Ta dokument so hkrati navodila za pripravo seminarja in tudi primer (predloga) seminarja. Ustrezno ga preoblikujte glede na vaš konkreten primer.Seminar je potrebno oddati asistentu najkasneje ob zadnji laboratorijski vaji. Predlagamo, da ga pokažete asistentu na predzadnji vaji ali prej, da prejmete koristne informacije kako izboljšati oz. dopolniti manjkajoče dele seminarja.



## Seminar pri predmetu Osnove Elektrotehnike I UNI, 2017

1 del:

# Izris polja v osi tokovne zanke

2 del:

# Polje med naelektrenima telesoma

Ime in Priimek, vpisna številka, skupina

Ljubljana, datum

### Navodila za izdelavo seminarja pri predmetu Osnove Elektrotehnike 1 UNI, prof. dr. Dejan Križaj

Študent se pri izdelavi seminarja seznani z uporabo računalniških programov za podporo razumevanja električnih pojavov. Seminar naj bo sestavljen je iz dveh delov. V prvem delu si študent izbere poljubno analitično funkcijo, ki opisuje odvisnost določene veličine od časa ali kraja, jo zapiše v primernem računalniškem orodju in izdela grafe. Med ustrezne računalniške programe za izris grafov štejemo predvsem Matlab ali njegove klone (Octave, ScilLab ipd.), Matematica ali Python. Osnovni potrebni elementi seminarja so:

- Naslov
- Zapis enačbe
- Grafičen prikaz krivulj, ki vsebujejo
  - o Opis osi
  - o Legendo oziroma ustrezno označitev krivulj in njihov opis v tekstu
- Opis grafa v tekstu
- Literatura
- Prikaz kode za izris

Poleg osnovnih potrebnih elementov se šteje za boljšo izvedbo, če se uporabi za prikaz enačbo, ki je manj "standardna" in ste jo izpeljali sami ali našli v strokovni literaturi, lahko tudi na spletu.

V drugem delu lahko izberete poljubno programsko orodje za numeričen izračun električnega ali tokovnega polja v 2D prostoru in izrišete grafe. Predlagamo uporabo programa FEMM (Finite elements magnetics), lahko pa tudi Argos2D ali kaj podobnega. Osnovne potrebni elementi seminarja so:

- Naslov
- Prikaz simulirane strukture z uporabljenimi robnimi pogoji
- Opis električnih lastnosti materialov (prevodnosti ali dielektričnosti)
- Prikaz mreže, na kateri je narejen numeričen izračun
- Prikaz rezultatov:
  - Ekvipotencialne ravnine
  - Potencial z barvami
  - Polje (električno, tokovno) z barvami in puščicami
- Komentar rezultatov

Poleg tega izvedite znotraj programa integracijo po liniji ali po površini da izračunate npr:

- Napetost z integracijo polja po poti, površinski naboj z integracije gostote naboja, ...
- Energijo z integracijo gostote energije ali moč z integracijo gostote moči

Poleg osnovnih potrebnih elementov, se šteje za boljšo izvedbo, če se naredi simulacijski model nekega konkretnega problema ter se izvede določeno analizo, npr. kako se spremeni določena veličina (napetost, tok, kapacitivnost, upornost, ...), če se spremeni določen parameter, npr. razdalje, geometrija, električne lastnosti, ipd.

V nadaljevanju je prikazan primer možne izvedbe:

## Izris magnetnega polja v osi tokovne zanke

### 1. Enačba

Izhajamo iz enačbe za polje (gostoto magnetnega pretoka) v osi tokovne zanke, kjer je R polmer zanke, z pa oddaljenost točke na Z osi,  $\mu_0$  je permeabilnost vakuuma, I je tok v zanki:

$$\vec{B} = \vec{e}_z \frac{\mu_0 I R^2}{2 \left(z^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

#### 2. Rezultati

#### Polje v osi ene zanke

Na sliki 1 je prikazano polje v osi tokovne zanke s središčem pri x0=0 za tokovno zanko polmera 1 m s tokom 1 A. Kot pričakovano, je polje največje v središču osi zanke.



Slika 1: Polje v osi ene zanke

#### Magnetno polje v osi dveh tokovnih zank

Na sliki 2a je prikazana komponenta magnetnega polja vzdolž osi ene tokovne zanke pri x=0 polmera 1 m, ene tokovne zanke polmera 1m pri x=-2m ter seštevek njunih polj. Tok v vsaki od tuljav je 1 A. Na sliki 2b je prikazan primer, ko sta tokovni zanki razmaknjeni za 1m, torej enako, kot je polmer zank. Takemu paru rečemo Helmholtzov par (tuljav), ki ustvari med tuljavama sorazmerno homogeno magnetno polje.



Slika 2a: Polje v osi dveh zank ter njuna vsota



Slika 2b: Polje v osi dveh zank ter njuna vsota pri enaki razdalji med zankama, kot je polmer zank. Tej postavitvi rečemo Helmholtzov par.

#### 3. Programska koda

Ker bomo pri izračunu večkrat uporabili izraz za polje v osi tokovne zanke, bomo v Matlabu definirali funkcijo s parametri, ki omogočajo izračun polja za poljuben odmik od središča in polmer zanke.

