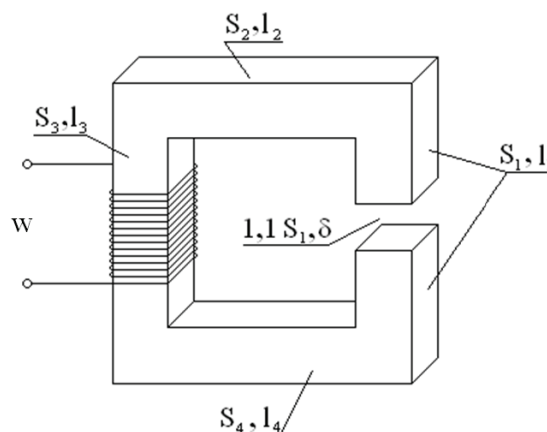
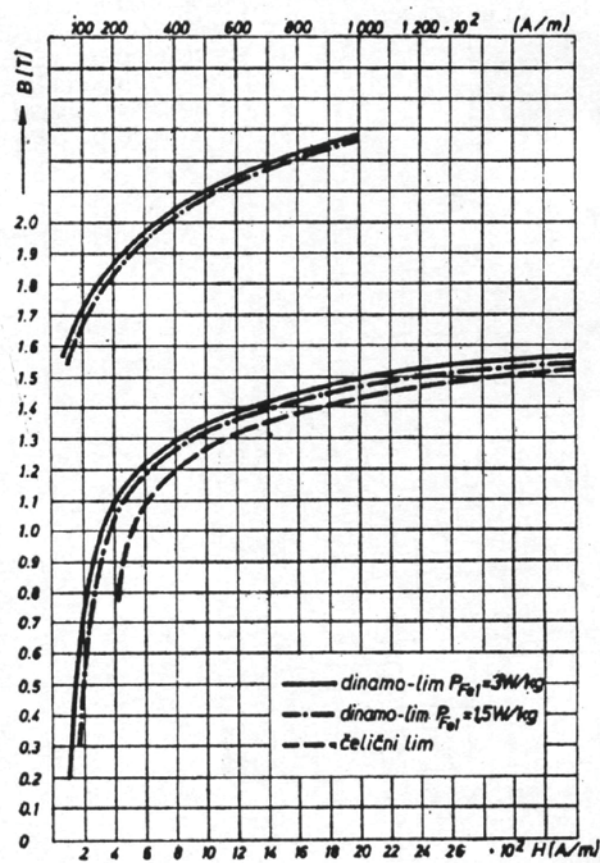


Proračun magnetskog kruga

Napomena uz zadatke: pri rješavanju zadataka s većim brojem brojčanih operacija obično se međurezultati zaokružuju, pa se račun nastavlja uvrštavanjem tako zaokruženih vrijednosti. Ako se više operacija spoji, koristeći se memorijom računala, može se konačni rezultat razlikovati ovisno o postupku računanja. Još veća odstupanja nastaju zbog neizbježnih razlika u očitavanju s grafički prikazanih ovisnosti – npr. s krivulje magnetiziranja. Tu treba tražiti razloge za moguće odstupanje u posljednjoj znamenici rezultata koji su navedeni u postupku rješavanja.

- 19.1.1. Magnetski krug prema slici 19.8. napravljen je od dinamo-lima 3 W/kg s karakteristikom prema sl. 19.1. Dimenzije su mu: $S_1 = 12 \text{ cm}^2$, $l_1 = 10,8 \text{ cm}$, $S_2 = 10 \text{ cm}^2$, $l_2 = 14 \text{ cm}$, $S_3 = 10 \text{ cm}^2$, $l_3 = 11 \text{ cm}$, $S_4 = 10 \text{ cm}^2$, $l_4 = 14 \text{ cm}$ i $\delta = 2 \text{ mm}$. Presjek u zračnom rasporu valja uzeti da je $1,1S_1$ zbog silnica s bočnih strana. Kolika je struja potrebna u namotu s $w = 1000$ zavoja da bi se u rasporu dobila indukcija od $B_0 = 0,9 \text{ T}$?



$$S_0 = 1,1S_1 = 1,1 \cdot 12 = 13,2 \text{ cm}^2$$

$$\Phi = S_0 B_0 = 13,2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9 = 1,188 \text{ mVs}$$

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{1,188 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 10^{-4}} = 0,99 \text{ T}$$

$$H_1 = 300 \text{ A/m}$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{1,188 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = 1,19 \text{ T} = B_3 = B_4$$

$$H_2 = H_3 = H_4 = 520 \text{ A/m}$$

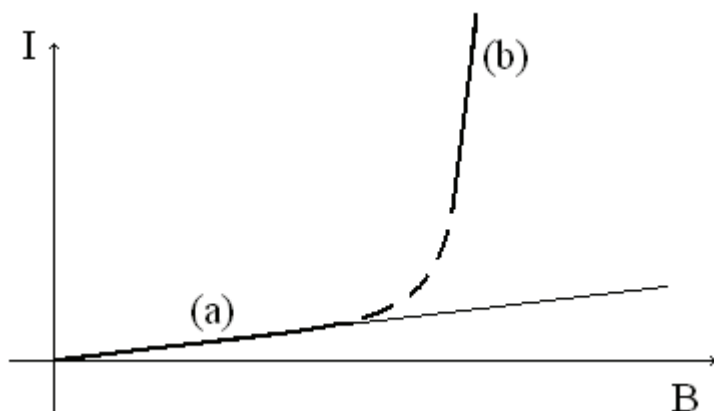
$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0,9}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 716197 \text{ A/m}$$

$$wI = H_1 l_1 + H_2 (l_2 + l_3 + l_4) + H_0 \delta =$$

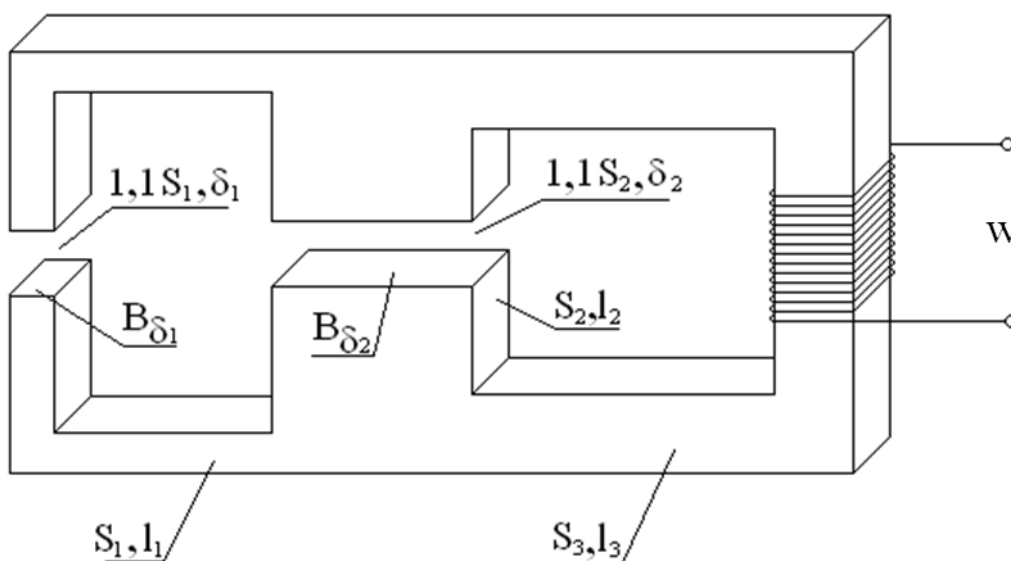
$$= 300 \cdot 0,108 + 520(0,14 + 0,11 + 0,14) + 716197 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 1667,6 \text{ A}$$

$$I = \frac{1667,6}{1000} \approx 1,67 \text{ A}$$

- 19.1.2. Kako bi (kvalitativno) izgledala karakteristika ovisnosti struje I o indukciji B u rasporu iz 1. zadatka: a) pri malom zasićenju u željezu, gdje se magnetski napon za željezo može zanemariti; b) pri visokom zasićenju u željezu, uz $\mu \approx \mu_0$?



- 19.1.3. Magnetski krug prema slici, od dinamo-lima 3 W/kg, ima dimenzije:
 $S_1 = 8 \text{ cm}^2$, $l_1 = 20,8 \text{ cm}$, $S_2 = 40 \text{ cm}^2$, $l_2 = 10 \text{ cm}$, $S_3 = 15 \text{ cm}^2$, $l_3 = 20 \text{ cm}$,
 $\delta_1 = 2 \text{ mm}$ i $\delta_2 = 10 \text{ mm}$. Kolika je struja potrebna u namotu s $w = 710$ zavoja da bi se dobila indukcija $B_{\delta_1} = 1,1 \text{ T}$? Kolika je tada indukcija B_{δ_2} ?



$$\Phi_{\delta_1} = B_{\delta_1} S_1 \cdot 1,1 = 1,1 \cdot 8 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1 = 9,68 \cdot 10^{-4} \text{ Vs}$$

$$B_1 = \frac{\Phi_{\delta_1}}{S_1} = 1,1 \cdot B_{\delta_1} = 1,21 \text{ T} \quad \rightarrow \quad H_1 = 591 \text{ A/m}$$

$$H_{\delta_1} = \frac{B_{\delta_1}}{\mu_0} = \frac{1,1}{4\pi 10^{-7}} = 875 \,352 \text{ A/m}$$

$$H_1 l_1 + H_{\delta_1} \delta_1 = 591 \cdot 0,208 + 875 \,352 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 1873 \text{ A} \approx H_{\delta_2} \delta_2$$

Ovdje smo pretpostavili da je opravdano zanemariti magnetski pad napona na željezu drugog stupa u usporedbi s magnetskim padom napona na drugom zračnom rasporu. To možemo provjeriti tako da provedemo detaljniji proračun:

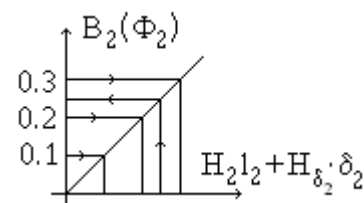
B_2	$\Phi_2 = B_2 S_2$	$B_{\delta_2} = \frac{\Phi_2}{1,1 S_2}$	$H_{\delta_2} = \frac{B_{\delta_2}}{\mu_0}$	H_2	$H_{\delta_2} \delta_2$	$H_2 \delta_2$	$H_{\delta_2} \delta_2 + H_2 \delta_2$
0,1	$0,4 \cdot 10^{-3}$	0,0909	$72,34 \cdot 10^3$	100	723,4	10	733,4
0,2	$0,8 \cdot 10^{-3}$	0,182	$144,83 \cdot 10^3$	110	1448,3	11	1459,3
0,3	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,273	$217,25 \cdot 10^3$	120	2172,5	12	2184,5

$$B_2 = 0,2 + \frac{0,3 - 0,2}{2184,5 - 1459,3} (1873 - 1459,3) = 0,257 \text{ T}$$

$$B_{\delta_2} = \frac{B_2}{1,1} \approx 0,23 \text{ T}$$

$$\Phi_2 = B_2 S_2 = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ Vs}$$

$$\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2 \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ Vs.}$$



Ako ipak zanemarimo pad magnetskog napona na željezu drugog stupa, onda računamo:

$$H_{\delta_2} = \frac{1873}{0,01} = 187\,300 \text{ A/m}$$

$$B_{\delta_2} = H_{\delta_2} \mu_0 = 0,235 \text{ T}$$

$$\Phi_{\delta_2} = B_{\delta_2} S_2 \cdot 1,1 = 0,235 \cdot 40 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1 = 1,0324 \cdot 10^{-3} \text{ Vs} = \Phi_2$$

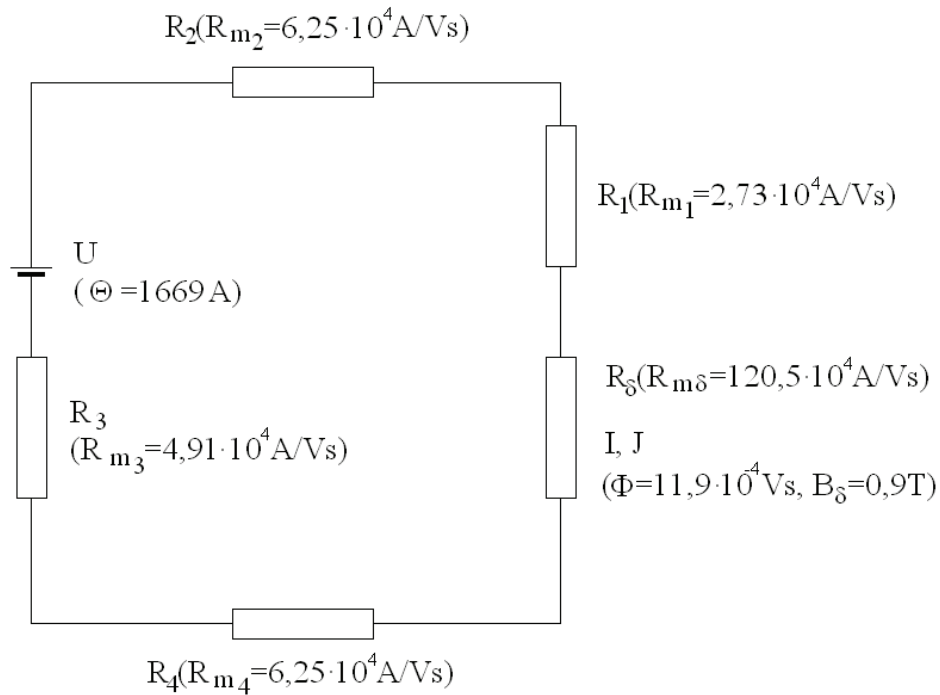
$$\Phi_3 = \Phi_{\delta_1} + \Phi_{\delta_2} = 9,68 \cdot 10^{-4} + 1,0324 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Vs}$$

$$B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-4}} = 1,334 \text{ T} \quad \rightarrow \quad H_3 = 950 \text{ A/m}$$

$$wI = 1873 + H_3 l_3 = 1873 + 950 \cdot 0,2 = 2063 \text{ A}$$

$$I = \frac{2063}{710} \approx 2,9 \text{ A.}$$

19.1.4. Kako izgleda analogni električni krug za slučaj promatran u 1. zadatku? Kraj elemenata u shemi upišite analogne magnetske vrijednosti.



$$R_m = \frac{Hl}{\Phi} = \frac{l}{\mu S}$$

$$\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \frac{B_2}{H_2} = \frac{1,188}{530} = 2,24 \cdot 10^{-3} \text{ Tm/A}$$

$$R_{m3} = \frac{l_3}{\mu_3 S_3} = \frac{0,11}{2,24 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-4}} = 4,91 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}$$

$$R_{m2} = \frac{l_2}{\mu_2 S_2} = \frac{0,14}{2,24 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-4}} = 6,25 \cdot 10^4 \text{ A/Vs} = R_{m4}$$

$$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 S_0} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 13,2 \cdot 10^{-4}} = 120,5 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}$$

$$\mu_1 = \frac{B_1}{H_1} = \frac{0,99}{300} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ Tm/A}$$

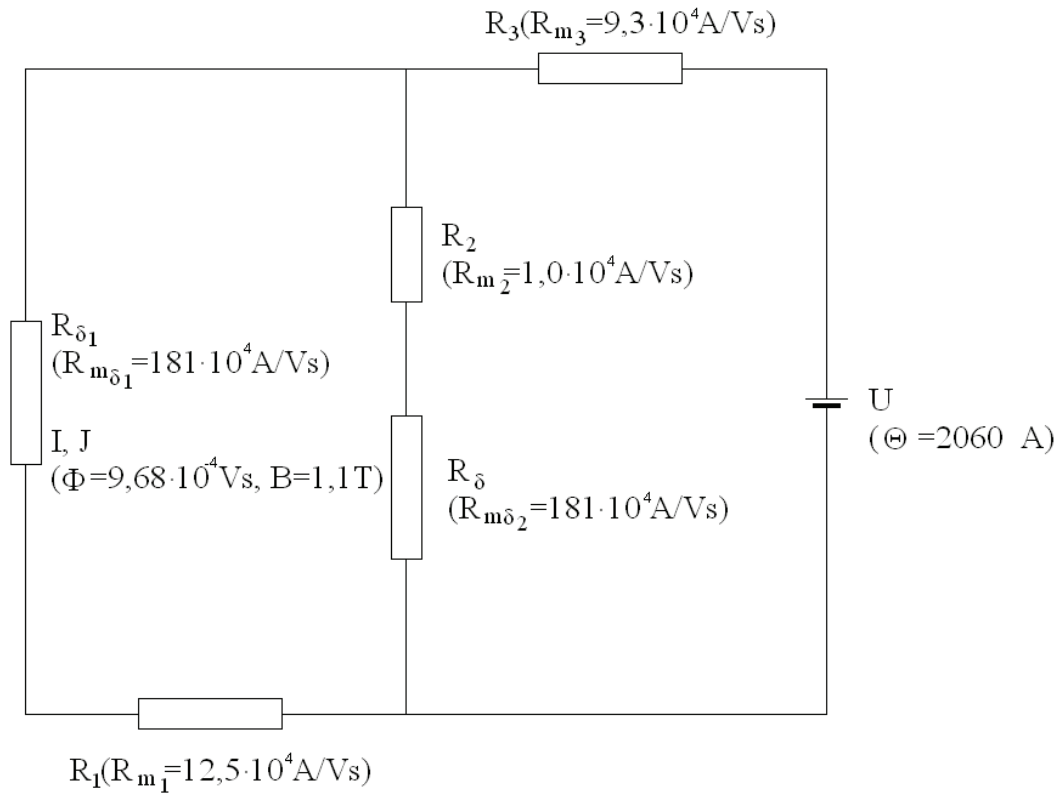
$$R_{m1} = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} = \frac{0,108}{3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^{-4}} = 2,73 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}$$

