničkih udara). Posmatrajući isto pitanje sa aspekta dielektrične čvrstoće, te sa grafičkim predstavljanjem dielektrične čvrstoće, može se primijetiti da je sa udaljavanjem od vodiča, dielektrična čvrstoća se ponaša „linearnije“, tj. ne dolazi do naglog smanjenja dielektrične čvrstoće kao kod slučaja sa jednim tipom izolacije. Gradiranje izolacije sa aluminijskim folijama se izvodi na način takav što se koristi jedan tip izolacije, ali se na određenim udaljenostima postavljaju aluminijske folije. Prilikom rada, aluminijske folije se dovode pod napon, koje generiraju svoje električno polje. Na taj način se simuliraju maksimalne i minimalne vrijednosti jačine električnog polja na različitim nivoima, kao kod gradiranja izolacije kabla kapacitivnim putem.

Analiza rezultata

Nakon što se izvršilo crtanje modela i unošenje graničnih uslova, pristupa se modeliranju osobina materijala. U slučaju kabla sa gradiranjem izolacije pomoću aluminijskih folija se postavljaju specifične dielektrične propustljivosti $\varepsilon_r = 1$ za svaki sloj. Nakon što se izvrše komande **Mesh/Initialize Mesh** i **Solve/Solve Problem** redom, te kada se odabere opcija *Electric field, norm* u dijelu *Surface* u komandnom prozoru dobivenom komandom **Postprocessing/Plot Parameters**, te korištenjem komande **Draw Line for Cross-Section Line Plot** sa lijeve komandne trake kod simulacijskog prozora, dobiva se slijedeća promjena jačine električnog polja:



Slika 15. Promjena električnog polja u energetskom kabelu sa gradiranjem izolacije pomoću aluminijskih folija

Poređenje sa analitičkim proračunom

Sa slike 15. se može vidjeti da je maksimalna vrijednost jačine električnog polja

$$E_{\max, graf} = 9.75 \cdot 10^5 \left[\frac{V}{m} \right] = 0.975 \left[\frac{kV}{mm} \right].$$

Da bi se analitički mogla proračunati maksimalna vrijednost jačine električnog polja, potrebno je prvo definisati vrijednosti. Sa dobivene geometrije dobivenog problema, očitavaju se vrijednosti :

$$\varphi_1 = 1000[V]$$

$$\varphi_2 = 6600[V]$$

$$r_1 = 0.005[m]$$

$$r_2 = 0.01[m]$$

Analitički, maksimalna vrijednost se dobije:

$$E_{\max, ana} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{r_1 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 0.964 \left[\frac{kV}{mm} \right], \text{ što odgovara vrijednosti koja je dobivena simulacijom.}$$

Razlika u rezultatima postoji uslijed raznih zanemarenja uslijed analitičkog proračuna (efekat rasipanja, gubici, tačnost proračuna, itd.).

Zaključak

Razmatrani primjer predstavlja dobru simulaciju energetskog kabla sa gradiranjem izolacije pomoću aluminijskih folija. Sa slike 15. se može vidjeti da je oblik promjene električnog polja sličan kao kod kapacitivnog gradiranja izolacije, no nisu zadržani isti odnosi između maksimalnih i minimalnih vrijednosti jačina električnog polja svakog sloja (pospješeno aluminijskim folijama), što nije u blizini idealne karakteristike. Iz toga se da zaključiti da je kapacitivno gradiranje izolacije bolje u odnosu na gradiranje izolacije pomoću aluminijskih folija, no da je gradiranje izolacije pomoću aluminijskih folija jeftinija izvedba gradiranja izolacija, obavlja solidno gradiranje i bolje je u odnosu na slučaj bez gradiranja izolacije kabla.

