

Naloga 3

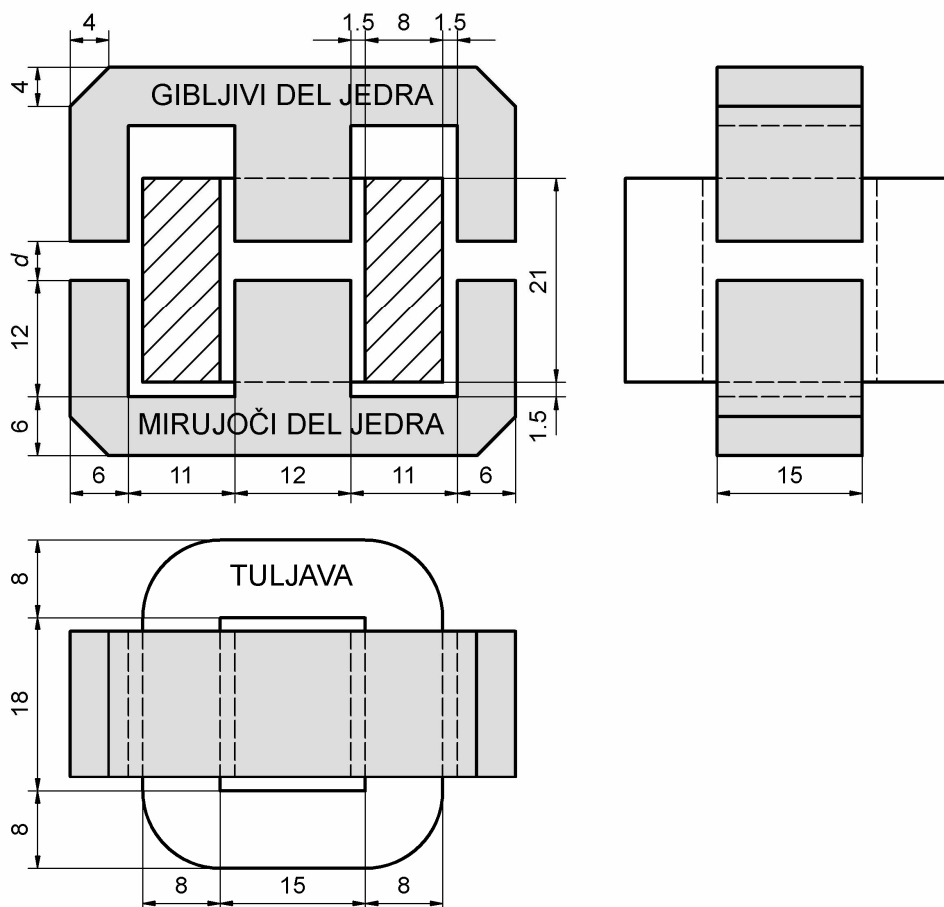
Ime in priimek: **Timotej Klemenčič**

Datum: **11.11.2021**

Ocena:

Elektromagnetni aktuator kontaktorja ima tuljavo z 2200 ovoji, feromagnetno jedro pa je iz pločevine z relativno permeabilnostjo 1000. Načrt jedra s tuljavo je na sliki 1, vse dimenzije so podane v milimetrih. Gibljivi del jedra oz. kotva se premika vertikalno, tako da se reža d spreminja med vrednostima 0 in 4 mm.

- Napišite analitične enačbe za izračun induktivnosti navitja s pomočjo reluktančnega vezja in izračunajte induktivnost, ko je kotva v skrajnem zgornjem položaju ($d = 4$ mm). Pri izračunu ustrezno upoštevajte robni pojav pri zračnih režah.
- Izračunajte upornost tuljave, če je le-ta izdelana iz bakrene žice in ima temperaturo 45°C . Tuljava zaseda šrafirani prostor, polnilni faktor bakra pa je 10 %.
- Analitične enačbe za induktivnost (točka a) uporabite v preglednici (npr. *Excel*, *Calc* ipd.) ter izračunajte odvisnost induktivnosti tuljave od velikosti zračne reže (od 0 mm do 4 mm, s korakom 0,2 mm). V vsakem položaju izračunajte še izgube v navitju, če je tuljava priključena na izmenično omrežno napetost 230 V, 50 Hz. Rezultate v poročilu predstavite tabelarično in v diagramu.
- V programu FEMM izdelajte magnetostatični model aktuatorja in izračunajte induktivnosti tuljave v začetni in končni poziciji kotve iz točke c. Rezultate primerjajte z analitično izračunanimi.