19.1.5. Koji uvjeti vrijede u nadomjesnom električnom krugu prema 4. zadatku za slučajeve a i b u zadatku 2.?

a) $R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \cong 0$

b) $R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \gg R_\delta$

19.1.6. Kako izgleda električni analogni krug za slučaj u 3. zadatku i kolike su magnetske analogne vrijednosti?



$$\mu_1 = \frac{B_1}{H_1} = \frac{1,21}{582} = 2,08 \cdot 10^{-3} \text{ Tm/A}$$

$$R_1 = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} = \frac{0,208}{2,08 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = 12,5 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}$$

$$\mu_3 = \frac{B_3}{H_3} = \frac{1,334}{930} = 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ Tm/A}$$

$$R_3 = \frac{l_3}{\mu_3 S_3} = \frac{0,2}{1,43 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-4}} = 9,3 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}$$

$$R_{\delta_1} = \frac{\delta_1}{\mu_0 S_{\delta_1}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1} = 181 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}$$

$$R_{\delta_2} = \frac{\delta_2}{\mu_0 S_{\delta_2}} = \frac{0,01}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 40 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1} = 181 \cdot 10^4 \text{ A/Vs}$$

$$\mu_2 = \frac{B_2}{H_2} = \frac{1,1 \cdot 0,235}{103} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Tm/A}$$

$$R_2 = \frac{l_2}{\mu_2 S_2} = \frac{0,1}{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 10^{-4}} = 10^4 \text{ A/Vs}$$

- 19.1.7. Magnetskom krugu ukupno je protjecanje $\Theta = 200 \text{ A}$, a ukupni magnetski otpor $R_m = 2000 \text{ A/Vs}$. a) Kolik će se magnetski tok Φ uspostaviti u krugu i koliko treba dovesti energije da bi se taj tok stvorio ako zanemarimo omski otpor uzbudnog namota, a uzбудu Θ dovedemo od vrijednosti nula do punog iznosa 200 A ?
b) Koliko se snage troši za održavanje tako stvorenog toka u magnetskom krugu?

$$\text{a) } \Phi = \frac{\Theta}{R_m} = \frac{200}{2000} = 0,1 \text{ Vs}$$

$$W = \frac{\Theta\Phi}{2} = \frac{200 \cdot 0,1}{2} = 10 \text{ Ws}$$

$$\text{b) } P = 0 \text{ W}$$

- 19.1.8. Električni krug ima ukupni napon $U = 200 \text{ V}$, a ukupni otpor $R = 2000 \Omega$.
a) Kolika će struja teći u krugu i koliko treba dovesti energije da bi se ta struja uspostavila, ako zanemarimo induktivitet kruga, a napon podignemo od nula na 200 V ? b) Koliko se snage troši za održavanje struje u tom krugu?

$$\text{a) } I = \frac{U}{R} = \frac{200}{2000} = 0,1 \text{ A}$$

$$W = 0 \text{ J}$$

$$\text{b) } P = UI = 200 \cdot 0,1 = 20 \text{ W}$$

- 19.1.9. Da se u magnetskom krugu stroja postigne tok $\Phi = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Vs}$, potrebna je u uzbudnom namotu od: a) 5000 zavoja struja jaka 2 A ; b) 2500 zavoja 4 A . Koliku energiju treba dovesti uzbudnom namotu da bi se uspostavio spomenuti tok, a koliku snagu valja trošiti za dalje održavanje toka u magnetskom krugu, ne računajući gubitke u uzbudnom omskom otporu za a i b?

$$\text{a) } W = \frac{\Theta\Phi}{2} = \frac{5000 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{2} = 100 \text{ J}$$

$$\text{b) } W = \frac{\Theta\Phi}{2} = \frac{2500 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{2} = 100 \text{ J}$$

Podjela

19.2.1. Sinkroni stroj ima 24 pola i uzбудni namot s ukupno 1800 zavoja, presjeka od 50 mm^2 . Za uzбудu treba po jednom paru polova protjecanje od 28 400 A. Kolika će biti uzbudna struja? Koliki će biti uzbudni napon ako je srednja duljina zavoja 1,52 m? Pri tome je specifična vodljivost toplog bakra 47 S m/mm^2 .

$$\begin{aligned}
 p &= 12 & w_p &= \frac{1800}{24} = 75 \\
 w &= 1800 \\
 S &= 50 \text{ mm}^2 & I &= \frac{28\,400}{2 \cdot 75} = 189,3 \text{ A} \\
 2w_p I &= 28\,400 \text{ A} \\
 l_{sr} &= 1,52 \text{ m} & R &= \frac{w l_{sr}}{\kappa S} = \frac{1800 \cdot 1,52}{47 \cdot 50} = 1,164 \, \Omega \\
 \underline{\kappa} &= 47 \text{ Sm/mm}^2 & U &= IR = 189,3 \cdot 1,164 = 220,4 \text{ V}
 \end{aligned}$$

19.2.2. Sinkroni stroj ima 12 polova, promjer provrta 2,3 m i idealnu duljinu paketa limova 0,83 m. Ako se pretpostavi sinusna raspodjela indukcije u rasporu i dopusti maksimalna vrijednost indukcije od 0,85 T, kolik je tok s kojim treba računati potrebno protjecanje za uzбудu stroja?

$$\begin{aligned}
 2p &= 12 & \tau_p &= \frac{D\pi}{2p} = \frac{2,3\pi}{12} = 0,602 \text{ m} \\
 D &= 2,3 \text{ m} \\
 l_p &= 0,83 \text{ m} & \Phi &= \int_0^{\tau_p} B(x) l \, dx = l \int_0^{\tau_p} 0,85 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) dx = -\frac{0,85 l \tau_p}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) \Bigg|_0^{\tau_p} \\
 \underline{B} &= 0,85 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) & &= -\frac{0,85 l \tau_p}{\pi} (-1 - 1) = \frac{2 \cdot 0,85 \cdot 0,83 \cdot 0,602}{\pi} = 0,27 \text{ Vs}
 \end{aligned}$$

Ili jednostavnije:

$$\Phi = B_{sr} S = \frac{2}{\pi} B_m l \tau_p = 0,27 \text{ Vs}$$

Zračni raspor

19.3.1. Sinkroni stroj ima paket statora sa 14 rashladnih kanala duljine $l_s = 10$ mm, a cijela duljina paketa zajedno s rashladnim kanalima iznosi $l = 0,850$ m. Duljina zračnog raspora je 11,4 mm. Kolika je idealna duljina stroja l_i ? Rotor nema rashladnih kanala.

$$n_s = 14$$

$$l_s = 10 \text{ mm}$$

$$l = 0,85 \text{ m}$$

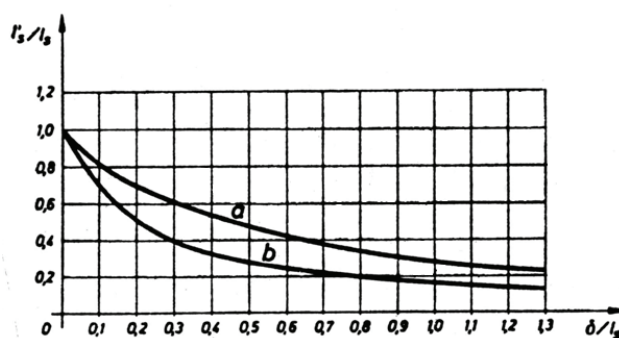
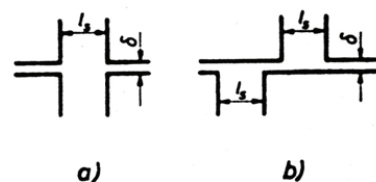
$$\delta = 11,4 \text{ mm}$$

$$\frac{\delta}{l_s} = \frac{11,4}{10} = 1,14$$

$$\text{sl.19.17.b} \rightarrow \frac{l'_s}{l_s} = 0,15$$

$$l'_s = 0,15 \cdot 10 = 1,5 \text{ mm}$$

$$l_i = l - n_s l'_s = 0,85 - 14 \cdot 0,0015 = 0,829 \text{ m}$$



19.3.2. Sinkroni generator iz 1. zadatka ima prema slici 19.23. na statoru 180 utora. Kolika je idealna duljina zračnog raspora? Kolik je utorski korak pri vrhu utora, u sredini i pri dnu utora? Provrt je 2,3 m.

$$N_s = 180$$

$$D = 2,3 \text{ m}$$

$$\delta = 11,4 \text{ mm}$$

$$o_2 = 18 \text{ mm}$$

$$h = 66 \text{ mm}$$

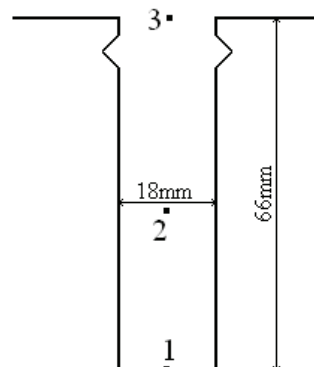
$$(\tau_{u2})_3 = \frac{D\pi}{N_s} = \frac{2,3\pi}{180} = 40,1 \text{ mm}$$

$$(\tau_{u2})_2 = \frac{(D+h)\pi}{N_s} = \frac{(2,3+0,066)\pi}{180} = 41,3 \text{ mm}$$

$$(\tau_{u2})_1 = \frac{(D+2h)\pi}{N_s} = \frac{(2,3+2 \cdot 0,066)\pi}{180} = 42,5 \text{ mm}$$

$$k_{C2} = \frac{o_2 + 5\delta}{o_2 \frac{\tau_{u2} - o_2}{\tau_{u2}} + 5\delta} = \frac{18 + 5 \cdot 11,4}{18 \cdot \frac{40,14 - 18}{40,14} + 5 \cdot 11,4} = 1,12$$

$$\delta_i = k_{C2} \delta = 1,12 \cdot 11,4 = 12,8 \text{ mm}$$



19.3.3. Stroj iz prva dva zadatka ima 12 polova širine $b_p = 0,452$ m. Polovi su formirani tako da raspodjelu indukcije približe sinusnom obliku. Kolik je magnetski napon potreban na zračnom rasporu da bi tok u rasporu bio 0,296 Vs?

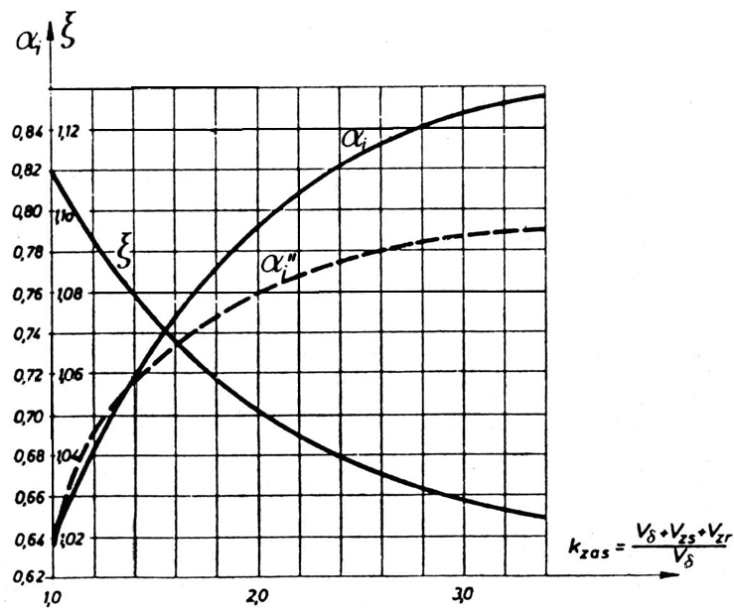
$$\begin{aligned}
 2p &= 12 & \tau_p &= \frac{D\pi}{2p} = \frac{2,3\pi}{12} = 0,602 \text{ m} \\
 b_p &= 0,452 \text{ m} & \frac{b_p}{\tau_p} &= \frac{0,452}{0,602} = 0,75 \text{ (slika 19.19b)} \rightarrow \alpha_i = \frac{B_{sr}}{B_\delta} = 0,65 \\
 \Phi &= 0,296 \text{ Vs} & \Phi &= B_{sr} \tau_p l_i \rightarrow B_{sr} = \frac{\Phi}{\tau_p l_i} = \frac{0,296}{0,602 \cdot 0,829} = 0,593 \text{ T} \\
 & & B_\delta &= \frac{B_{sr}}{\alpha_i} = \frac{0,593}{0,65} = 0,911 \text{ T} \\
 & & V_\delta &= \frac{B_\delta \delta_i}{\mu_0} = \frac{0,911 \cdot 0,0128}{4\pi 10^{-7}} = 9280 \text{ A}
 \end{aligned}$$

19.3.4. Asinkroni motor ima zračni raspor od 0,35 mm. Poluotvorenim utorima na statoru i rotoru korak je $\tau_{u1} = 13,25$ mm i $\tau_{u2} = 10,8$ mm te utorski otvor širine $o_1 = 3$ mm i $o_2 = 1$ mm. Koliki je Carterov faktor i idealna duljina zračnog raspora?

$$\begin{aligned}
 \delta &= 0,35 \text{ mm} & k_{C1} &= \frac{o_1 + 5\delta}{o_1 \frac{\tau_{u1} - o_1}{\tau_{u1}} + 5\delta} = \frac{3 + 5 \cdot 0,35}{3 \cdot \frac{13,25 - 3}{13,25} + 5 \cdot 0,35} = 1,167 \\
 \tau_{u1} &= 13,25 \text{ mm} & & \\
 \tau_{u2} &= 10,8 \text{ mm} & k_{C2} &= \frac{o_2 + 5\delta}{o_2 \frac{\tau_{u2} - o_2}{\tau_{u2}} + 5\delta} = \frac{1 + 5 \cdot 0,35}{1 \cdot \frac{10,8 - 1}{10,8} + 5 \cdot 0,35} = 1,035 \\
 o_1 &= 3 \text{ mm} & k_C &= k_{C1} k_{C2} = 1,208 \\
 o_2 &= 1 \text{ mm} & \delta_i &= k_C \delta = 1,208 \cdot 0,35 = 0,42 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

19.3.5. Asinkroni motor u 4. zadatku ima $p = 2$, promjer u provrtu $D = 152$ mm i idealnu duljinu $l_i = 100$ mm. Za tok u rasporu $\Phi = 0,582 \cdot 10^{-2}$ Vs izračunajte indukciju u sredini raspora B_δ i magnetski napon na zračnom rasporu V_δ uz pretpostavku da je faktor zasićenja $k_{zas} = \frac{V_\delta + V_{zs} + V_{zr}}{V_\delta} = 1,4$.

$$k_{zas} = \frac{V_\delta + V_{zs} + V_{zr}}{V_\delta} = 1,4 \quad (\text{slika 19.20.}) \rightarrow \alpha_i = 0,716$$



Sl. 19.20. Faktori α_i , te pomoćni faktor α_i'' u ovisnosti o faktoru zasićenja kod asinkronog stroja

$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p} = \frac{0,152\pi}{4} = 0,1194 \text{ m}$$

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau_p l_i} = \frac{0,582 \cdot 10^{-2}}{0,716 \cdot 0,1194 \cdot 0,1} = 0,681 \text{ T}$$

$$V_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta_i = \frac{0,681}{4\pi 10^{-7}} \cdot 0,42 \cdot 10^{-3} = 227,6 \text{ A}$$