Laboratorijska vježba 4

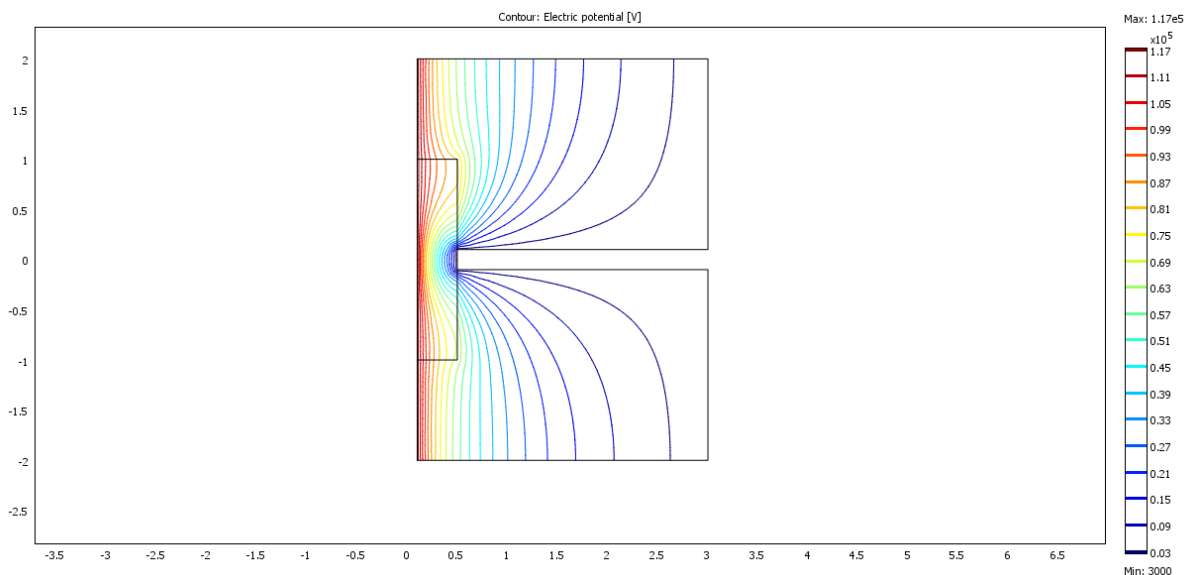
Zadatak 1

Opis vježbe

U toku vježbe bit će izvršena analiza postojećih modela pojednostavljenih bušinga. Potrebno je analizirati problem za bušing bez gradiranja izolacije.