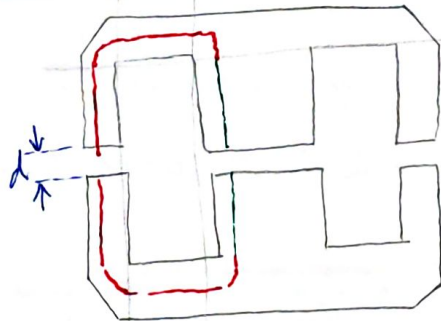


Slika 1: Geometrija in dimenzije (v mm) aktuatorja kontaktorja.

$$N = 2200$$

$$\mu_r = 1000$$

$$d = 0,4 \text{ mm}$$



a) $d = 4$

zračunati želimo induktivnost navitja splošno reluktničnega vezja. Pri izračunu moramo upoštevati robni pojav pri zračni reži.

Reluktance računamo ločeno za zračno režo in za jedro.

RELUKTANCA JEDRA:

$$R_{Fe} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l_{Fe}}{A_{Fe}}$$

Reluktanca 1. stebra

$$R_{Fe1} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000} \cdot \frac{0,06485}{9 \cdot 10^{-5}}$$

$$R_{Fe1} = 573400 \text{ A/Vs}$$

$$R_{Fe2} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000} \frac{0,024}{1,8 \cdot 10^{-4}}$$

$$R_{Fe2} = 106103 \text{ A/Vs}$$

$$R_{Fe3} = R_{Fe1} = 573400 \text{ A/Vs}$$

Zračunamo dolžino poti magnetenja v železu:

Ločimo na 3 dele na 1., 2. in 3. stebra.

Na sliki sta označeni z rdečo pot 1. stebra, z zeleno pot 2. stebra. Upoštevamo tudi, da sta

poti 1. in 3. stebra enaki.

POTI MAGNETENJA V ŽELEZU

$$l_{Fe1} = 12 + 12 + 11 + 11 + 2\pi \frac{6}{2} = 64,85 \text{ mm}$$

$$l_{Fe2} = 12 + 12 = 24 \text{ mm}$$

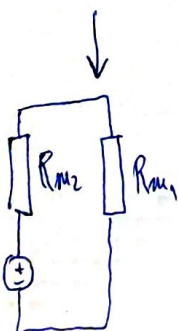
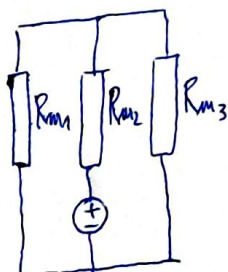
$$l_{Fe3} = l_{Fe1} = 64,85 \text{ mm}$$

POVRŠINA JEDRA:

$$A_{Fe1} = 6 \text{ mm} \cdot 15 \text{ mm} = 90 \text{ mm}^2 = 9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$A_{Fe2} = 12 \text{ mm} \cdot 15 \text{ mm} = 180 \text{ mm}^2 = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{Fe3} = A_{Fe1} = 90 \text{ mm}^2 \cdot 9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$



Reluktance se da štetiti podobno kot uporosti. Pro potrebuje mo skupne reluktance po stebrih in zračni reži. Zato potrebuje mo še reluktance v zr. reži. Za izračun teh moramo upoštevati robni pojav.

$$A_d = A_{j1} \cdot f_d$$

--- upoštevamo robnega pojav v zr. reži

$$f_d = 1 + 20 \frac{d}{A_j 0,45}$$

Ker pride do stesanja polja na 5 zr. reži, moramo "povečati" površino jedra reže na območju kjer nas zanima. V našem primeru na stebra 1, 2 in 3. Stebra 1 in 3 sta ponovno enaka.