19.3.6. Izračunavanjem magnetskog napona u zubima za motor u 5. zadatku dobili smo za zub statora $V_{zs} = 98 \text{ A}$ i za zub rotora $V_{zr} = 16 \text{ A}$. Odredite faktor zasićenja k_{zas} koji odgovara tim podacima, zatim provedite korekciju (samo jedan korak) i odredite konačnu vrijednost indukcije B_δ , magnetskog napona V_δ i faktora zasićenja k_{zas} .

$$k_{zas} = \frac{V_\delta + V_{zs} + V_{zr}}{V_\delta} = \frac{227,6 + 98 + 16}{227,6} = 1,5 \quad (\text{slika 19.20.}) \rightarrow \alpha_i'' = 0,724$$

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i'' \tau_p l_i} = \frac{0,582 \cdot 10^{-2}}{0,724 \cdot 0,1194 \cdot 0,1} = 0,673 \text{ T}$$

$$V_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta_i = \frac{0,673}{4\pi 10^{-7}} \cdot 0,42 \cdot 10^{-3} = 225 \text{ A}$$

$$k_{zas} = \frac{V_\delta + V_{zs} + V_{zr}}{V_\delta} = \frac{225 + 98 + 16}{225} = 1,507$$

Zubi

19.4.1. Kolika je mjeriva ili bruto-duljina željeza l_{Fe} u zadatku 19.3.1, a kolika neto-duljina željeza l_{Fe_n} uz faktor punjenja željeza $k_{Fe} = 0,92$?

$$\begin{aligned} k_{Fe} &= 0,92 & l_{Fe} &= l - n_s l_s = 0,85 - 14 \cdot 0,01 = 0,71 \text{ m} \\ l_s &= 10 \text{ mm} \\ l &= 0,85 \text{ m} & l_{Fe_n} &= k_{Fe} l_{Fe} = 0,92 \cdot 0,71 = 0,653 \text{ m} \\ n_s &= 14 \end{aligned}$$

19.4.2. Prema podacima za sinkroni stroj iz zadatka 19.3.1-3. odredite magnetski napon za zub statora za tok $\Phi = 0,296$ Vs. Statorski paket je napravljen od dinamo-limova 1,5 W/kg (sl. 19.1) s faktorom punjenja $k_{Fe} = 0,92$. Kolika je računaska vrijednost indukcije na karakterističnim mjestima u zubu, a kolika je korigirana vrijednost?

$$\begin{aligned} b_{z1} &= (\tau_{u2})_1 - o_2 = 42,5 - 18 = 24,5 \text{ mm} \\ b_{z2} &= (\tau_{u2})_2 - o_2 = 41,3 - 18 = 23,3 \text{ mm} \\ b_{z3} &= (\tau_{u2})_3 - o_2 = 40,1 - 18 = 22,1 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$B_{z1} = \frac{\tau_u l_i B_\delta}{b_{z1} (l_{Fe} k_{Fe})} = \frac{0,0401 \cdot 0,829 \cdot 0,91}{0,0245 \cdot 0,653} = 1,9 \text{ T}$$

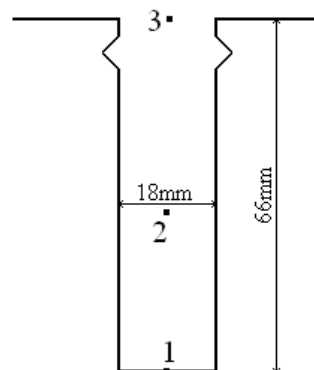
$$H_1 = 265 \text{ A/cm}$$

$$B_{z2} = \frac{\tau_u l_i B_\delta}{b_{z2} (l_{Fe} k_{Fe})} = \frac{0,0401 \cdot 0,829 \cdot 0,91}{0,0233 \cdot 0,653} = 1,99 \text{ T}$$

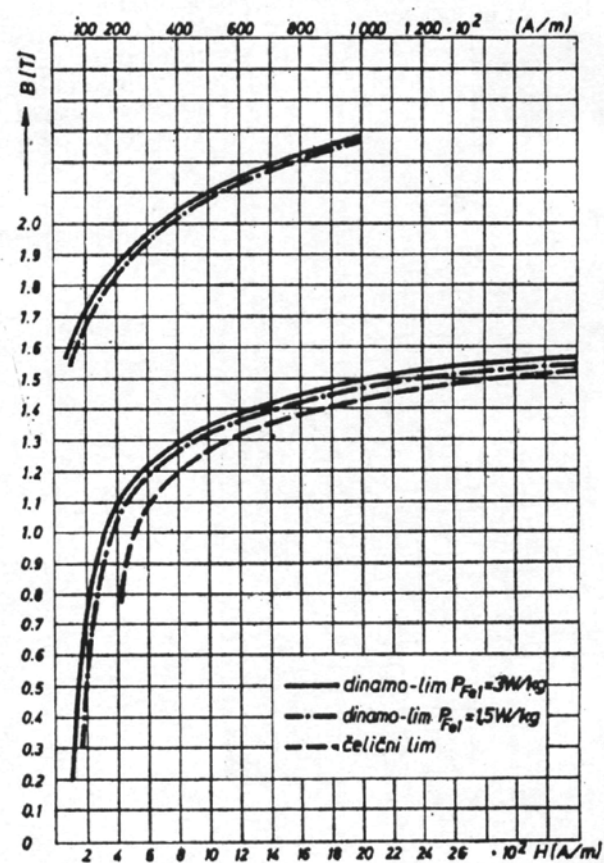
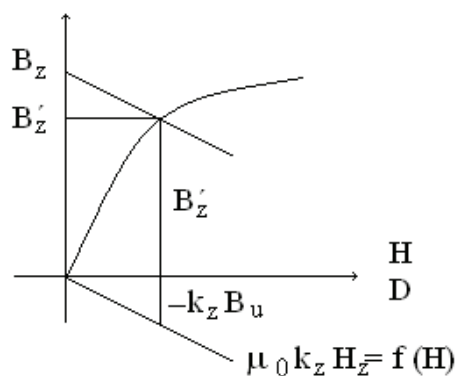
$$H_2 = 375 \text{ A/cm}$$

$$B_{z3} = \frac{\tau_u l_i B_\delta}{b_{z3} (l_{Fe} k_{Fe})} = \frac{0,0401 \cdot 0,829 \cdot 0,91}{0,0221 \cdot 0,653} = 2,1 \text{ T}$$

$$H_3 = 530 \text{ A/cm}$$



$$\begin{aligned} k_{z1} &= \frac{q_{u1}}{q_{z1}} = \frac{(\tau_{u2})_1 - k_{Fe} b_{z1}}{k_{Fe} b_{z1}} = \frac{42,5 - 0,92 \cdot 24,5}{0,92 \cdot 24,5} = 0,8855 \\ k_{z2} &= \frac{q_{u2}}{q_{z2}} = \frac{(\tau_{u2})_2 - k_{Fe} b_{z2}}{k_{Fe} b_{z2}} = \frac{41,3 - 0,92 \cdot 23,3}{0,92 \cdot 23,3} = 0,9266 \\ k_{z3} &= \frac{q_{u3}}{q_{z3}} = \frac{(\tau_{u2})_3 - k_{Fe} b_{z3}}{k_{Fe} b_{z3}} = \frac{40,1 - 0,92 \cdot 22,1}{0,92 \cdot 22,1} = 0,97226 \end{aligned}$$



$$B'_{z1} = B_{z1} - \mu_0 k_{z1} H_1 = 1,9 - 4\pi 10^{-7} \cdot 0,8855 \cdot 26500 = 1,87 \text{ T} \quad \rightarrow \quad H_1 = 210 \text{ A/cm}$$

$$B'_{z2} = B_{z2} - \mu_0 k_{z2} H_2 = 1,99 - 4\pi 10^{-7} \cdot 0,9266 \cdot 37500 = 1,95 \text{ T} \quad \rightarrow \quad H_2 = 300 \text{ A/cm}$$

$$B'_{z3} = B_{z3} - \mu_0 k_{z3} H_3 = 2,1 - 4\pi 10^{-7} \cdot 0,97226 \cdot 53000 = 2,04 \text{ T} \quad \rightarrow \quad H_3 = 440 \text{ A/cm}$$

$$H_z = \frac{H_1 + 4H_2 + H_3}{6} = \frac{210 + 4 \cdot 300 + 440}{6} = 308,3 \text{ A/cm}$$

$$l_z = 66 \text{ mm}$$

$$V_z = H_z l_z = 308,3 \cdot 6,6 = 2035 \text{ A}$$

Polovi

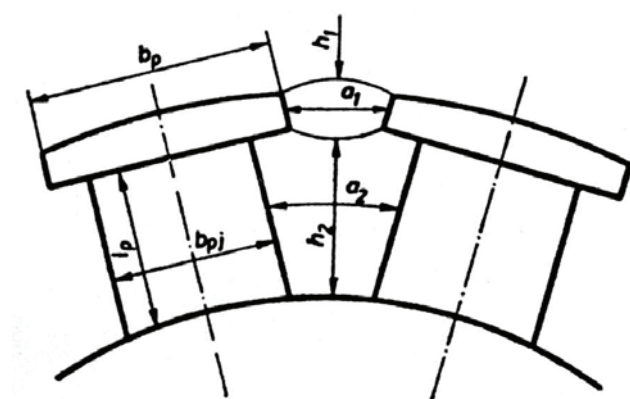
19.5.1. Dimenzije polova sinkronog stroja iz zadatka 19.3.1-3. prema slici 19.30. su:

$$b_p = 45 \text{ cm}, \tau_p = 60 \text{ cm}, b_{pj} = 32,1 \text{ cm}, l_p = 24,2 \text{ cm}, a_1 = 15 \text{ cm}, a_2 = 26,3 \text{ cm},$$

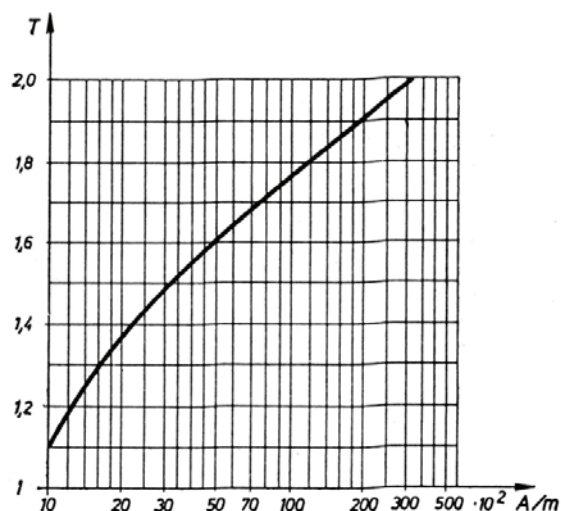
$$h_1 = 5,7 \text{ cm}, h_2 = 24,2 \text{ cm}, l_1 = 85 \text{ cm (duljina polnog nastavka)}, l_2 = 85 \text{ cm}$$

(duljina polne jezgre). Polovi su napravljeni od čeličnog lijeva prema slici 19.31.

Kolik je rasipni tok među polovima uz tok u rasporu $\Phi = 0,296 \text{ Vs}$? Magnetski napon za jaram statora neka bude 292 A, a za zube i raspor prema zadacima 19.4.1. i 19.3.3.



Sl.19.30. Rasipanje među polovima



Sl. 19.31. Krivulja magnetiziranja čeličnog lijeva

Rasipni tok neopterećenog stroja može se grubo izračunati prema sl. 19.30. ako se uzme u obzir da na vrhu među polovima djeluje magnetski napon:

$$V_s = 2V_\delta + 2V_z + V_{js} = 2 \cdot 9280 + 2 \cdot 2035 + 292 = 22922 \text{ A},$$

a pri dnu samo V_{jr} , dakle gotovo nula. Ako prostor među polovima prikažemo

pojednostavnjeno paralelopipedom, bit će njegova magnetska vodljivost $\Lambda = \frac{\mu_0 l_2 h_2}{a_2},$

a budući da želimo računati s V_s , dok se magnetski napon stvarno mijenja od 0 do V_s , treba uzeti polovicu te vodljivosti:

$$\Lambda_2 = \frac{\mu_0 l_2 h_2}{2a_2} = \frac{4\pi 10^{-7} \cdot 0,85 \cdot 0,242}{2 \cdot 0,263} = 4,914 \cdot 10^{-7} \text{ Vs/A}.$$

Među polnim nastavcima magnetski će napon biti V_s , a vodljivost:

$$\Lambda_1 = \frac{\mu_0 l_1 h_1}{a_1} = \frac{4\pi 10^{-7} \cdot 0,85 \cdot 0,057}{0,15} = 4,059 \cdot 10^{-7} \text{ Vs/A.}$$

S vodljivošću $\Lambda_s = \Lambda_1 + \Lambda_2 = 8,973 \cdot 10^{-7} \text{ Vs/A}$

(obično uz još jedan dodatak za rasipne silnice s bočnih strana) računamo tako kao da je koncentrirana na vrhu polova, pa je rasipni tok na obje strane pola:

$$\Phi_s = 2V_s \Lambda_s = 2 \cdot 22922 \cdot 8,973 \cdot 10^{-7} = 0,0411 \text{ Wb.}$$

19.5.2. Kolik je magnetski napon za jedan pol stroja iz 1. zadatka?

$$\Phi_p = \Phi + \Phi_s = 0,296 + 0,041 = 0,337 \text{ Wb.}$$

Na osnovi toka određuje se indukcija u polu B_p , a pripadna jakost polja H_p daje magnetski napon:

$$B_p = \frac{\Phi_p}{b_{pj} l_2} = \frac{0,337}{0,321 \cdot 0,85} = 1,235 \text{ T} \rightarrow H_p = 1372 \text{ A/m}$$

$$V_p = H_p l_p = 1372 \cdot 0,242 = 332 \text{ A}$$

Obično se magnetski napon za polni nastavak ne računa posebno jer je ukupni udio pola ionako skroman. Izuzetno su potrebne detaljne analize ako se npr. suženjem u polu namjerno izazove veće zasićenje.

Jarmovi

19.6.1. Jaram statora sinkronog generatora iz zadataka 19.3.1-3. ima vanjski promjer $D_r = 2,77$ m. Izračunajte duljinu jarma, maksimalnu indukciju u njemu i magnetski napon za jaram V_{j2} .

$$h_{j2} = \frac{D_r}{2} - \left(\frac{D}{2} + h_z \right) =$$

$$= \frac{2,77}{2} - \left(\frac{2,3}{2} + 0,066 \right) = 0,169 \text{ m}$$

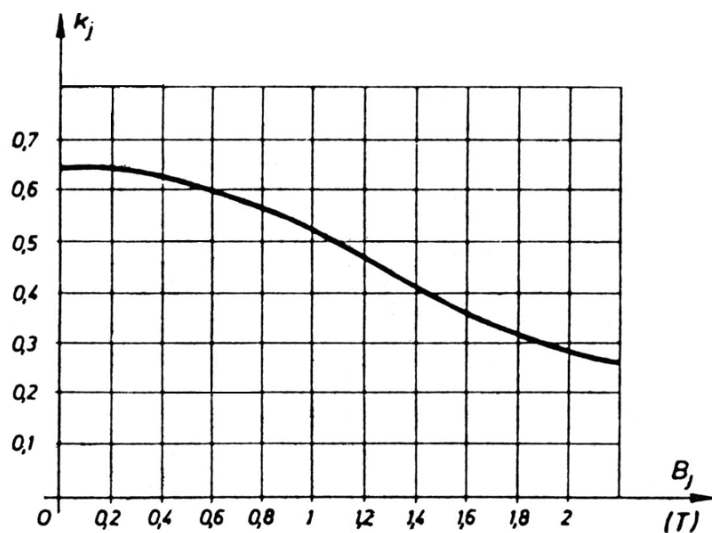
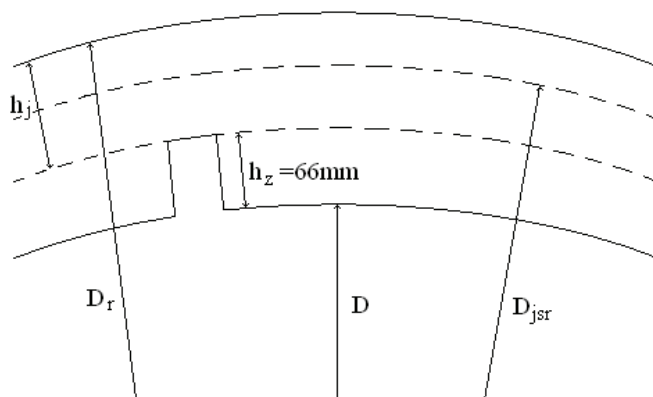
$$D_{jsr} = \frac{D_r + (D + 2h_z)}{2} =$$

$$= \frac{2,77 + (2,3 + 2 \cdot 0,066)}{2} = 2,6 \text{ m}$$

$$l_{jsr} = \frac{D_{jsr} \pi}{2p} = \frac{2,6\pi}{12} = 0,68 \text{ m}$$

$$\Phi_{j2} = \frac{\Phi_{p2}}{2} = \frac{0,296}{2} = 0,148 \text{ Wb}$$

$$B_{j2} = \frac{\Phi_{j2}}{h_{j2} l_{Fe} k_{Fe}} = \frac{0,148}{0,169 \cdot 0,653} = 1,34 \text{ T} \quad \text{sl.19.1.} \rightarrow H_{j2} = 1057 \text{ A/m}$$