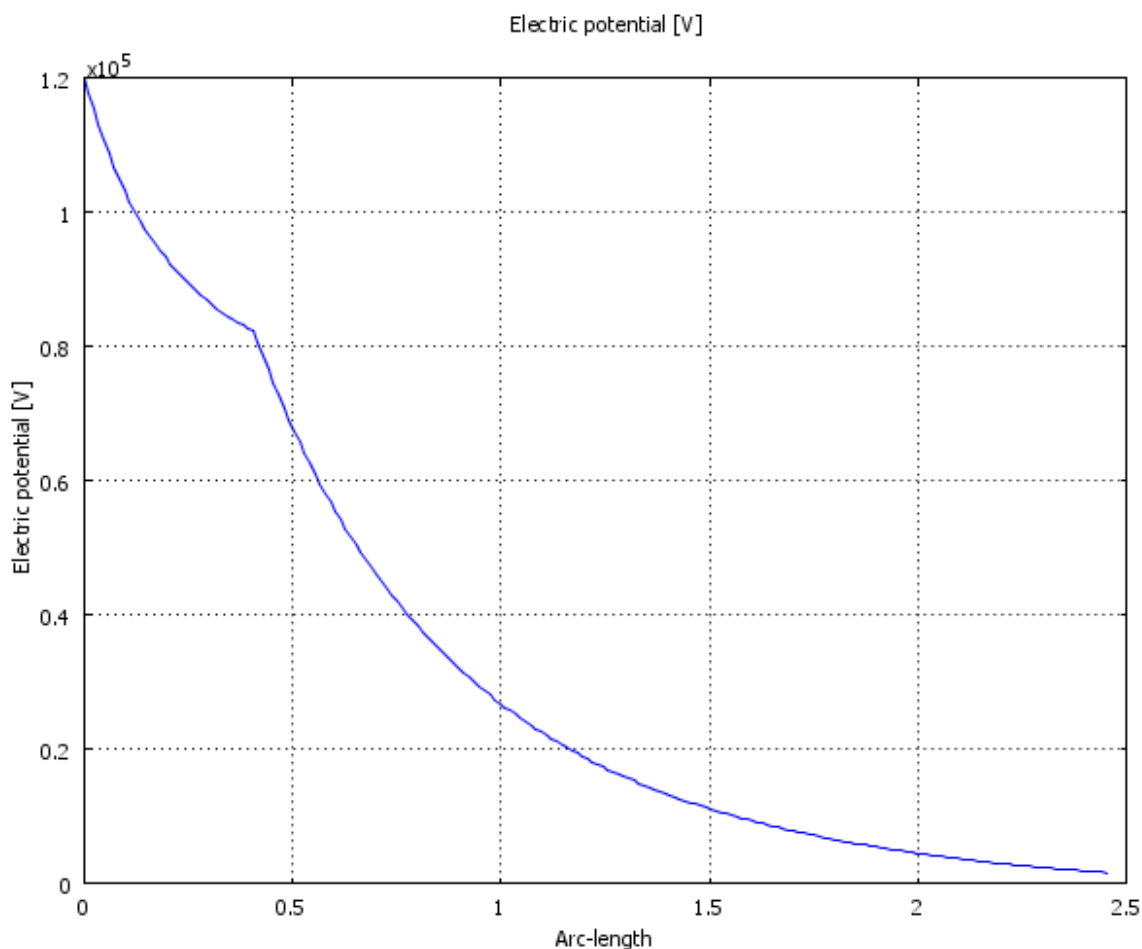
Analiza rezultata

Nakon što se učita gotova geometrija za razmatrani slučaj, potrebno je postaviti granične slučajeve. Na lijevi zid, koji predstavlja površinu bušinga, postavlja se vrijednost potencijala na 120000[V], dok su dijelovi koji dodiruju površinu bušinga na opciji *Continuity* iz komandnog prozora, koji se dobije biranjem komande **Physics/Boundary Settings**. Gornja i donja stranica se postavljaju na opciju *Axial symmetry*, dok se ostale stranice postavljaju na *Ground*. Potom se postavljaju osobine materijala pomoću opcije **Physics/Subdomain Settings**. Za donji pravougaonik se postavlja vrijednost $\epsilon_r = 2.2$, jer on simulira transformatorsko ulje. Za lijevi objekat se postavlja $\epsilon_r = 7$, jer on simulira bakelit, dok za gornji pravougaonik je $\epsilon_r = 1$, jer predstavlja zrak. Nakon što je završeno uređivanje graničnih uslova i osobina materijala, komandom **Postprocessing/Plot Parameters** se na dijelu *General* biraju pod odjeljkom *Plot type* opcije *Contour* i *Geometry edges*. Nakon toga, komandama **Mesh/Initialize Mesh** i **Solve/Solve Problem** se dobiva rezultat simulacije, koji je prikazan na slijedećoj slici:



Slika 16. Raspodjela električnog potencijala u bušingu bez gradiranja izolacije

Odabirom komande **Draw Line for Cross-Section Line Plot** sa lijeve komande trake pored simulacijskog prozora, te povlačenjem preko modela, dobiva se slijedeći grafik koji predstavlja promjenu električnog potencijala:



Slika 17. Promjena električnog potencijala u bušingu bez gradiranja izolacije

Zaključak

Sa dobivenim graficima i raspodjelama, može se zaključiti da je model bušinga bez gradiranja izolacije dobro simuliran. Bušing bez gradiranja izolacije je najjeftinija vrsta izvedbe bušinga, ali daje najgore rezultate u poređenju sa drugim vrstama.