$$A_{j1} = A_{Fe1}$$

$$A_{j2} = A_{Fe2}$$

$$A_{j3} = A_{j1} = A_{Fe1}$$

$$f_{d1} = 1 + 20 \frac{d}{A_{j1}^{0,45}} = 1 + 20 \cdot \frac{0,004}{(9 \cdot 10^{-5})^{0,45}} = \underline{6,29}$$

$$A_{d1} = A_{j1} \cdot f_{d1} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot 6,29 = \underline{56,61 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$f_{d2} = 1 + 20 \cdot \frac{d}{A_{j2}^{0,45}} = 1 + 20 \cdot \frac{0,004}{(18 \cdot 10^{-5})^{0,45}} = \underline{4,87}$$

$$A_{d2} = A_{j2} \cdot f_{d2} = 18 \cdot 10^{-5} \cdot 4,87 = \underline{87,66 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$R_{d1} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{d}{A_{d1}} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0,004}{56,66 \cdot 10^{-5}} = \frac{7,06}{4\pi \cdot 10^{-7}} = \underline{5618169 \text{ H}^{-1}}$$

$$R_{d2} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{d}{A_{d2}} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{0,004}{87,66 \cdot 10^{-5}} = \frac{4,56}{4\pi \cdot 10^{-7}} = \underline{3628733 \text{ H}^{-1}}$$

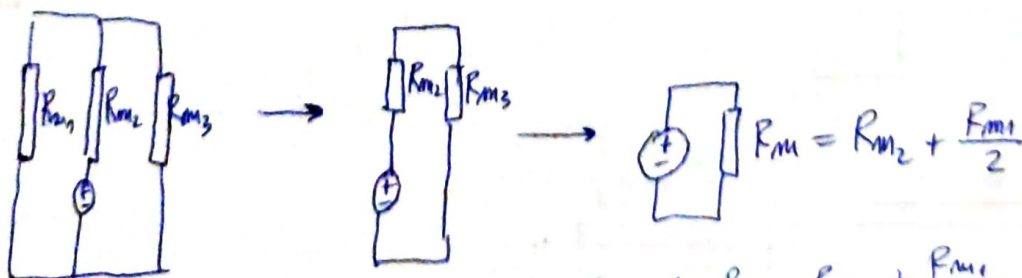
~~R_{m1} = R_{Fe1} + R_{d1}~~

Skupno reluktanco izračunamo tako, da najprej izračunamo skupno reluktanco po stebrih v reži in železu.

$$R_{m1} = R_{d1} + R_{Fe1} = 5618169 + 573400 = \underline{6191569 \text{ A/Vs}}$$

$$R_{m2} = R_{d2} + R_{Fe2} = 3628733 + 106103 = \underline{3734832 \text{ A/Vs}}$$

$$R_{m3} = R_{m1} = \underline{6191569 \text{ A/Vs}}$$



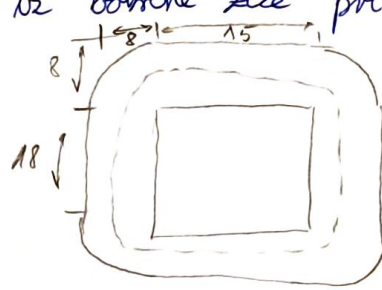
Skupno reluktanco zračunamo po formuli $R_m = R_{m2} + \frac{R_{m1}}{2}$

$$R_m = R_{m2} + \frac{R_{m1}}{2} = 3734832 + \frac{6191569}{2} = \underline{6830616,5 \text{ A/Vs}}$$

In induktivnost po enačbi:

$$\textcircled{2} \quad L = \frac{N^2}{R_m} = \underline{0,71 \text{ H}}$$

⑥ Izračunati želimo uporabo taljave Φ izdelane iz bobrene žice pri $T = 45^\circ\text{C}$,
 polnilni faktor bobra je 10%.