Sl. 19.33. Korekcijski faktor k_j za jaram

$$k_{j2} = 0,42$$

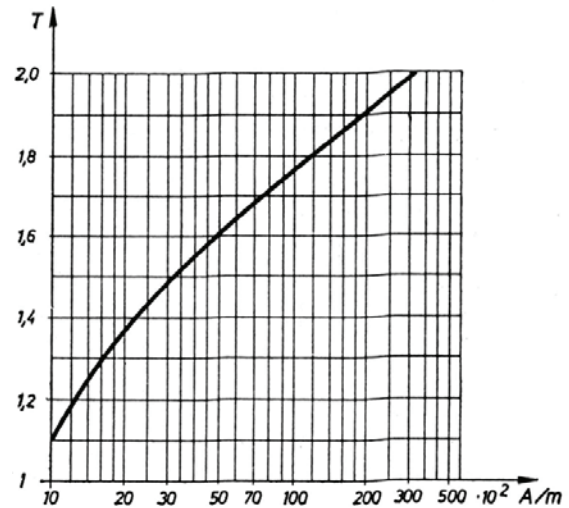
$$V_{j2} = k_{j2} H_{j2} l_{j2} = 0,42 \cdot 1057 \cdot 0,68 = 302 \text{ A}$$

19.6.2. Rotorski jaram sinkronog stroja iz prethodnih zadataka napravljen je od čeličnog lijeva s karakteristikom prema slici 19.31. Aksijalna duljina mu je 85 cm, vanjski promjer je $d_v = 1,67$ m, a unutrašnji promjer je $d_u = 1,34$ m. Kolika je indukcija u jarmu i magnetski napon za jaram rotora neopterećenog stroja, ako je tok u rasporu 0,296 Vs?

$$l_{Fe} = 0,85 \text{ m}$$

$$d_v = 1,67 \text{ m}$$

$$\underline{d_u = 1,34 \text{ m}}$$



Sl. 19.31. Krivulja magnetiziranja čeličnog lijeva

$$h_{j1} = \frac{d_v - d_u}{2} = \frac{1,67 - 1,34}{2} = 0,165 \text{ m}$$

$$D_{jsr} = \frac{d_v + d_u}{2} = \frac{1,67 + 1,34}{2} = 1,505 \text{ m}$$

$$l_{j1} = \frac{D_{jsr} \pi}{2p} = \frac{1,505 \pi}{12} = 0,394 \text{ m}$$

$$\Phi_{j1} = \frac{\Phi_{p1}}{2} = \frac{0,337}{2} = 0,1685 \text{ Wb}$$

$$B_{j1} = \frac{\Phi_{j1}}{h_{j1} l_{Fe} k_{Fe}} = \frac{0,1685}{0,165 \cdot 0,85 \cdot 1} = 1,20 \text{ T}$$

$$H_{j1} = 1247 \text{ A/m}$$

$$k_{j1} = 0,47$$

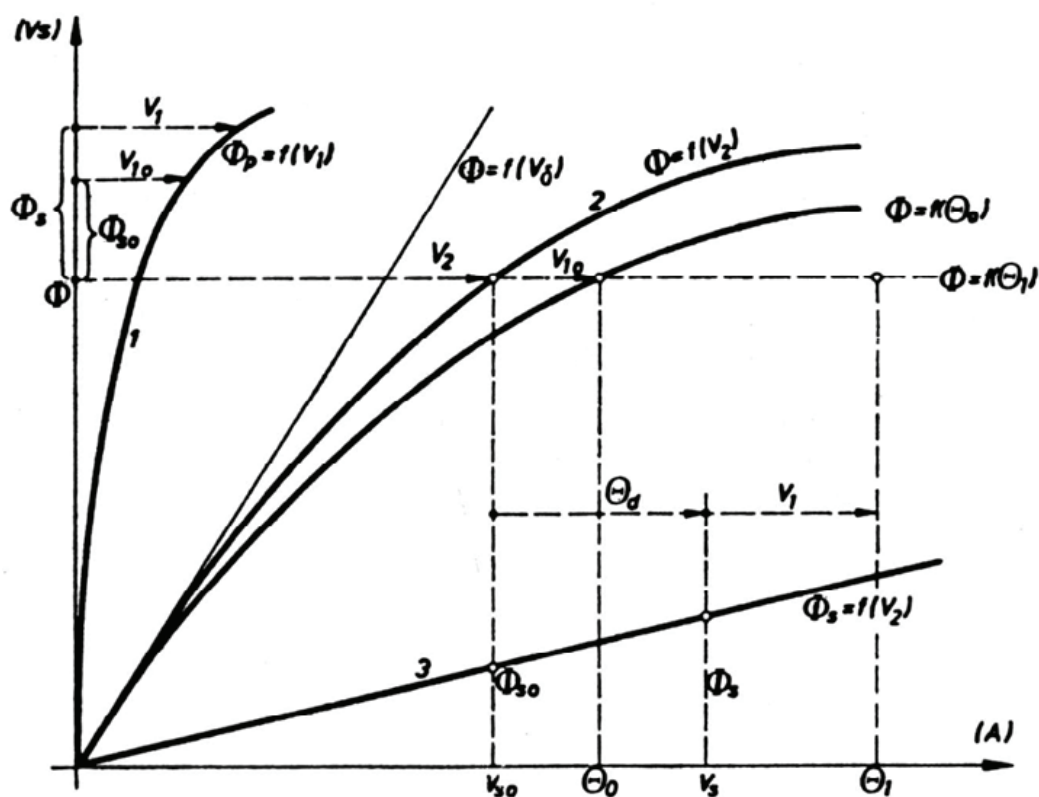
$$V_{j1} = k_{j1} H_{j1} l_{j1} = 0,47 \cdot 1247 \cdot 0,394 = 231 \text{ A}$$

Karakteristika magnetskog kruga

19.7.1. U zadacima 19.3.1-3, 19.4.1-2, 19.5.1-2. i 19.6.1-2. obrađeni su dijelovi magnetskog kruga istog stroja *u praznom hodu* i uz isti tok u rasporu $\Phi = 0,296$ Vs. Koliko je ukupno protjecanje po paru polova? Kolika će biti uzbudna struja ako stroj na svakom polu ima 90 zavoja?

$$\begin{aligned}
 V_{j1} &= 231 \text{ A} & V_{Fe} &= V_{z1} + V_{z2} + V_p + \frac{1}{2}(V_{j1} + V_{j2}) \\
 V_{j2} &= 302 \text{ A} & &= 0 + 2035 + 332 + \frac{1}{2}(231 + 302) = 2633,5 \text{ A} \\
 V_p &= 332 \text{ A} & V &= V_{\delta} + V_{Fe} = 9280 + 2633,5 = 11913,5 \text{ A po polu} \\
 V_z &= 2035 \text{ A} & 2V &= 23827 \text{ A po paru polova} \\
 V_{\delta} &= 9280 \text{ A} \\
 w &= \frac{N}{2p} = 90 & I &= \frac{2V}{2w} = \frac{23827}{180} = 132,4 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Kod opterećenog stroja dobivaju se karakteristike kao na sl. 19.38:



Sl. 19.38. Magnetska karakteristika sinkronog stroja

Namoti

Elementi i vrste namota

20.1.1. Indukcija pod polom 8-polnog stroja promjera 400 mm i duljine 200 mm koji se vrti brzinom od 900 min^{-1} raspoređena je prema slici 20.7. Na rotoru se nalazi dijametralni svitak s 10 zavoja. Nacrtajte krivulju napona na svitku ovisno o vremenu i označite mjerilo na obje koordinatne osi.

$$p = 4$$

$$D = 0,4 \text{ m}$$

$$l = 0,2 \text{ m}$$

$$n = 900 \text{ min}^{-1}$$

$$w_s = 10$$

$$B = 1 \text{ T}$$

$$\omega_m = \frac{n\pi}{30} = \frac{900\pi}{30} = 30\pi$$

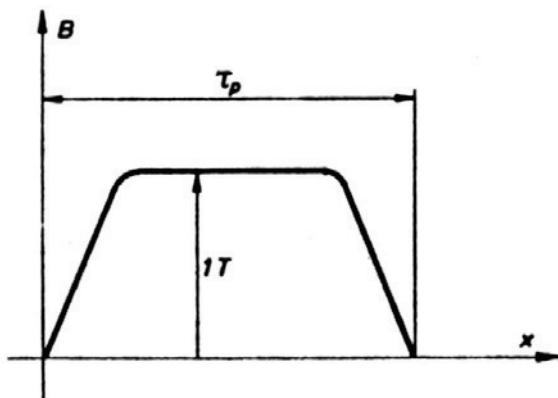
$$v = r\omega = 0,2 \cdot 30\pi = 6\pi$$

$$U_1 = 2Blv = 2 \cdot 1 \cdot 0,2 \cdot 6\pi = 2,4\pi$$

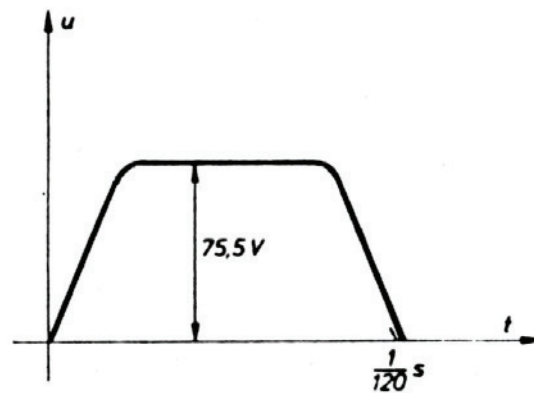
$$U_{10} = 10U_1 = 24\pi = 75,4 \text{ V}$$

$$\omega_m = \frac{2\pi f}{p} \rightarrow f = \frac{30}{2} p = 15 \cdot 4 = 60 \text{ Hz}$$

$$T = \frac{1}{60} \text{ s} \rightarrow \frac{T}{2} = \frac{1}{120} \text{ s}$$



Sl. 20.7. Raspodjela indukcije



Sl. 20.8. Rješenje

20.1.2. Na obodu rotora 6-polnog stroja duljine 300 mm i polnog koraka $\tau_p = 200 \text{ mm}$ nalazi se vodič koji se kreće obodnom brzinom od 20 m/s. Krivulja raspodjele indukcije u rasporu miruje i sadrži osnovni sinusni harmonički član amplitude 1,2 T, zatim pozitivni treći i peti harmonički član u iznosima od 30% i 20% osnovnoga. Odredite efektivnu i srednju vrijednost te osnovnu frekvenciju napona induciranog u vodiču.

$$B = 1,2 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) + 1,2 \cdot 0,3 \sin\left(3 \frac{\pi}{\tau_p} x\right) + 1,2 \cdot 0,2 \sin\left(5 \frac{\pi}{\tau_p} x\right) \text{ T}$$

$$p = 3$$

$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p} \rightarrow D = \frac{2p\tau_p}{\pi} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 0,2}{\pi} = \frac{1,2}{\pi} \text{ m}$$

$$l = 300 \text{ mm}$$

$$v = \omega_m r \rightarrow \omega_m = \frac{v}{r} = \frac{20\pi}{0,6} = 104,72 \text{ rad/s}$$

$$\tau_p = 200 \text{ mm}$$

$$\omega_{el} = p\omega_m = 3 \cdot 104,72 = 314 = 2\pi f \rightarrow f = 50 \text{ Hz}$$

$$v = 20 \text{ m/s}$$

$$E_1 = \frac{B_1 l v}{\sqrt{2}} = \frac{1,2 \cdot 0,3 \cdot 20}{\sqrt{2}} = 5,09 \text{ V}$$

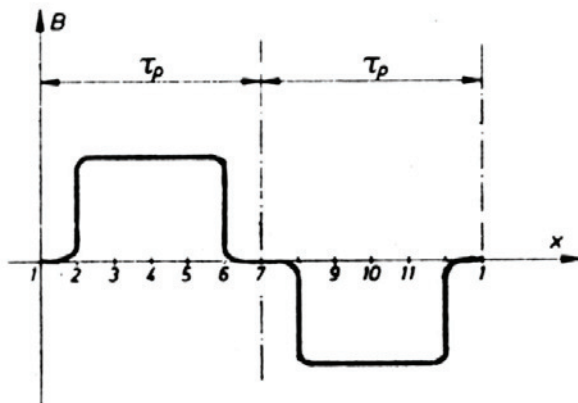
$$E_3 = \frac{B_3 l v}{\sqrt{2}} = 0,3 \cdot E_1 = 1,527 \text{ V}$$

$$E_5 = \frac{B_5 l v}{\sqrt{2}} = 0,2 \cdot E_1 = 1,018 \text{ V}$$

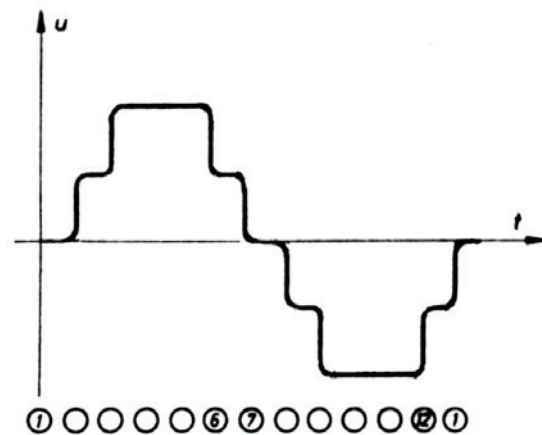
$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2} = \sqrt{5,09^2 + 1,527^2 + 1,018^2} = 5,41 \text{ V}$$

$$E_{sr} = 0$$

20.1.3. Indukcija u rasporu stroja sa šest utora po polu prikazana je na slici 20.9. Skicirajte krivulju napona u svitku koji je smješten jednom stranom u utor 1, a drugom stranom u utor 6, ako se rotor vrti konstantnom brzinom n .



Sl. 20.9. Raspodjela indukcije



Sl. 20.10. Rješenje

$$\frac{N}{2p} = 6$$

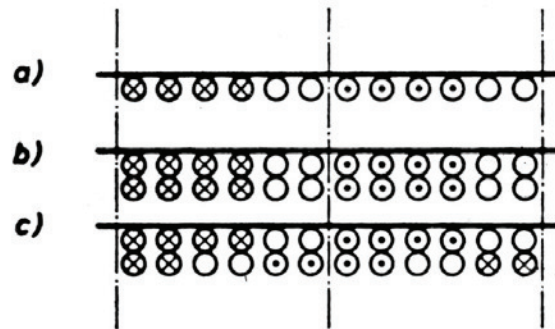
dijametralni svitak bio bi $1 + 6 = 7$
izveden je skraćeni svitak $1 + 5 = 6$

20.1.4. Stator 8-polnog stroja ima 48 utora. Brojevima utora u koje je smještena jedna i druga strana svitka označite korak: a) dijametralnog svitka; b) svitka skraćenog na $\frac{2}{3}\tau_p$.

$$\begin{array}{llll}
 p = 4 & \frac{N}{2p} = \frac{48}{2 \cdot 4} = 6 & \rightarrow 1 + 6 = 7 & \rightarrow 1 - 7 \\
 \underline{N = 48} & 6 \cdot \frac{2}{3} = 4 & \rightarrow 1 + 4 = 5 & \rightarrow 1 - 5
 \end{array}$$

20.1.5. Od ukupno šest utora po polu namotana su četiri. Označite smjer struje po svakoj strani svitka: a) za 1-slojni; b) za 2-slojni neskraćeni namot; c) za 2-slojni namot sa skraćenjem 4/6, sve samo za jedan par polova.

$$\begin{array}{ll}
 \text{a) i b)} & \frac{N}{2p} = 6 \rightarrow 1 + 6 = 7 \rightarrow 1 - 7 \\
 \text{c)} & 6 \cdot \frac{4}{6} = 4 \rightarrow 1 + 4 = 5 \rightarrow 1 - 5
 \end{array}$$

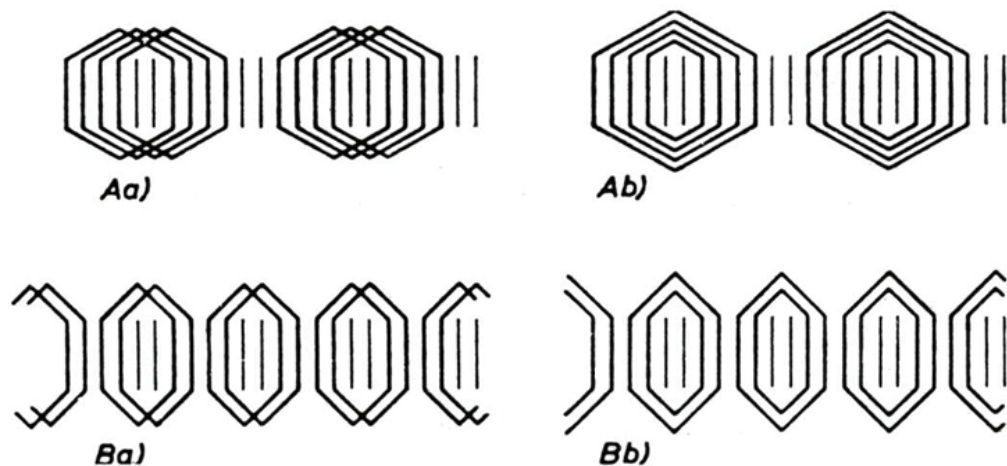


Sl. 20.11. Rješenje

20.1.6. Četveropolni stroj ima 24 utora. Za jednofazni jednoslojni namot iskorištene su 2/3 oboda. Nacrtajte u shemi smještaj svitaka za izvedbe: A) s jednom grupom svitaka po paru polova; B) s jednom grupom svitaka po polu, i to za oba slučaja: a) s jednakim svcicima; b) s koncentričnim svcicima.