Zadatak 2

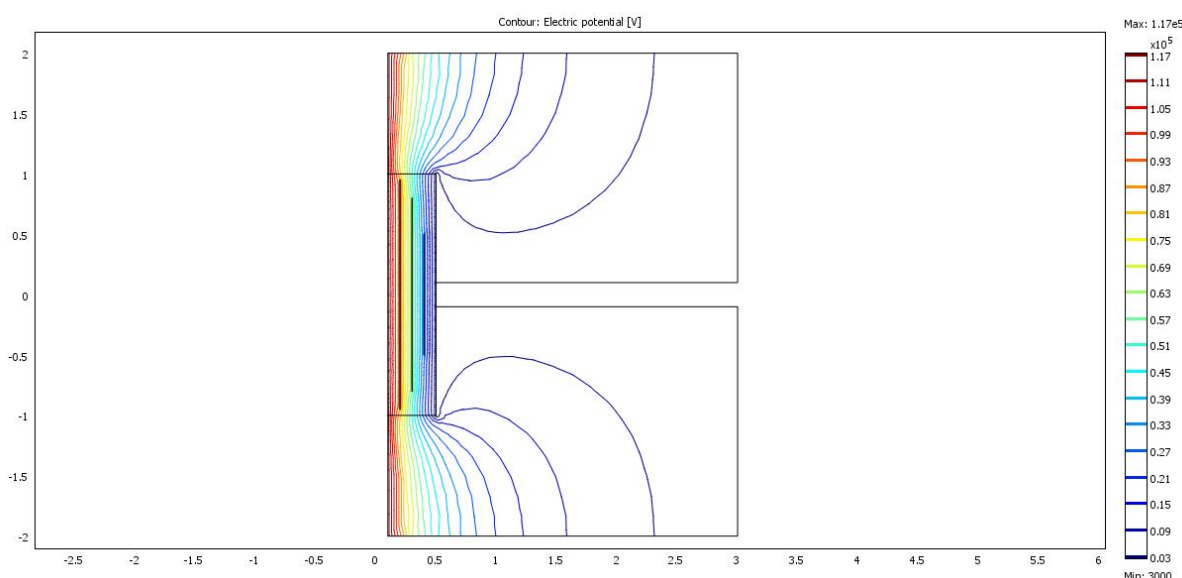
Opis vježbe

U toku vježbe bit će izvršena analiza postojećih modela pojednostavljenih bušinga. Potrebno je analizirati problem za bušing sa kapacitivnim gradiranjem polja.

Analiza rezultata

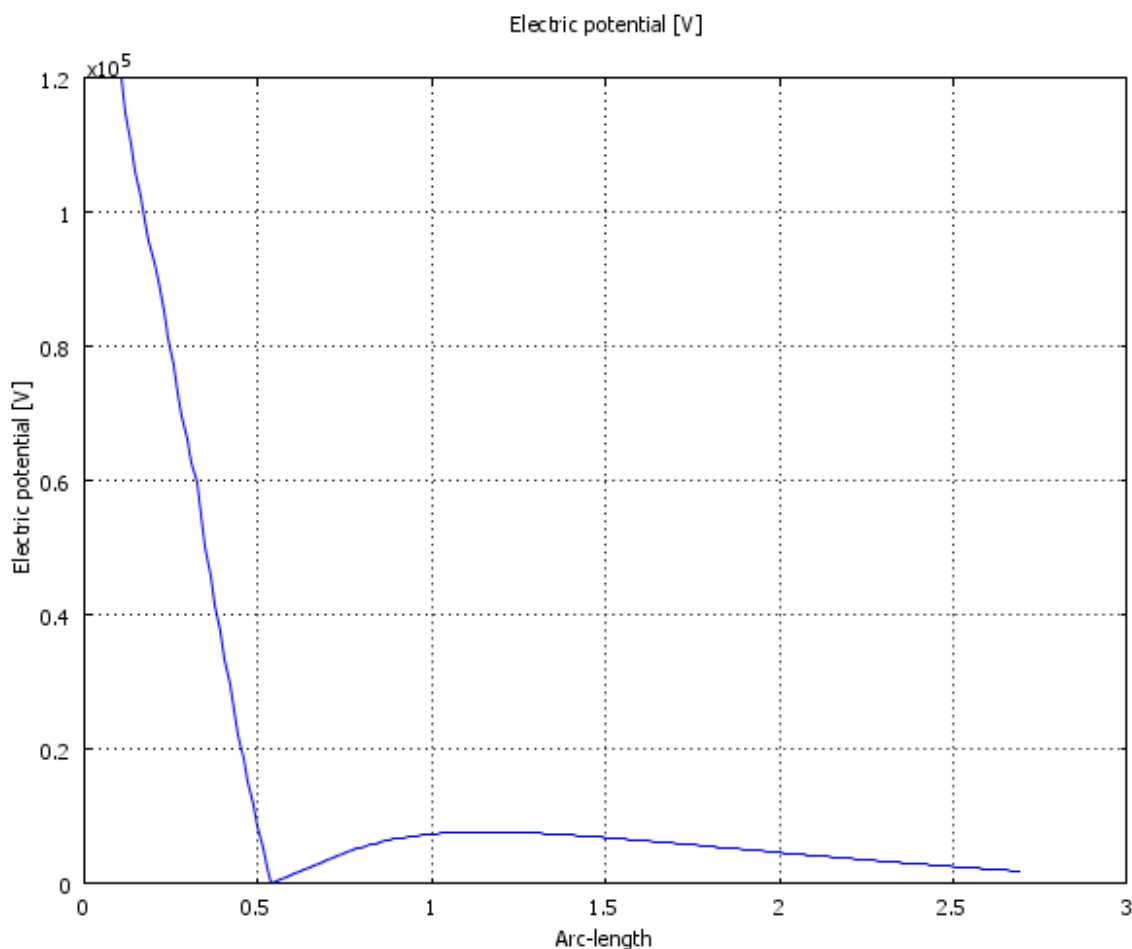
Nakon što se učitava gotova geometrija za razmatrani slučaj, potrebno je postaviti granične slučajeve. Lijevi zid, koji predstavlja površinu bušinga, postavlja se na prvi sloj vrijednost potencijala na 120000[V], zatim na drugi sloj vrijednost potencijala 90000[V], te na idući