$$A_{ob} = 8 \cdot 21 = 168 \text{ mm}^2 \cdot 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{cu} = A_{ob} \cdot k_{cu} = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 0,1 = \underline{1,68 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = \text{polnilni faktor bobra}$$

$$l_{gr} = 2 \cdot 18 + 2 \cdot 15 + 2\pi \frac{8}{2} = 91,13 \text{ mm} = \underline{0,091 \text{ m}} \quad \text{OVINKI}$$

$$l_{\Sigma} = N \cdot l_{gr} = 2200 \cdot 0,091 = \underline{200,2 \text{ mm}}$$

$$A_{\Sigma} = \frac{A_{cu}}{N} = \frac{1,68 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2}{2200} = 7,64 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 = \underline{7,64 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2}$$

Za izračun uporosti si pomagamo s tabelo standardnih presekov
 žic. Izberemo žico, ki je po preseku najbližja izračunani.

To je žica s površino $0,00785 \text{ mm}^2 \rightarrow$ iz tabele dobimo tudi
 podatek o uporosti /m, vzanemo nominalno vrednost $2,176 \Omega/\text{m}$ pri 20°C

Dolžina naše žice je $200,2 \text{ m}$, tako da uporabimo celotnega navitja izračunamo

$$R_{\Sigma 20^\circ\text{C}} = 200,2 \text{ m} \cdot 2,176 \Omega/\text{m} = 435,6 \Omega$$

Ker nas zanima uporost pri 45°C izračunamo uporost po spodnji formuli:

$$\alpha = 0,00386 \dots \text{ za baker}$$

$$R_{\Sigma 45^\circ\text{C}} = R_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha (T - T_{ref})) = 435,6 \Omega (1 + 0,00386 (45^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}))$$

$$\underline{R_{\Sigma 45^\circ\text{C}} = 469,23 \Omega}$$

Za naš primer žice, lahko uporabimo zračunano s specifično prevodnostjo bobra.

$$S_{Baker} = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Sm pri } 20^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 0,00386$$

$$R_{20^\circ\text{C}} = S_{20^\circ\text{C}} \frac{l_{\Sigma}}{A_{\Sigma}} = 1,68 \cdot 10^{-8} \frac{200,2 \text{ m}}{7,64 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2} = 440 \Omega$$

$$R_{45^\circ\text{C}} = R_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha (T_{45^\circ\text{C}} - T_{20^\circ\text{C}})) = 440 \cdot (1 + 0,00386 \cdot (45 - 25)) = \underline{482,66 \Omega}$$

③

$$c) U = 230V$$

$$f = 50Hz$$

Izbral sem uporabo $482,46 \Omega$ za nadaljnje računanje.

Ker gre za izmerjeno napetost moramo izračunati impedanco taljave

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(482,46 \Omega)^2 + (2\pi \cdot 50 \cdot 0,71)^2} = 531,5 \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{230V}{531,5 \Omega} = 0,433 A$$

$$P = I^2 \cdot R = 0,433^2 \cdot 482,46 = \underline{\underline{90 W}}$$

d) V FEMM-u

$$J_z = \frac{I}{A_z} = \frac{0,433 A}{7,64 \cdot 10^{-3} m^2} = 56,7 A/mm$$

$$\frac{2A \cdot d = 4 mm}{W_m = 2,2 J}$$

$$1,68 \cdot 10^{-5}$$

$$W_m = \frac{L \cdot I^2}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} = \frac{2,2 J \cdot 2}{0,433^2} = \underline{\underline{23,47 H}}$$

→ Iz FEMM-a dobim podatek o energiji po celi površini obklice in jekla. Iz podatka o W_m , nato računam induktivnost L .

$$L = 0,71 H$$

$$I = 0,433 A$$

$$\rightarrow W_m = \frac{0,71^2 \cdot 0,433^2}{2} = 0,0665 \text{ Bi morali dobiti s FEMM}$$

Za $d = 0 mm$

$$W_m = 122,3 J$$

Vrednosti pridobljene iz FEMM se preveč razlikujejo od računanih vrednosti.

$$L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} = \frac{122,3 \cdot 2}{0,433^2} = \underline{\underline{1304 H}}$$