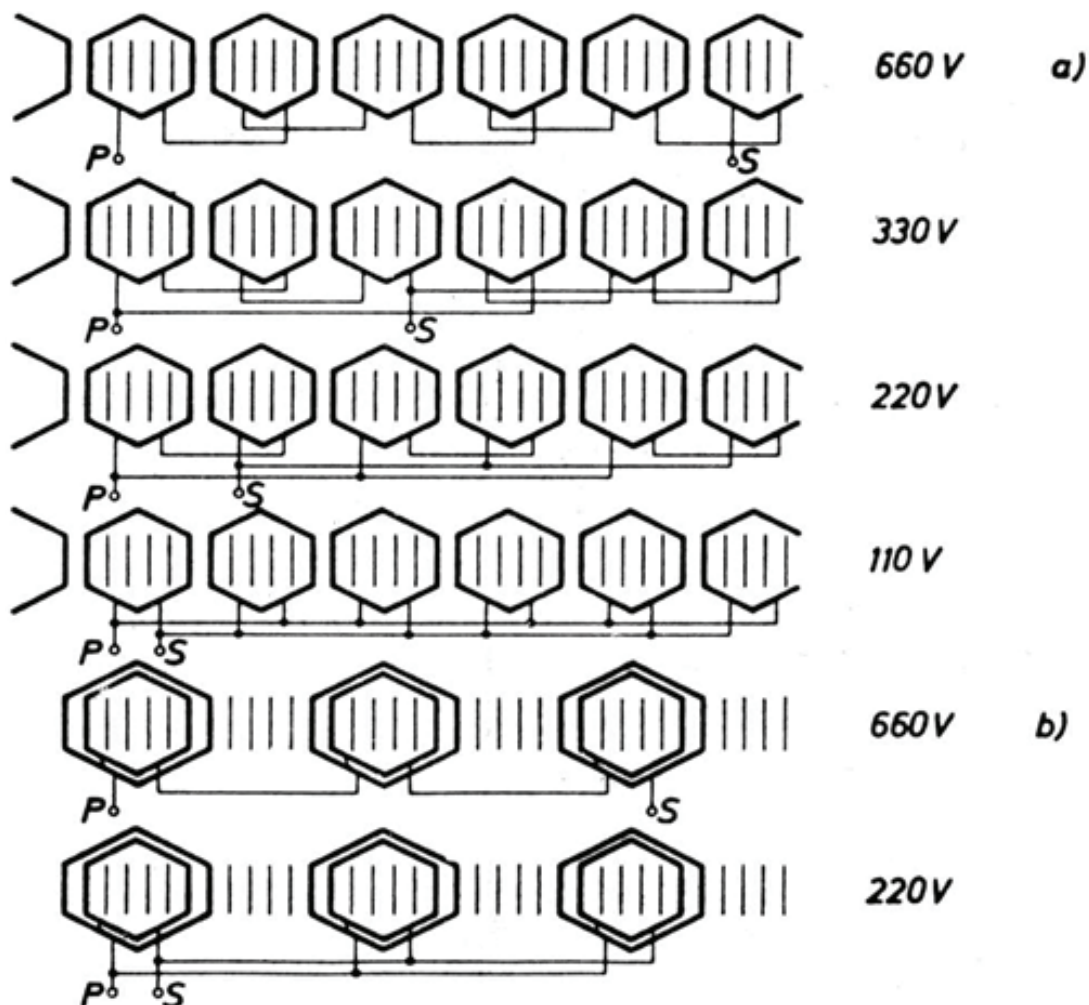
$$\begin{array}{l}
 p = 2 \\
 \underline{N = 24}
 \end{array}$$

$$24 \cdot \frac{2}{3} = 16$$



Sl. 20.12. Rješenje

20.1.7. Šesteropolni stroj s 36 utora ima za jednofazni 1-slojni namot iskorištenu 1/3 oboda. Stroj je namotan s po jednom grupom svitaka: a) po polu; b) po paru polova. Napon jedne grupe je: a) 110 V; b) 220 V. Koji se naponi mogu dobiti različitim serijsko-paralelnim kombinacijama koje uvijek uključuju sve svitke? Nacrtajte sheme za sve slučajeve.



Sl. 20.13. Rješenje

20.1.8. U koliko se simetričnih grupa može rastaviti 2-slojni namot 4-polnog statora.

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ grupa svitaka po polu} \\ 2p = 4 \end{array} \right\} 4 \text{ grupe simetričnih svitaka}$$

Namotni faktor i viši harmonički članovi

20.2.1. Stator 12-polnog stroja ima 144 utora. Kolik je geometrijski, a kolik električni kut između dvaju susjednih utora, kolik je broj utora po polu, a kolik po polu i fazi: a) za dvofazni; b) za trofazni namot?

$$\alpha_m = \frac{2\pi}{N} = \frac{360^\circ}{144} = 2,5^\circ$$

$$p = 6$$

$$\alpha = p\alpha_m = 6 \cdot 2,5 = 15^\circ$$

$$\text{a) } m = 2 \rightarrow q = \frac{q_p}{m} = \frac{12}{2} = 6$$

$$\underline{N = 144}$$

$$q_p = \frac{N}{2p} = \frac{144}{12} = 12$$

$$\text{b) } m = 3 \rightarrow q = \frac{q_p}{m} = \frac{12}{3} = 4$$

20.2.2. Kolik je namotni faktor za jednofazni namot stroja u 1. zadatku ako su namotane 2/3 utora: a) dijametralnim svcicima; b) dvoslojnim namotom s korakom svitka 1-11?

$$q = 12 \cdot \frac{2}{3} = 8$$

$$\text{a) } f_t = 1 \rightarrow f_z = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha}{2}\right)}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin\left(8 \cdot \frac{15^\circ}{2}\right)}{8 \sin \frac{15^\circ}{2}} = 0,829 = f_n$$

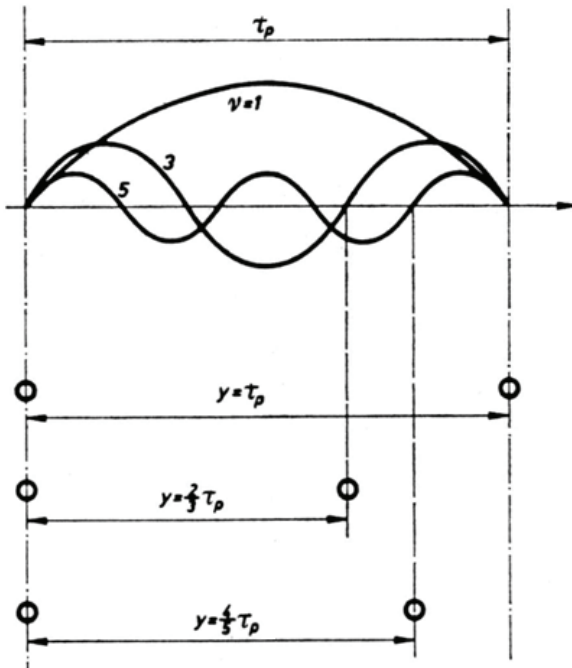
$$1 + 10 = 11$$

$$\text{b) } f_t = \sin\left(\frac{y}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{10}{12} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,966$$

$$\frac{y}{\tau_p} = \frac{10}{12}$$

$$f_n = f_z \cdot f_t = 0,801$$

20.2.3. Kolik je zonski, tetivni i ukupni namotni faktor za treći, peti i sedmi harmonički član u 2. b zadatku?



Sl. 20.15. Viši harmonički članovi u krivulji raspodjele indukcije i inducirani napon u svitku

ν	3	5	7
$f_{zv} = \frac{\sin\left(\nu q \frac{\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\nu \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\nu \cdot 8 \cdot \frac{15^\circ}{2}\right)}{8 \sin\left(\nu \cdot \frac{15^\circ}{2}\right)}$	0	0,1778	0,136
$f_{tv} = \sin\left(\nu \frac{y}{\tau_p} \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\nu \cdot \frac{10}{12} \cdot \frac{180^\circ}{2}\right)$	0,707	0,2588	0,2588
$f_n = f_z \cdot f_t$	0	0,046	0,035

20.2.4. Kako treba odabrati korak svitka dvoslojnog namota 6-polnog stroja s ukupno 90 utora da bi se što više eliminirao: a) treći; b) peti; c) sedmi harmonički član, uz što manje smanjenje osnovnog?

$$p = 3 \quad \nu = 3 : y = \frac{2}{3} \tau_p = \frac{2}{3} \cdot 15 = 10 \rightarrow 1 + 10 = 11 \rightarrow 1 - 11$$

$$\underline{N = 90} \quad \nu = 5 : y = \frac{4}{5} \tau_p = \frac{4}{5} \cdot 15 = 12 \rightarrow 1 + 12 = 13 \rightarrow 1 - 13$$

$$\tau_p = \frac{N}{2p} = \frac{90}{6} = 15 \quad \nu = 7 : y = \frac{6}{7} \tau_p = \frac{6}{7} \cdot 15 = 12,85 \approx 13 \rightarrow 1 + 13 = 14 \rightarrow 1 - 14$$

$$f_{tv} = 0 \rightarrow y = ? \quad f_{t7} = 0,1045$$

20.2.5. Da li namot prema 4.a zadatku eliminira treći harmonički član: a) u krivulji protjecanja; b) u krivulji raspodjele indukcije u rasporu?

a) U krivulji protjecanja: DA.

b) Zbog zasićenja prisutan je treći harmonički član u krivulji raspodjele indukcije.

20.2.6. Stroj u 1. zadatku ima promjer $D = 80$ cm, duljinu $l = 30$ cm, duljinu zračnog raspora $\delta = 1$ mm i namotan je dijametralnim svicima koji zauzimaju $2/3$ ukupnog broja utora, s ukupno $w = 480$ zavoja. Amplituda osnovnog harmoničkog člana indukcije okretnog polja u rasporu iznosi $B_1 = 0,853$ T. Kolik napon u namotu inducira osnovni harmonički član ako je frekvencija napajanja 50 Hz?

$$D = 80 \text{ cm} \quad \omega = 2\pi f = 314 \rightarrow \omega_m = \frac{\omega}{p} = \frac{314}{6} = 52,36 \text{ rad/s}$$

$$l = 30 \text{ cm} \quad v = \omega_m r = 52,36 \cdot 0,4 = 20,94 \text{ m/s}$$

$$w = 480 \quad E_1 = \frac{B_1 l v}{\sqrt{2}} = \frac{0,853 \cdot 0,3 \cdot 20,94}{\sqrt{2}} = 3,7898 \text{ V}$$

$$B_1 = 0,853 \text{ T}$$

$$f = 50 \text{ Hz} \quad E = 2wE_1f_n = 2 \cdot 480 \cdot 3,7898 \cdot 0,829 = 3016 \text{ V}$$

$$\underline{p = 6}$$

$$2a) \rightarrow f_n = 0,829$$

20.2.7. U namotu iz 6. zadatka teče struja od 120 A. Kolika je maksimalna vrijednost protjecanja i kolika amplituda osnovnog harmoničkog člana ako je struja: a) istosmjerna; b) izmjenična?

$$a) \quad A = \frac{zI}{\frac{2}{3}D\pi} = \frac{2 \cdot 480 \cdot 120}{\frac{2}{3} \cdot 0,8\pi} = 68755 \text{ A/m}$$

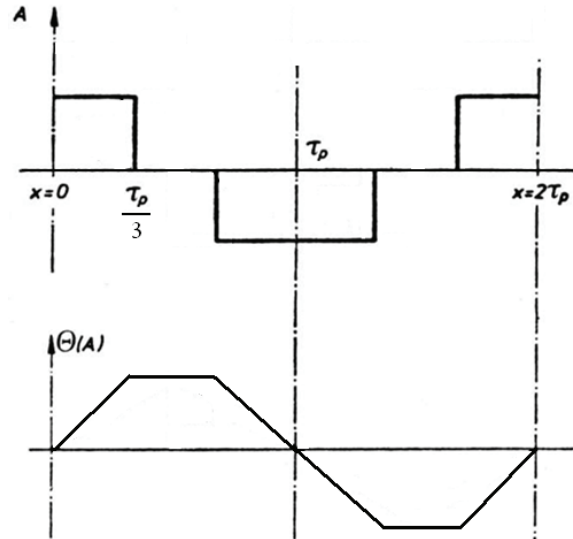
$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p} = \frac{0,8\pi}{12} = 0,209 \text{ m}$$

$$\Theta_m = A \frac{\tau_p}{3} = 4800 \text{ A}$$

$$\Theta_{1m} = \frac{4}{\pi} \frac{I}{2} \frac{w}{p} f_n = \frac{2}{\pi} \cdot 120 \cdot \frac{480}{6} \cdot 0,829 = 5066 \text{ A}$$

$$b) \quad \Theta'_m = \sqrt{2}\Theta_m = 6788 \text{ A}$$

$$\Theta'_{1m} = \sqrt{2}\Theta_{1m} = 7165 \text{ A}$$



1

20.2.8. Kolik će biti treći, peti i sedmi harmonički član u krivulji protjecanja iz 7. zadatka ako u namotu teče izmjenična struja? Koliko je to posto osnovnog harmoničkog člana?