60000[V] i posljednji sloj na 30000[V], dok su dijelovi koji dodiruju površinu bušinga na opciji *Continuity* iz komandnog prozora, koji se dobije biranjem komande **Physics/Boundary Settings**. Gornja i donja stranica se postavljaju na opciju *Axial symmetry*, dok se ostale stranice postavljaju na *Ground*. Potom se postavljaju osobine materijala pomoću opcije **Physics/Subdomain Settings**. Za donji pravougaonik se postavlja vrijednost $\epsilon_r = 2.2$, jer on simulira transformatorsko ulje. Za lijevi objekat se postavlja $\epsilon_r = 7$, jer on simulira bakelit, dok za gornji pravougaonik je $\epsilon_r = 1$, jer predstavlja zrak. Nakon što je završeno uređivanje graničnih uslova i osobina materijala, komandom **Postprocessing/Plot Parameters** se na dijelu *General* biraju pod odjeljkom *Plot type* opcije *Contour* i *Geometry edges*. Nakon toga, komandama **Mesh/Initialize Mesh** i **Solve/Solve Problem** se dobiva rezultat simulacije, koji je prikazan na slijedećoj slici:



Slika 18. Raspodjela električnog potencijala u bušingu sa kapacitivnim gradiranjem polja

Odabirom komande **Draw Line for Cross-Section Line Plot** sa lijeve komande trake pored simulacijskog prozora, te povlačenjem preko modela, dobiva se slijedeći grafik koji predstavlja promjenu električnog potencijala:



Slika 19. Promjena električnog potencijala u bušingu sa kapacitivnim gradiranjem polja

Zaključak

Sa dobivenim graphicima i raspodjelama, može se zaključiti da je model bušinga sa kapacitivnim gradiranjem polja dobro simuliran. Ova vrsta bušinga ima bolje karakteristike u odnosu na bušing bez gradiranja izolacije, što se može i zaključiti sa slika 17 i 19. Potencijal u slučaju bušinga sa kapacitivnim gradiranjem polja brže opada u odnosu na bušing bez gradiranja izolacije, te i za iste udaljenosti od samog bušinga, vrijednost potencijala je niža za slučaj bušinga sa kapacitivnim gradiranjem polja. Nedostatak ove izvedbe je što je skuplja izvedba, složenija izrada, te i sama činjenica da se koriste nabojem nabijene aluminijske folije, koje imaju određen vijek trajanja.