Funkcija *poljevosizanke* izriše polje v osi zanke za parametre x0 (odmik središča zanke na osi), R (polmer zanke), xmin (minimalna vrednost na X osi za izris), xmax (max vrednost na osi za izris)

Programska koda v Matlabu za izris prvega grafa: B0=poljevosizanke(0,1,-5,5) xlabel('Razdalja / m') ylabel('Gostota magnetnega pretoka / T')

Programska koda v Matlabu za izris drugega grafa: x=linspace(-5,5,200); B0=poljevosizanke(-2,1,-5,5) hold on B2=poljevosizanke(0,1,-5,5) plot(x,B0+B2,'r') xlabel('Razdalja / m') ylabel('Gostota magnetnega pretoka / T')

legend('ena zanka', 'ena zanka', 'skupno')

Zapis funkcije:

```
function [B]=poljevosizanke(x0,R,xmin,xmax)
global x
set(0,'DefaultLineLineWidth',1.5)
mi0=4*pi*1e-7;
I=1; % TOK
x=linspace(xmin,xmax,200);
B=0.5*mi0*I*R^2./(R^2+(x-x0).^2).^(1.5);
plot(x,B)
```

#### 4. Literatura

Dejan Križaj, Osnove elektrotehnike II - Magnetika, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2012, str.
 28.

#### 2 del seminarja:

# Polje med naelektrenima telesoma

### 1. Simulacijska struktura

Izberem si preprost model 2D simulacije električnega polja med dvema namišljenima naelektrenima strukturama, ena je v obliki plošče, druga v obliki lune. Plošča na levi bo na potencialu 0 V, elektroda v obliki lune na desni strani (glej sliko spodaj) pa bo na potencialu 100 V, torej bo napetost med njima 100 V. V okolici naj bo zrak z relativno dielektričnostjo 1.



Slika 3: Simulacijska struktura.

Ko so ustrezno opisani robni pogoji in lastnosti materialov (v konkretnem primeru le zrak z epsr=1) izvedem generacijo mreže. Rezultat je prikazan na sliki 4. Struktura je razdeljena na 5733 elementov. Tako velik je tudi sistem enačb, ki ga reši program.



Slika 4: Mreža simulacijske strukture.

Program reši diskretizirano Poissonovo enačbo z metodo končnih elementov.

### 2. Rezultati

#### Porazdelitev potenciala in električne poljske jakosti

Slika 5 prikazuje porazdelitev potenciala med naelektreno ploščo in klinom. Potencial se najhitreje spreminja v smeri od točke na klinu, ki je najbližje plošči. Tu pričakujemo tudi največjo električno poljsko jakost, kar ugotovimo tudi, če namesto potenciala izrisujemo v barvah vrednosti električne poljske jakosti (absolutno vrednost), slika 6.



Slika 5: Porazdelitev potenciala po strukturi.

P	<u>ــــــــــــــــــــــــــــــــــــ</u>
₀zrak	1.900e+005 : >2.000e+005 1.800e+005 : 1.900e+005
	1.700e+005 : 1.800e+005
	1.600e+005 : 1.700e+005
	1.500e+005 : 1.600e+005
	1.400e+005 : 1.500e+005
	1.300e+005 : 1.400e+005
1	1.200e+005 : 1.300e+005
	1.100e+005 : 1.200e+005
	1.000e+005 : 1.100e+005
	9.000e+004 : 1.000e+005
elek2	8.000e+004 : 9.000e+004
	7.000e+004 : 8.000e+004
	6.000e+004 : 7.000e+004
	5.000e+004 : 6.000e+004
ele <mark>k1</mark>	4.000e+004 : 5.000e+004
	3.000e+004 : 4.000e+004
	2.000e+004 : 3.000e+004
	1.000e+004 : 2.000e+004
	<0.000e+000 : 1.000e+004
	Density Plot:  E , V/m

Slika 6: Porazdelitev električne poljske jakosti.

Lahko tudi hkrati rišemo ekvipotencialne ravnine (črne krivuje), električno polje pa v barvah in s puščicami, kar prikazuje slika 7:



Slika 7:Električna poljska jakost (v barvah absolutna vrednost, puščice smer in velikost) in ekvipotencialne ravnine (20, torej napetost med sosednjima 100V/20=5V).

Ugotovimo, da je večje polje koncentrirano na treh mestih, na robovih leve elektrode, ki so bližje desni elektrodi in na mestu desne elektrode, ki je najbližje levi elektrodi.

#### Izris polja in potenciala vzdolž linije



Slika 8: Levo porazdelitev potenciala in desno porazdelitev absolutne vrednosti električne poljske jakosti od sredine leve do sredine desne elektrode (med točkama A in B na sliki 3).

#### Integracija gostote naboja in gostote energije

Če integriramo normalno komponento vektorja D (D.n) po zaključeni krivulji (Gaussov zakon) je rezultat enak zaobjetemu naboju. To smo naredili po liniji okoli leve elektrode (glej sliko spodaj) in dobili vrednost - 2.23644e-011 C/m. Enako lahko naredimo okoli desne elektrode in bomo dobili podoben rezultat. Ker poznamo naboj na elektrodah in napetost, lahko določimo

kapacitivnost med elektrodama, ki je  $C = \frac{Q}{U} = 2,23 \cdot 10^{-13}$  F/m . Rezultat je v F/m ker gre za 2D

simulacijo.



Integracija gostote energije

Rezultat integracije gostote energije je celotna elektrostatična energija W=1.12822e-009 J/m. Iz tega rezultata tudi lahko določimo kapacitivnost, ki je

 $C = \frac{2W}{U^2} = \frac{2.1,12822.10^{-9} \text{ J/m}}{(100\text{V})^2} \approx 2,25.10^{-13}\text{ F/m}$ . Rezultat je nekoliko različen od prejšnjega izračuna

zaradi razlik pri numeričnem izračunavanju. (Pri simulaciji tokovnega polja namesto integracije gostote naboja izvedemo integracijo gostote toka in dobimo tok v/iz elektrode ter posledično upornost med elektrodama. Upornost lahko določimo tudi iz moči, ki jo dobimo z integracijo gostote moči po volumnu – v 2D po površini)

#### 3. Literatura

Naštej uporabljeno literaturo