Prema 3. zadatku: $f_{n3} = 0$ $f_{n5} = 0,1778$ $f_{n7} = 0,136$

$$\Theta_v = 0,9 \frac{w}{v} \frac{I}{p} f_{nv} = 0,9 \cdot \frac{480 \cdot 120}{6v} f_{nv} = 8640 \frac{f_{nv}}{v}$$

$$\Theta_3 = 0 \quad 0\%$$

$$\Theta_5 = 307 \text{ A} \quad 4,3\%$$

$$\Theta_7 = 168 \text{ A} \quad 2,3\%$$

20.2.9. Koji su glavni utorski harmonički članovi namota u 2.a i 2.b zadatku? Kolik je njihov namotni faktor?

U krivulji magnetske vodljivosti zračnog rasporeda osobito je istaknut član koji odgovara broju utora po polu q_p :

$$\Lambda_{q_p}(x) = \Lambda_{q_p} \cos\left(2q_p \frac{\pi}{\tau_p} x\right).$$

Osnovni harmonički član protjecanja dat će s tim članom vodljivosti dva harmonička člana u raspodjeli indukcije, i to reda:

¹ Ako se računa prema priručniku Bronštejn- Semendjajev, str. 646: $\Theta_{1m} = \frac{6\sqrt{3}}{\pi^2} \cdot 4800 = 5054$

$$2\xi + \nu = 2q_p + 1 = \frac{N}{p} + 1 = \frac{144}{6} + 1 = 25$$

$$2\xi - \nu = 2q_p - 1 = \frac{N}{p} - 1 = \frac{144}{6} - 1 = 23.$$

To su osnovni utorski harmonički članovi. U udžbeniku je izvedeno da je namotni faktor za utorske harmoničke članove **isti kao za osnovni harmonički član**. To čini utorske harmoničke članove osobito neugodnima jer ih ne možemo ukloniti zgodnim izborom namota a da pri tome istodobno ne uklonimo i osnovni harmonički član.

$$a) f_n = 0,829$$

$$b) f_n = 0,801$$

20.2.10. Dvoslojni namot 4-polnog (trofaznog) stroja s ukupno 24 utora ima osam svitaka s korakom 1-5, svaki svitak s 50 zavoja. Duljina raspora je $\delta = 0,6$ mm. Potrebno je u rasporu postići amplitudu osnovnog harmoničkog člana indukcije od 0,8 T. Kolika izmjenična struja mora teći u namotu? Kolik će biti treći i peti harmonički član indukcije ako se zanemari utjecaj zasićenja?

$$p = 2$$

$$N = 24$$

$$N_{sv} = 8$$

$$1-5 \rightarrow y = 4$$

$$w_s = 50$$

$$\delta = 0,6 \text{ mm}$$

$$B_1 = 0,8 \text{ T}$$

$$q_p = \frac{N}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

$$k = \frac{y}{\tau_p} = \frac{4}{6}$$

$$\frac{N_{sv}}{2p} = \frac{8}{4} = 2$$

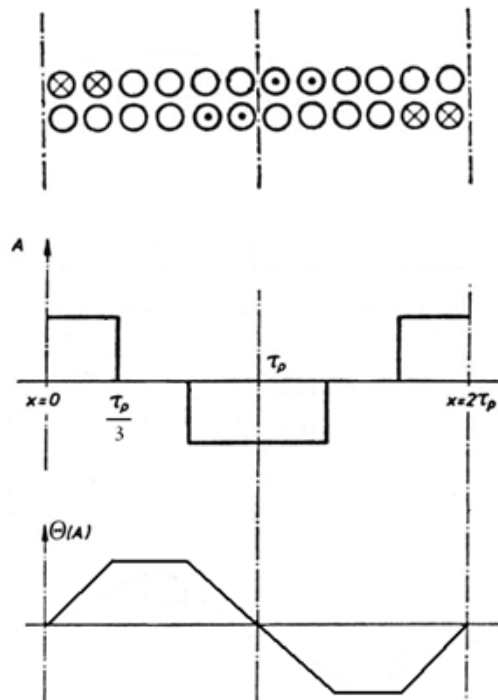
$$\alpha_m = \frac{2\pi}{N} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$$

$$\alpha = p\alpha_m = 2 \cdot 15^\circ = 30^\circ$$

$$q = \frac{q_p}{m} = \frac{6}{3} = 2$$

$$w = w_s N_{sv} = 50 \cdot 8 = 400$$

$$B_1 = \frac{\mu_0 \Theta_1}{\delta}$$



$$\Theta_1 = \frac{B_1 \delta}{\mu_0} = \frac{0,8 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 382 \text{ A}$$

$$\Theta_v = 0,9 \frac{w}{v} \frac{I}{p} f_{nv} \rightarrow B_3 = 0 \text{ T}$$

$$I = \frac{v p \Theta_1}{0,9 w f_{n1}} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 382}{0,9 \cdot 400 \cdot 0,8365} = 2,537 \text{ A}$$

ν	1	3	5
$f_{zv} = \frac{\sin\left(\nu q \frac{\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\nu \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\nu \cdot 2 \cdot \frac{30^\circ}{2}\right)}{2 \sin\left(\nu \cdot \frac{30^\circ}{2}\right)}$	0,9659	0,7071	0,2588
$f_{tv} = \sin\left(\nu \frac{y}{\tau_p} \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\nu \cdot \frac{4}{6} \cdot \frac{180^\circ}{2}\right)$	0,866	0	0,866
$f_n = f_z \cdot f_t$	0,8365	0	0,224

$$\Theta_5 = 0,9 \cdot \frac{400}{5} \cdot \frac{2,537}{2} \cdot 0,224 = 20,47 \text{ A}$$

$$B_5 = \frac{\mu_0 \Theta_5}{\delta} = \frac{4\pi 10^{-7} \cdot 20,47}{0,6 \cdot 10^{-3}} = 0,043 \text{ T}$$

20.2.11. Kad bi namot u 10. zadatku bio jedan od tri jednaka fazna namota trofaznog stroja, kolika bi struja u namotu bila potrebna da se postigne ista indukcija od 0,8 T?

$$m = 3 \quad \Theta_v = 1,35 \frac{w}{\nu} \frac{I}{p} f_{nv} \rightarrow I' = \frac{\nu p \Theta_1}{1,35 w f_{n1}} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 382}{1,35 \cdot 400 \cdot 0,8365} = 1,69 \text{ A}$$

$$\underline{B = 0,8 \text{ T}} \quad I' = \frac{2}{3} I$$

20.2.12. Namot iz 10. zadatka nalazi se na statoru, a rotor je uzbuđen istosmjernom strujom te proizvodi polje u rasporu s komponentama $B_1 = 0,8 \text{ T}$, $B_3 = 0,1 \text{ T}$, $B_5 = 0,05 \text{ T}$. Rotor se vrti brzinom od 1500 min^{-1} . Promjer stroja je 15 cm, duljina 5 cm. Kolik će se napon inducirati i koja će biti njegova frekvencija za : a) osnovni; b) treći; c) peti harmonički član?

$$B_1 = 0,8 \text{ T} \quad \text{a) } \omega_m = \frac{n\pi}{30} = \frac{1500\pi}{30} = 50\pi$$

$$B_3 = 0,1 \text{ T} \quad \omega = p\omega_m = 2 \cdot 50\pi = 100\pi$$

$$B_5 = 0,05 \text{ T} \quad f_1 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50 \text{ Hz}$$

$$n = 1500 \text{ min}^{-1} \quad v = \omega_m r = 50\pi \cdot \frac{0,15}{2} = 11,781 \text{ m/s}$$

$$D = 15 \text{ cm} \quad E_{1v} = \frac{B_1 l v}{\sqrt{2}} = \frac{0,8 \cdot 0,05 \cdot 11,781}{\sqrt{2}} = 0,3332 \text{ V}$$

$$\underline{l = 5 \text{ cm}} \quad E_1 = 2wE_{1v}f_{n1} = 2 \cdot 400 \cdot 0,3332 \cdot 0,8365 = 223 \text{ V}$$

$$\text{b) } f_{n3} = 0 \rightarrow E_3 = 0$$

$$\text{c) } E_{5v} = \frac{B_5 l v}{\sqrt{2}} = \frac{0,05 \cdot 0,05 \cdot 11,781}{\sqrt{2}} = 0,0208 \text{ V}$$

$$E_5 = 2wE_{5v}f_{n5} = 2 \cdot 400 \cdot 0,0208 \cdot 0,224 = 3,73 \text{ V}$$

$$f_5 = 5f_1 = 250 \text{ Hz}$$

Višefazni namoti

20.3.1. Koliko utora mora imati stator trofaznog 4-polnog stroja da bi se mogao smjestiti namot s tri utora po polu i fazi? Kolik je geometrijski kut između susjednih utora? Kolik je kut između napona susjednih utora u zvijezdi napona?

$$m = 3 \qquad q = \frac{N}{2pm} \rightarrow N = 2pmq = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36$$

$$p = 2 \qquad \alpha_g = \frac{2\pi}{N} = \frac{360^\circ}{36} = 10^\circ$$

$$\underline{q = 3} \qquad \alpha = p\alpha_g = 2 \cdot 10^\circ = 20^\circ$$

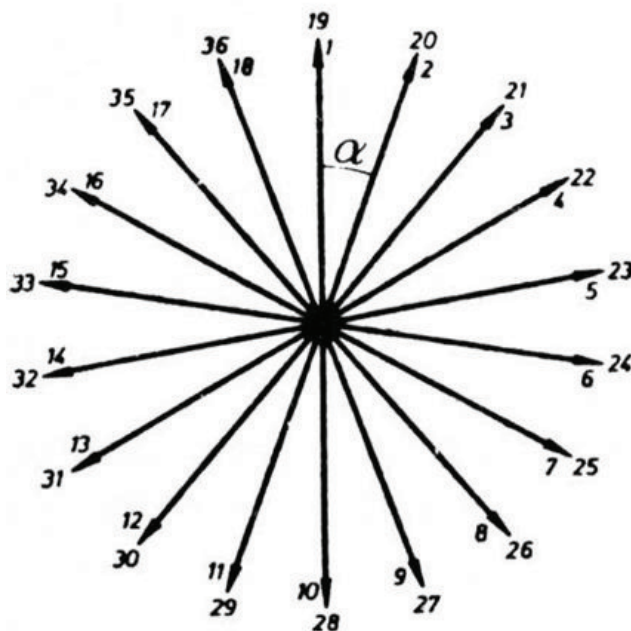
20.3.2. Dvofazni 6-polni stroj izveden je s 48 statorskih utora. Kolik je broj utora po polu i fazi q , te kut između napona susjednih utora?

$$m = 2 \qquad q = \frac{N}{2pm} = \frac{48}{2 \cdot 3 \cdot 2} = 4$$

$$p = 3 \qquad \alpha_g = \frac{2\pi}{N} = \frac{360^\circ}{48} = 7,5^\circ$$

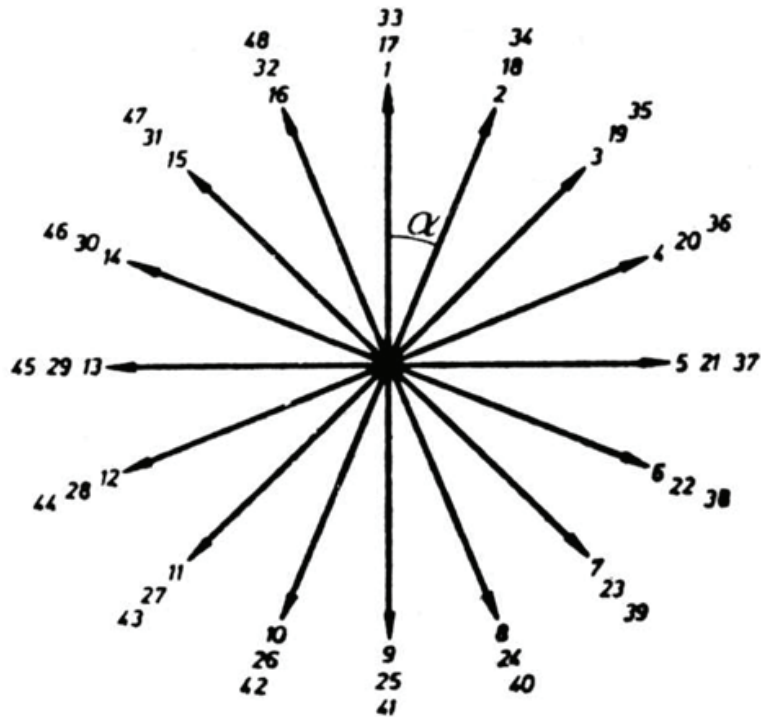
$$\underline{N = 48} \qquad \alpha = p\alpha_g = 3 \cdot 7,5^\circ = 22,5^\circ$$

20.3.3. Kako izgleda zvijezda napona za namot u 1. zadatku?



Sl. 20.25. Zvijezda napona

20.3.4. Kako izgleda zvijezda napona za namot u 2. zadatku?



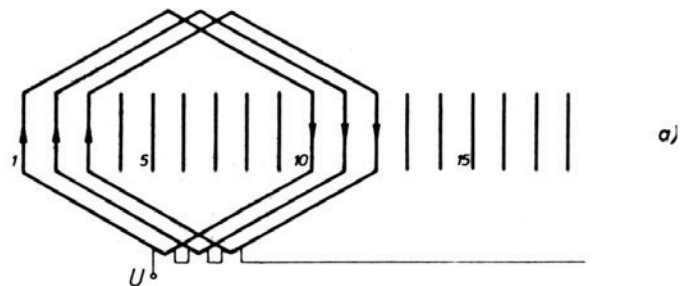
Sl. 20.26. Zvijezda napona

20.3.5. Nacrtajte shemu namota iz 1. zadatka za fazu A i samo za jedan par polova ako je namot:

a) 1-slojni; b) 2-slojni s korakom 1-8. Predviđa se izvedba s jednakim svcicima.

a) dijametralni svitak

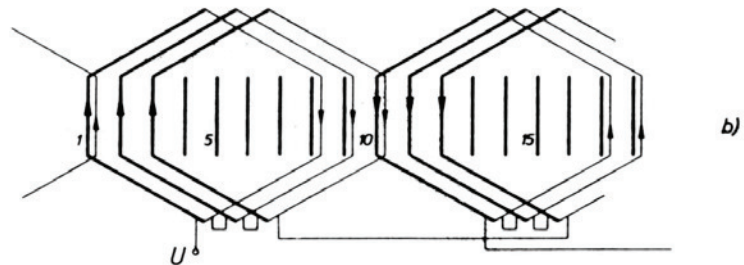
$$\tau_p = \frac{N}{2p} = \frac{36}{2 \cdot 2} = 9$$



b) skraćeni svitak

$$1 + y_1 = 8 \rightarrow y_1 = 7$$

$$k = \frac{y}{\tau_p} = \frac{7}{9}$$



Sl. 20.27. Shema: a) 1-slojnog, b) 2-slojnog namota za jednu fazu i jedan par polova

20.3.6. Prikažite shemu namota iz 2. zadatka za fazu A tablicom prema str. 468, ako je namot:
a) 1-slojni; b) 2-slojni s korakom 1-7.

$$\begin{array}{ll}
 m = 2 & \text{a) dijametralni svitak: } \tau_p = \frac{N}{2p} = \frac{48}{2 \cdot 3} = 8 \\
 p = 3 & \text{b) skraćeni svitak: } 1 + y_1 = 7 \rightarrow y_1 = 6 \\
 N = 48 & \\
 \underline{q = 4} & k = \frac{y}{\tau_p} = \frac{6}{8} = \frac{3}{4}
 \end{array}$$

a) 1 2 3 4 17 18 19 20 33 34 35 36
(9) (10) (11) (12) (25) (26) (27) (28) (41) (42) (43) (44)

b) gornji sloj 1 2 3 4 (9) (10) (11) (12) 17 18 19 20
donji sloj (7) (8) (9) (10) 15 16 17 18 (23) (24) (25) (26)

gornji sloj (25) (26) (27) (28) 33 34 35 36 (41) (42) (43) (44)
donji sloj 31 32 33 34 (39) (40) (41) (42) 47 48 1 2

Brojka u zagradi označuje da se ta strana svitka uključuje u suprotnom smislu u smjer obilaženja namota.

20.3.7. Kolik je namotni faktor za osnovni, treći i peti harmonički član namota u 5.a i 5.b zadatku?

	ν	1	3	5
$m = 3$	a) $f_{zv} = \frac{\sin\left(\nu q \frac{\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\nu \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\nu \cdot 3 \cdot \frac{20^\circ}{2}\right)}{3 \sin\left(\nu \cdot \frac{20^\circ}{2}\right)}$	0,960	0,667	0,218
$p = 2$				
$q = 3$	b) $f_{tv} = \sin\left(\nu \frac{y}{\tau_p} \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\nu \cdot \frac{7}{9} \cdot \frac{180^\circ}{2}\right)$	0,9397	0,5	0,174
$N = 36$				
$\alpha = 20^\circ$				
$\frac{y}{\tau_p} = \frac{7}{9}$				
	$f_n = f_z \cdot f_t$	0,902	0,333	0,038

20.3.8. Koji su glavni utorski harmonički članovi za namot iz 6.b zadatka i kolik je namotni faktor za njih?

$$\begin{array}{lll}
 N = 48 & q_p = \frac{N}{2p} = \frac{48}{2 \cdot 3} = 8 & 2q_p + 1 = 2 \cdot 8 + 1 = 17 \\
 p = 3 & & 2q_p - 1 = 2 \cdot 8 - 1 = 15 \\
 \alpha = 22,5^\circ & & \\
 \frac{y}{\tau_p} = \frac{3}{4} & &
 \end{array}$$

$$\underline{q = 4} \quad f_z = \frac{\sin\left(4 \cdot \frac{22,5^\circ}{2}\right)}{4 \sin\left(\frac{22,5^\circ}{2}\right)} = 0,906$$

$$f_t = \sin\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{180^\circ}{2}\right) = 0,9238 \quad f_{n1} = f_z f_t = 0,837 = f_{n15} = f_{n17}$$

20.3.9. Trofazni 4-polni jednoslojni namot s $q = 3$ iz 7.a zadatka ima u svakom svitku 50 zavoja. Kolika je amplituda osnovnog, trećeg i petog harmoničkog člana okretnog protjecanja ako se namot napaja trofaznom strujom od 2,7 A po fazi?

$$m = 3 \quad N_s = \frac{N}{2} = \frac{36}{2} = 18$$

$$p = 2 \quad \frac{N_s}{m} = \frac{18}{3} = 6$$

ν	1	3	5
$f_{n\nu}$	0,960	0,667	0,218
Θ_ν	525	0	23,8

$$I = 2,7 \text{ A} \quad w = 6w_s = 300$$

$$q = 3 \quad \Theta_\nu = 1,35 \frac{w}{\nu} \frac{I}{p} f_{n\nu} = 1,35 \cdot \frac{300 \cdot 2,7}{2\nu} \cdot f_{n\nu} = 546,75 \frac{f_{n\nu}}{\nu}$$

$$\underline{w_s = 50} \quad \Theta_3 = 546,75 \cdot \frac{f_{n3}}{3} = 546,75 \cdot \frac{0,667}{3} = 122 \text{ A} - \text{ovo okretno polje ne postoji, iako za}$$

njega dobivamo vrijednost prema navedenoj formuli, jer ne zadovoljava uvjete da izrazi:

$$\frac{\nu - \mu}{m} = \frac{3 - 1}{3} \quad i \quad \frac{\nu + \mu}{m} = \frac{3 + 1}{3} \quad \text{za } \nu = 3k \quad ; \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

moraju biti jednaki cijelom broju da bi direktno, odnosno inverzno okretno protjecanje postojalo. Tu je ν red prostornog harmonika, a μ red vremenskog harmonika koji uzrokuju to okretno protjecanje.