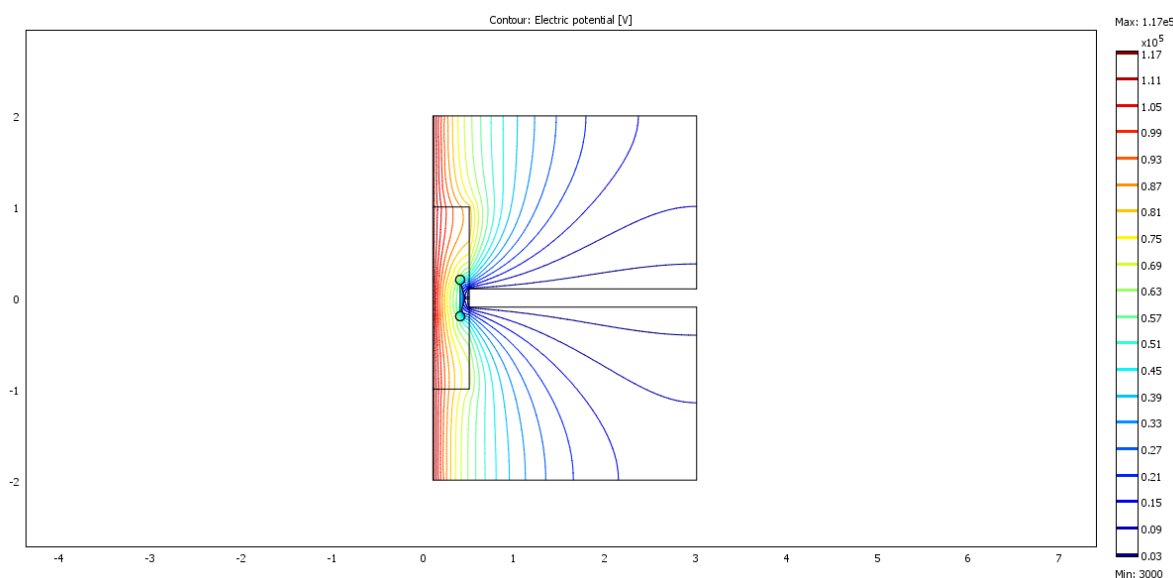
Zadatak 3

Opis vježbe

U toku vježbe bit će izvršena analiza postojećih modela pojednostavljenih bušinga. Potrebno je analizirati problem za bušing sa gradiranjem polja putem ekranizirajućih elektroda.