20.3.10. Stator 60-polnog trofaznog generatora ima 405 utora. Kolik je broj utora po polu i fazi? Kolik je kut između napona susjednih utora? Koliko krakova ima zvijezda napona i koliko utorskih napona predstavlja svaki krak?

$$p = 30 \quad q = \frac{N}{2pm} = \frac{405}{2 \cdot 30 \cdot 3} = 2 \frac{1}{4} \quad \frac{360^\circ}{26 \frac{2}{3}} = 13 \frac{1}{2} \rightarrow 13 \frac{1}{2} \cdot 2 = 27$$

$$m = 3 \quad \alpha_g = \frac{360^\circ}{405} = 0,88888^\circ \quad \frac{405}{27} = 15$$

$$\underline{N = 405} \quad \alpha = p\alpha_g = 30 \cdot 0,88888^\circ = 26 \frac{2}{3}^\circ$$

Za dva para polova zvijezda će napona imati cijeli broj krakova. Svaki krak predstavlja 15 utorskih napona.

Kolektorski namoti

20.4.1. Istosmjerni 4-polni stroj građen za napon od 220 V pri brzini vrtnje od 1500 min⁻¹ ima tok po polu 476 · 10⁻⁴ Wb. Koliko zavoja mora imati namot armature ako se izvede kao jednovojni petljasti namot?

$$\begin{aligned}
 p &= 2 = a & v &= \frac{D\pi n}{60} = \frac{2p\tau_p n}{60} \\
 E &= 220 \text{ V} & e_{sr} &= B_{sr} l v = \frac{\Phi_{gl}}{l\tau_p} \cdot l \cdot \frac{2p\tau_p n}{60} = \frac{pn}{30} \Phi_{gl} = \frac{2 \cdot 1500}{30} \cdot 476 \cdot 10^{-4} = 4,76 \text{ V} \\
 n &= 1500 \text{ min}^{-1} & E &= \frac{z}{2a} e_{sr} \rightarrow z = \frac{2aE}{e_{sr}} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 220}{4,76} = 184,87 \approx 184 \\
 \Phi_{gl} &= 476 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} & w &= \frac{z}{2} = 92
 \end{aligned}$$

20.4.2. Stroj iz 1. zadatka građen je za struju od 1185 A. Kolik je presjek vodiča armature ako gustoća struje iznosi 6,3 A/mm²?

$$\begin{aligned}
 I_a &= 1185 \text{ A} & I_v &= \frac{I_a}{2a} = \frac{1185}{2 \cdot 2} = 296,25 \text{ A} \\
 J &= 6,3 \text{ A/mm}^2 & q_{vp} &= \frac{I_v}{J} = \frac{296,25}{6,3} = 47 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

20.4.3. Koju će snagu približno dati stroj iz 1. i 2. zadatka? Zanimarite gubitke.

$$\begin{aligned}
 E &= 220 \text{ V} & P &= EI_a = 220 \cdot 1185 = 260 \text{ kW} \\
 I_a &= 1185 \text{ A}
 \end{aligned}$$

20.4.4. Stroj iz 1. zadatka treba izvesti s jednovojnim valovitim namotom za napon od 500 V. Koliki približno mora biti broj zavoja? Koliki može biti presjek vodiča ako je u utorima isti ukupan presjek za bakar kao u 1. i 2. zadatku?

$$\begin{aligned}
 E &= 500 \text{ V} & z &= \frac{2aE}{e_{sr}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 500}{4,76} = 210 & \rightarrow w_a &= \frac{z}{2} = 105 \\
 a &= 1 & q_{vv} &= q_{vp} \frac{92}{105} = 41,2 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

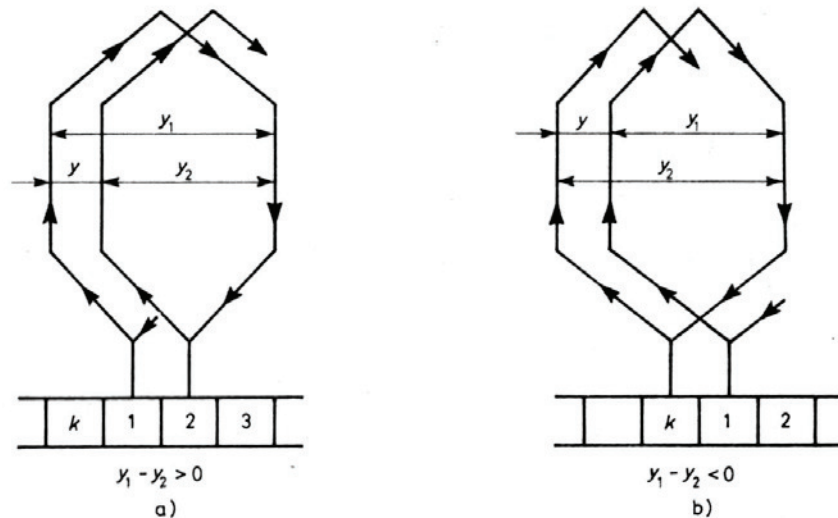
20.4.5. Kolika će biti približna snaga stroja iz 4. zadatka? Gubitke zanemarite, a gustoću struje uzmite kao u 2. zadatku.

$$I_{vv} = I_{vp} \frac{q_{vv}}{q_{vp}} = 296,25 \cdot \frac{41,2}{47} = 259,7 \text{ A} = \frac{I_a}{2a} = \frac{I_a}{2 \cdot 1}$$

$$I_a = 2I_{vv} = 2 \cdot 259,7 = 519,4 \text{ A}$$

$$P = EI_a = 500 \cdot 519,4 = 260 \text{ kW}$$

20.4.6. Stroj u 1. zadatku izveden je s 92 utora i 92 kolektorske lamele. Koliki je broj zavoja po svitku? Kolik treba biti korak svitka y_1 , a kolik spojni korak y_2 ?



Sl. 2. Uz tumačenje o koraku nekrižanog i križanog petljastog namota

$$N = 92 \quad \text{broj svitaka jednak je broju kolektorskih lamela } k \rightarrow w_s = \frac{w}{k} = \frac{92}{92} = 1$$

$$k = 92 \quad \text{kod kolektorskog namota nastojimo načiniti dijametralni svitak: } y_1 = \frac{N}{2p} = \frac{92}{4} = 23 = \tau_p$$

$$w = 92 \quad \text{za petljasti jednovojni nekrižani namot korak namota je: } y = y_1 - y_2 = 1$$

$$p = 2 \quad \text{spojni korak je: } y_2 = y_1 - y = 23 - 1 = 22$$

20.4.7. Kolik će biti broj kolektorskih lamela, broj zavoja po svitku i broj svitaka po utoru ako se za stroj s jednovojnim valovitim namotom prema 4. zadatku upotrijebi rez rotora: a) sa 105 utora; b) s 35 utora?

$$w_a = 105$$

$$\text{a) } N = 105$$

$$u = 1$$

$$k = Nu = 105 \cdot 1 = 105$$

$$w_s = \frac{w_a}{k} = \frac{105}{105} = 1$$

$$\text{b) } N = 35$$

$$u = 3$$

$$k = Nu = 35 \cdot 3 = 105$$

$$w_s = \frac{w_a}{k} = \frac{105}{105} = 1$$

ili

$$u = 1$$

$$k = Nu = 35 \cdot 1 = 35$$

$$w_s = \frac{w_a}{k} = \frac{105}{35} = 3$$

20.4.8. Kolik mora biti korak svitka y_1 , a kolik spojni korak y_2 ako se stroj iz zadatka 7.a izvede s valovitim namotom?

$$N = 105 \quad \frac{N}{p} = \frac{105}{2} = 52,5 \quad \rightarrow \quad y = 53 \quad y = y_1 + y_2$$

$$\underline{p = 2} \quad \frac{N}{2p} = \frac{105}{4} = 26,25 \quad \rightarrow \quad y_1 = 26 \quad \rightarrow \quad y_2 = y - y_1 = 27$$

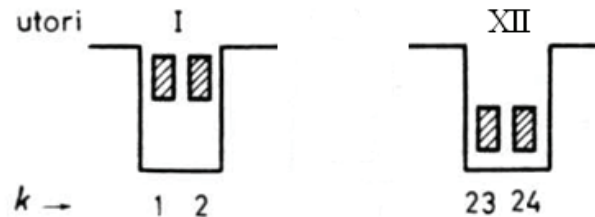
20.4.9. Istosmjerni 6-polni stroj ima rotor sa 67 utora, a predviđeno je da u svaki sloj dođu dvije strane svitka jedna uz drugu. Koliko lamela mora imati kolektor? Kolik treba biti korak svitka, a kolik spojni korak da bi se dobio jednovojni desnovojni valoviti namot s jednakim svcicima?

$$p = 3 \quad k = Nu = 67 \cdot 2 = 134 \quad y_1 = 22 \text{ lamele}$$

$$N = 67 \quad \text{(tj. I – XII utor)}$$

$$\underline{u = 2} \quad y = \frac{k \pm 1}{p} = \frac{134 + 1}{3} = 45 \text{ lamela} \quad y_2 = 23 \text{ lamele}$$

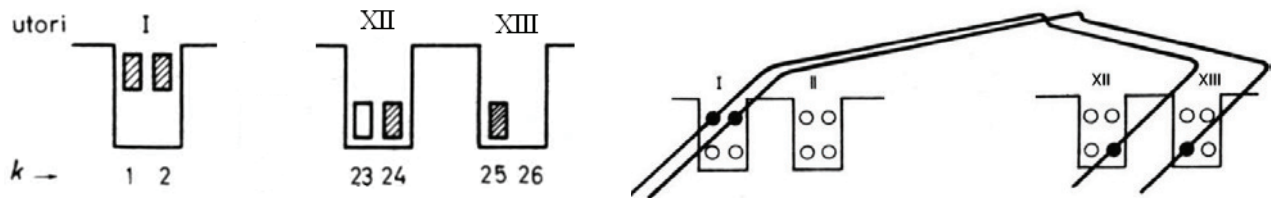
Za križani valoviti namot izabrali smo $y = \frac{k+1}{p}$.



20.4.10. Kolike treba uzeti korake y_1 i y_2 u 9. zadatku da se dobije tzv. stepeničasti namot kod kojeg donje strane svitaka iz istog utora leže u različitim utorima?

$$y_1 = 23$$

$$y_2 = 22$$



20.4.11. Koliko se zavoja po svitku mora uzeti za namot iz 9. zadatka da se dobije napon od 600 V ako je tok po polu $223 \cdot 10^{-4}$ Vs, a brzina vrtnje 1000 min^{-1} ?

$$U = 600 \text{ V} \quad U = Blv \frac{z}{2a} = \frac{\Phi_{gl} 2p}{D\pi l} \cdot l \cdot \frac{n\pi D}{30 \cdot 2} \cdot \frac{z}{2a} = \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi_{gl} nz}{60}$$

$$\Phi_{gl} = 223 \cdot 10^{-4} \text{ Vs}$$

$$n = 1000 \text{ min}^{-1}$$

$$z = \frac{60aU}{p\Phi_{gl}n} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 600}{3 \cdot 223 \cdot 10^{-4} \cdot 1000} \approx 536 \text{ vodiča}$$

$$a = 1$$

$$\underline{k = 134}$$

$$w = \frac{z}{2} = 268 = kw_s \rightarrow w_s = 2$$

20.4.12. Koliko bi zavoja po svitku trebalo uzeti kad bi se namot iz 9, 10. i 11. zadatka izveo kao petljasti jednovojni namot? Koliki bi bili koraci y_1 i y_2 za taj namot i da li bi on bio simetričan?

$$a = p = 3$$

$$\underline{y = y_1 - y_2}$$

$$z = \frac{60aU}{p\Phi_{gl}n} = 3 \cdot 536 = 1608$$

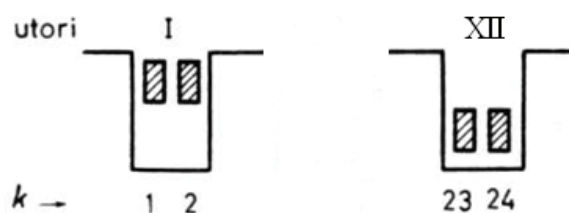
$$w = \frac{z}{2} = 804$$

$$w_s = \frac{w}{k} = \frac{804}{134} = 6$$

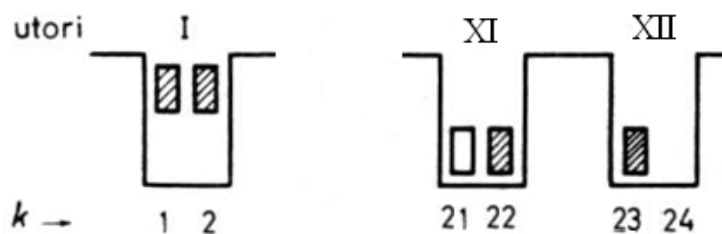
$$\frac{N}{p} = \frac{67}{3} \neq \text{cijeli broj} \rightarrow \text{namot je nesimetričan}$$

a) jednaki svici

$$y'_1 = \frac{k}{2p} = \frac{134}{2 \cdot 3} = 22,333 \rightarrow y_1 = 22 \rightarrow y_2 = y_1 - y = 22 - 1 = 21$$



b) stepeničasti namot $y_1 = 21 \rightarrow y_2 = y_1 - y = 21 - 1 = 20$



20.4.13. Petljasti jednovojni kolektorski namot ima korak svitka 8, a korak spajanja 7. Stroj je četveropolni. Kolik je korak namatanja y i koliko paralelnih grana ima namot?

$$y_1 = 8$$

$$y_2 = 7$$

$$\underline{p = 2}$$

$$y = y_1 - y_2 = 8 - 7 = 1$$

$$2a = 2p = 4$$

20.4.14. Valoviti kolektorski namot 6-polnog stroja ima korak svitka 9, a korak spajanja 10. Kolik je korak namatanja y i koliko paralelnih grana ima namot ako je jednovojan?

$$\begin{aligned} p &= 3 & y &= y_1 + y_2 = 9 + 10 = 19 \\ y_1 &= 9 \\ \underline{y_2} &= 10 & a &= 1 \rightarrow 2a = 2 \end{aligned}$$

20.4.15. Istosmjerni generator sa šest polova i s petljastim jednovojnim namotom građen je za napon od 500 V, a treba davati 120 kW. Za koju struju treba dimenzionirati njegove vodiče?

$$\begin{aligned} p &= 3 = a & I_a &= \frac{P}{U} = \frac{120000}{500} = 240 \text{ A} \\ y &= 1 \\ U &= 500 \text{ V} & I_v &= \frac{I_a}{2a} = \frac{240}{2 \cdot 3} = 40 \text{ A} \\ \underline{P} &= 120 \text{ kW} \end{aligned}$$

20.4.16. Za koju struju treba dimenzionirati vodiče valovitog jednovojnog namota 4-polnog istosmjernog motora koji će uzimati struju od 60 A?

$$\begin{aligned} a &= 1 \\ p &= 2 & I_v &= \frac{I_a}{2a} = \frac{60}{2 \cdot 1} = 30 \text{ A} \\ \underline{I_a} &= 60 \text{ A} \end{aligned}$$

20.4.17. Istosmjerni četveropolni motor ima petljasti jednovojni namot s ukupno 304 vodiča, a uzbuđen je tako da mu je tok po polu $\Phi = 0,036 \text{ Wb}$. Kojom se brzinom mora vrtjeti rotor da bi se u namotu inducirao napon od 220 V?