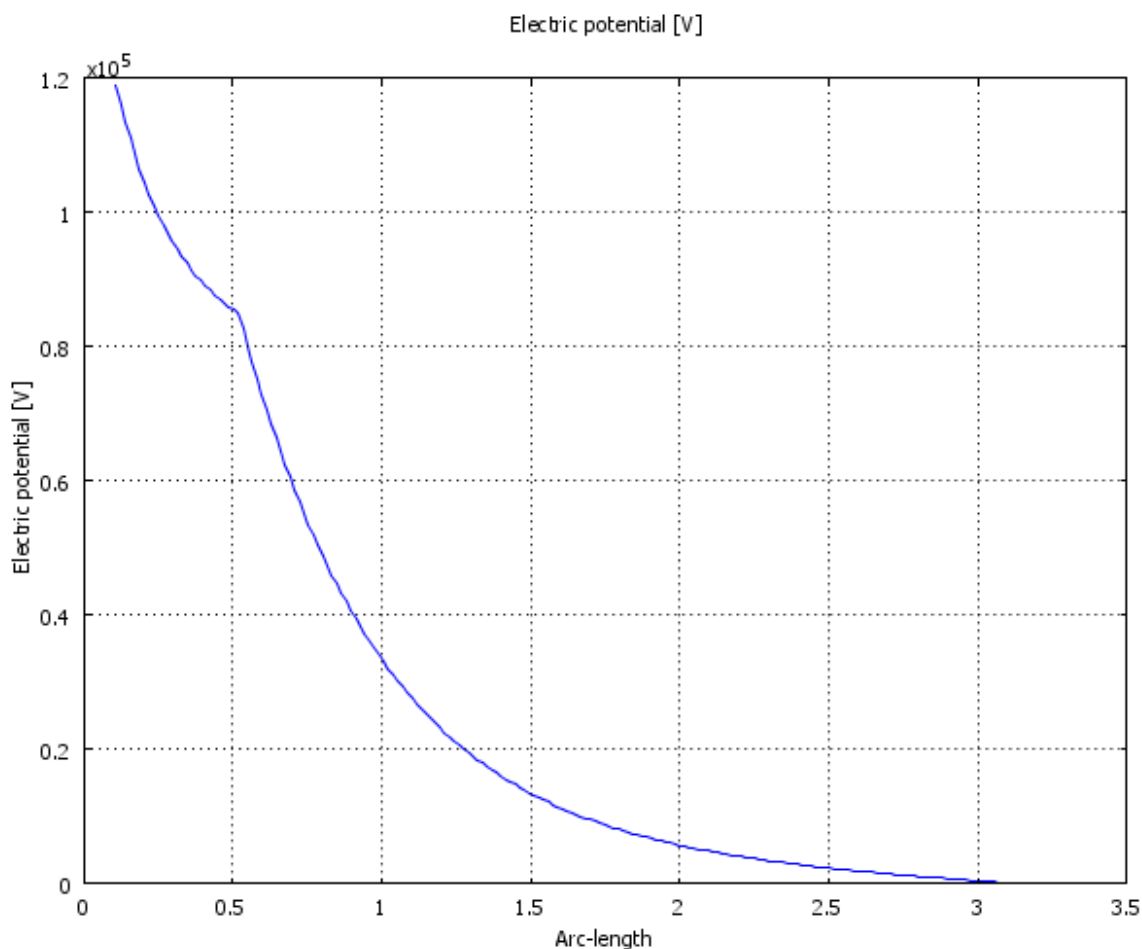
Analiza rezultata

Nakon što se učita gotova geometrija za razmatrani slučaj, potrebno je postaviti granične slučajeve. Lijevi zid se postavlja na potencijal od 120000[V], dok su dijelovi koji dodiruju površinu bušinga i elektrode na opciji *Continuity* iz komandnog prozora, koji se dobije biranjem komande **Physics/Boundary Settings**. Gornja i donja stranica se postavljaju na opciju *Axial symmetry*, dok se ostale stranice postavljaju na *Ground*. Potom se postavljaju osobine materijala pomoću opcije **Physics/Subdomain Settings**. Za donji pravougaonik se postavlja vrijednost $\epsilon_r = 2.2$, jer on simulira transformatorsko ulje. Za lijevi objekat se postavlja $\epsilon_r = 7$, jer on simulira bakelit, dok za gornji pravougaonik i elektrode je $\epsilon_r = 1$, jer predstavlja zrak. Zatim se prelazi na modul za izmjenične veličine, pošto se gradiranje izolacije sa ekranizirajućim elektrodama za bušing izvodi tako što se elektrode priključuju na izmjenični napon. Modul za izmjenične veličine se aktivira odabirom modula *Conductive media DC (emdc)* iz menija *Model Tree*. Ponavlja se isti postupak postavljanja graničnih uslova i osobina materijala. U komandnom prozoru, koji se dobiva korištenjem komande **Physics/Subdomain Settings**, se odabira kompozitni region elektroda, te uz opciju *Load...* otvara prozor koji sadrži izbore materijala. Iz tog prozora se bira materijal *Copper* (bakar), da bi se uzele u obzir sve osobine bakra u razmatranom modelu. Nakon što je završeno uređivanje graničnih uslova i osobina materijala, komandom **Postprocessing/Plot Parameters** se na dijelu *General* biraju pod odjeljkom *Plot type* opcije *Contour* i *Geometry edges*. Nakon toga, komandama **Mesh/Initialize Mesh** i **Solve/Solve Problem** se dobiva rezultat simulacije, koji je prikazan na slijedećoj slici:



Slika 20. Raspodjela električnog potencijala u bušingu sa gradiranjem polja putem ekranizirajućih elektroda

Odabirom komande **Draw Line for Cross-Section Line Plot** sa lijeve komande trake pored simulacijskog prozora, te povlačenjem preko modela, dobiva se slijedeći grafik koji predstavlja promjenu električnog potencijala:



Slika 21. Promjena električnog potencijala u bušingu sa gradiranjem polja putem ekranizirajućih elektroda

Zaključak

Sa dobivenim graphicima i raspodjelama, može se zaključiti da je model bušinga gradiranjem polja putem ekranizirajućih elektroda dobro simuliran. Razmatrana izvedba bušinga ima najbolje karakteristike, u poređenju sa bušingom sa kapacitivnim gradiranjem polja i sa bušingom bez gradiranja izolacije, no ujedno je i najskuplja i najzahtjevnija izvedba. Prema dobivenoj promjeni električnog potencijala, koja je prikazana na grafiku sa slike 21, može se primjetiti da na udaljenosti 2.5 [m] potencijal skoro pa pada na vrijednost 0 [V], što je izuzetno dobro u odnosu na iste udaljenosti u poređenju sa već pomenute druge dvije izvedbe bušinga. Nedostatak ove izvedbe je korištenje elektroda, koje zbog svoje geometrije su izloženi parcijalnim pražnjenjima, puzajućim strujama i raznim drugim naprežanjima, što zahtjeva kompleksno rješenje tog problema.