$$\begin{aligned} p &= 2 = a & U &= \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi_{gl} n z}{60} \\ y &= 1 \\ z &= 304 \\ \Phi_{gl} &= 0,036 \text{ Wb} & n &= \frac{60 a U}{p \Phi_{gl} z} = \frac{60 \cdot 2 \cdot 220}{2 \cdot 0,036 \cdot 304} = 1206 \text{ min}^{-1} \\ \underline{U} &= 220 \text{ V} \end{aligned}$$

20.4.18. Istosmjerni 6-polni motor ima petljasti jednovojni namot sa 612 vodiča. Koliko bi vodiča morao imati jednaki motor s istim magnetskim prilikama, za isti napon i brzinu vrtnje, ali izveden s valovitim jednovojnim namotom?

$$p = 3 = a \quad U = \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi_{gl} n z}{60} \quad U = k' \frac{z_v}{a_v} = k' \frac{z_p}{a_p}$$

$$y = 1 \quad z_v = \frac{z_p}{a_p} \cdot a_v = \frac{612}{3} \cdot 1 = 204$$

$$\underline{z_p = 612}$$

20.4.19. Struja po grani istosmjernog generatora sa šest polova i s petljastim jednovojnim namotom iznosi 20 A, a napon po grani 220 V. Koliku snagu daje generator?

$$p = 3 = a \quad I_a = 2aI_v = 2 \cdot 3 \cdot 20 = 120 \text{ A}$$

$$y = 1$$

$$U = 220 \text{ V} \quad P = UI_a = 220 \cdot 120 = 26,4 \text{ kW}$$

$$\underline{I_v = I_g = 20 \text{ A}}$$

20.4.20. Magnetski tok po polu istosmjernog 6-polnog nezavisno uzbuđenog generatora iznosi 0,012 Wb. Na obodu rotora smještena su 522 vodiča, a stroj se vrti brzinom od 1400 min⁻¹. Kolik je napon na četkicama ako je namot izveden kao: a) petljasti; b) valoviti jednovojni namot?

$$p = 3 \quad \text{a) } a = 3 \quad U = \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi_{gl} n z}{60} = \frac{3}{3} \cdot \frac{0,012 \cdot 1400 \cdot 522}{60} = 146,2 \text{ V}$$

$$\Phi_{gl} = 0,012 \text{ Wb}$$

$$z = 522 \quad \text{b) } a = 1 \quad U = \frac{p}{a} \cdot \frac{\Phi_{gl} n z}{60} = \frac{3}{1} \cdot \frac{0,012 \cdot 1400 \cdot 522}{60} = 438,5 \text{ V}$$

$$\underline{n = 1400 \text{ min}^{-1}}$$

REAKTANCIJE NAMOTA

Namoti i njihove konstante

21.1.1. Dva induktivno vezana namota imaju brojeve zavoja $w_1 = 100$ i $w_2 = 50$. Magnetski tokovi svedeni na ukupni broj zavoja iznose:

a) pri struji $i_1 = 5$ A, $i_2 = 0$: $\Phi_1 = 10^{-2}$ Wb, $\Phi_2 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ Wb;

a) pri struji $i_1 = 0$, $i_2 = 10$ A: $\Phi_1 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ Wb, $\Phi_2 = 0,9 \cdot 10^{-2}$ Wb.

Koliki su samoinduktiviteti namota L_1 i L_2 ? Koliki je međuinuktivitet L_{12} ?

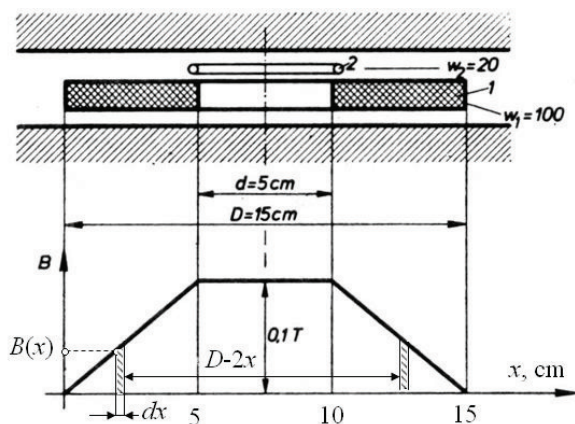
$w_1 = 100$	a) $i_1 = 5$ A	$\Psi_1 = w_1 \Phi_1 = 100 \cdot 10^{-2} = 1$ Wb
$w_2 = 50$	$i_2 = 0$	$L_1 = \frac{\Psi_1}{i_1} = \frac{1}{5} = 0,2$ H
	$\Phi_1 = 10^{-2}$ Wb	$\Psi_2 = w_2 \Phi_2 = 50 \cdot 0,8 \cdot 10^{-2} = 0,4$ Wb
	$\Phi_2 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ Wb	$L_{12} = \frac{\Psi_2}{i_1} = \frac{0,4}{5} = 0,08$ H
	b) $i_1 = 0$ A	$\Psi_1 = w_1 \Phi_1 = 100 \cdot 0,8 \cdot 10^{-2} = 0,8$ Wb
	$i_2 = 10$ A	$L_{12} = \frac{\Psi_1}{i_2} = \frac{0,8}{10} = 0,08$ H
	$\Phi_1 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ Wb	$\Psi_2 = w_2 \Phi_2 = 50 \cdot 0,9 \cdot 10^{-2} = 0,45$ Wb
	$\Phi_2 = 0,9 \cdot 10^{-2}$ Wb	$L_2 = \frac{\Psi_2}{i_2} = \frac{0,45}{10} = 0,045$ H

21.1.2. Kolik je tok Φ_1 , a kolik tok Φ_2 , te koliki su ulančani tokovi Ψ_1 i Ψ_2 ako u namotima iz 1. zadatka teku struje: a) $i_1 = 4$ A, $i_2 = 3$ A; b) $i_1 = 4$ A, $i_2 = -3$ A? Pretpostavite linearne odnose.

a) $i_1 = 4$ A	$\Psi_1 = L_1 i_1 + L_{12} i_2 = 0,2 \cdot 4 + 0,08 \cdot 3 = 1,04$ Wb	$\Phi_1 = \frac{\Psi_1}{w_1} = 1,04 \cdot 10^{-2}$ Wb
$i_2 = 3$ A	$\Psi_2 = L_{12} i_1 + L_2 i_2 = 0,08 \cdot 4 + 0,045 \cdot 3 = 0,455$ Wb	$\Phi_2 = \frac{\Psi_2}{w_2} = 0,91 \cdot 10^{-2}$ Wb
b) $i_1 = 4$ A	$\Psi_1 = L_1 i_1 + L_{12} i_2 = 0,2 \cdot 4 - 0,08 \cdot 3 = 0,56$ Wb	$\Phi_1 = \frac{\Psi_1}{w_1} = 0,56 \cdot 10^{-2}$ Wb
$i_2 = -3$ A	$\Psi_2 = L_{12} i_1 + L_2 i_2 = 0,08 \cdot 4 - 0,045 \cdot 3 = 0,185$ Wb	$\Phi_2 = \frac{\Psi_2}{w_2} = 0,37 \cdot 10^{-2}$ Wb

Glavni i rasipni tok

21.2.1. Dva su svitka namotana oko iste osi u rasporu između dva pola od željeza ($\mu \approx \infty$) tako da se silnice mogu smatrati paralelnim s osi svitaka (sl. 21.2). Prvi je svitak plosnat s okruglim zavojima, dimenzija prema slici. Drugi je koncentriran na unutrašnjem promjeru prvog svitka. Brojevi zavoja su $w_1 = 100$ i $w_2 = 20$. Struja u svitku 1 takva je da indukcija u sredini iznosi 0,1 T. Kolik je stvarni tok $\Phi_{(1)}$ svitka 1, a kolik je taj tok sveden na puni broj zavoja w_1 ? Kolik je stvarni i svedeni tok svitka 2? Koliki su ulančani tokovi Ψ_1 i Ψ_2 ?



Sl. 21.2. Smještaj svitaka u 1. zadatku.

$$w_1 = 100 \quad B(x) = \frac{B}{0,05} x$$

$$w_2 = 20$$

$$B = 0,1 \text{ T} \quad w(x) = \frac{w_1}{0,05} x$$

$$d = 5 \text{ cm}$$

$$D = 15 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} d\Phi(x) &= B(x)(D - 2x)\pi dx = \frac{B}{0,05} x(0,15 - 2x)\pi dx \\ &= B(3x - 40x^2)\pi dx \end{aligned}$$

$$d\Psi(x) = w(x)d\Phi(x) = Bw_1 \left(\frac{x}{0,05} \right)^2 (0,15 - 2x)\pi dx = Bw_1 \left(\frac{0,15x^2}{0,05^2} - \frac{2x^3}{0,05^2} \right) \pi dx$$

$$\Psi_\sigma = \int_0^{0,05} d\Psi(x) = Bw_1 \left(\frac{0,15}{0,05^2} \cdot \frac{0,05^3}{3} - \frac{2}{0,05^2} \cdot \frac{0,05^4}{4} \right) \pi = 39,27 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\Phi_m = B \left(\frac{d}{2} \right)^2 \pi = 0,1 \cdot \frac{0,05^2}{4} \pi = 0,1963 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\Psi_m = w_1 \Phi_m = 0,01963 \text{ Wb}$$

$$\Psi_1 = \Psi_m + \Psi_\sigma = 0,0589 \text{ Wb}$$

$$\Phi_1 = \frac{\Psi_1}{w_1} = 0,589 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \text{ - tok svitka 1 sveden na puni broj zavoja } w_1$$

$$\Phi_{(\sigma)} = \int_0^{0,05} d\Phi(x) = \int_0^{0,05} B(3x - 40x^2)\pi dx = B \left(3 \cdot \frac{0,05^2}{2} - 40 \cdot \frac{0,05^3}{3} \right) \pi = 0,6545 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{(1)} = \Phi_m + \Phi_{(\sigma)} = (0,1963 + 0,6545) \cdot 10^{-3} = 0,85 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \text{ - stvarni tok svitka 1}$$

$$\Phi_{(2)} = \Phi_2 = \Phi_m = 0,1963 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\Psi_2 = \Phi_2 w_2 = 0,00393 \text{ Wb}$$

21.2.2. Kolik je glavni, a kolik rasipni tok svitka 1 s obzirom na svitak 2 (sveden na puni broj zavoja) u 1. zadatku? Koliki su odgovarajući ulančani tokovi?

$$\Phi_m = 0,1963 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\Psi_{m1} = \Phi_m w_1 = 0,01963 \text{ Wb}$$

$$\Phi_\sigma = \frac{\Psi_\sigma}{w_1} = \frac{39,27 \cdot 10^{-3}}{100} = 0,393 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\Psi_{\sigma 1} = \Psi_\sigma = 0,0393 \text{ Wb}$$

21.2.3. Koliki su ukupni induktiviteti, rasipni induktiviteti i međui induktivitet primara i sekundara u 1. zadatku ako je u namotu 1 bila potrebna struja od 4 A da stvori opisano polje?

$$L_1 = \frac{\Psi_1}{I_1} = \frac{0,0589}{4} = 0,0147 \text{ H}$$

$$L_{\sigma 1} = \frac{\Psi_{\sigma 1}}{I_1} = \frac{0,03927}{4} = 0,0098 \text{ H}$$

$$L_2 = \frac{\Psi_2}{I_1 \frac{w_1}{w_2}} = \frac{0,00393}{4 \cdot \frac{100}{20}} = 0,196 \cdot 10^{-3} \text{ H} = L_{m2}$$

$$L_{\sigma 2} = 0$$

$$L_{m1} = \frac{\Psi_{m1}}{I_1} = \frac{0,01963}{4} = 0,0049 \text{ H}$$

$$L_{12} = \frac{\Psi_{m2}}{I_1} = \frac{0,00393}{4} = 0,98 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

21.2.4. Indukcija u rasporu stroja raspodijeljena je sinusno. Polni korak je $\tau_p = 15 \text{ cm}$, idealna duljina paketa $l_i = 18 \text{ cm}$, broj polova $2p = 4$, a duljina zračnog raspora u kojoj je uzet u obzir utjecaj zasićenja u željezu je $\delta'' = 0,9 \text{ mm}$. Stroj ima na statoru 80 zavoja s namotnim faktorom $f_{n1} = 0,89$, na rotoru 40 zavoja, s $f_{n2} = 0,96$. Namot je jednofazan. Kolik je induktivitet glavnog toka za statorski i za rotorski namot i kolik je najveći međui induktivitet?

$$\tau_p = 15 \text{ cm}$$

$$B_{sr} = \frac{2}{\pi} B_\delta \rightarrow \alpha_i = \frac{2}{\pi}$$

$$l_i = 18 \text{ cm}$$

$$2p = 4$$

$$\Lambda_m = \mu_0 \frac{2}{\pi} \frac{\alpha_i \tau_p l_i}{p \delta''} = 4\pi 10^{-7} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\frac{2}{\pi} \cdot 0,15 \cdot 0,18}{2 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}} = 7,64 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/A}$$

$$\delta'' = 0,9 \text{ mm}$$

$$w_1 = 80$$

$$L_{m1} = \frac{1}{R_m} (w_1 f_{n1})^2 = 7,64 \cdot 10^{-6} \cdot (80 \cdot 0,89)^2 = 0,0387 \text{ H}$$

$$f_{n1} = 0,89$$

$$L_{m2} = \frac{1}{R_m} (w_2 f_{n2})^2 = 7,64 \cdot 10^{-6} \cdot (40 \cdot 0,96)^2 = 0,0113 \text{ H}$$

$$w_2 = 40$$

$$f_{n2} = 0,96$$

$$L_{12} = \frac{1}{R_m} w_1 f_{n1} w_2 f_{n2} = 7,64 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot 0,89 \cdot 40 \cdot 0,96 = 0,0209 \text{ H}$$

21.2.5. Kolik je nadomjesni zračni raspor δ'' ako je prava širina raspora $\delta = 0,6$ mm, Carterov faktor $k_C = 1,15$, a za indukciju u rasporu $B_\delta = 0,8$ T ukupno protjecanje iznosi po polu $\Theta_1 = 575$ A?

$$\delta = 0,6 \text{ mm}$$

$$B_\delta = \mu_0 \frac{\Theta}{\delta''}$$

$$k_C = 1,15$$

$$\delta'' = \mu_0 \frac{\Theta}{B_\delta} = 4\pi 10^{-7} \cdot \frac{575}{0,8} = 0,903 \text{ mm}$$

$$B_\delta = 0,8 \text{ T}$$

$$\delta_i = k_C \delta = 1,15 \cdot 0,6 = 0,69 \text{ mm}$$

$$\underline{\Theta_1 = 575 \text{ A}}$$

$$V_\delta = H_\delta \delta_i = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta_i = \frac{0,8}{4\pi 10^{-7}} \cdot 0,69 \cdot 10^{-3} = 440 \text{ A}$$

$$k_{zas} = \frac{\Theta}{V_\delta} = \frac{575}{440} = 1,31$$

Prikazivanje reaktancijama

21.3.1. U zadatku 21.2.4. određen je induktivitet glavnog toka za jednofazni primarni namot $L_{m1} = 3,87 \cdot 10^{-2}$ H i za sekundarni namot $L_{m2} = 1,13 \cdot 10^{-2}$ H. Mjerenjem pri 50 Hz određena je reaktancija primarnog namota $X_1 = 16,4 \Omega$, a sekundarnog $X_2 = 5,22 \Omega$. Kolike su reaktancije glavnog toka i rasipne reaktancije? Kolika reaktancija odgovara međuinuktivitetu L_{12} ?

$$L_{m1} = 3,87 \cdot 10^{-2} \text{ H}$$

$$L_{m2} = 1,13 \cdot 10^{-2} \text{ H}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$X_1 = 16,4 \Omega$$

$$X_2 = 5,22 \Omega$$

$$X_{m1} = 2\pi f L_{m1} = 2\pi 50 \cdot 3,87 \cdot 10^{-2} = 12,1 \Omega$$

$$X_{\sigma 1} = X_1 - X_{m1} = 16,4 - 12,1 = 4,3 \Omega$$

$$X_{m2} = 2\pi f L_{m2} = 2\pi 50 \cdot 1,13 \cdot 10^{-2} = 3,52 \Omega$$

$$X_{\sigma 2} = X_2 - X_{m2} = 5,22 - 3,52 = 1,7 \Omega$$

$$X_{12} = \sqrt{X_{m1} X_{m2}} = \sqrt{12,1 \cdot 3,52} = 6,52 \Omega$$

21.3.2. Kolik će se napon pojaviti na otvorenim stezaljkama primarnog napona u 1. zadatku ako u sekundarnom namotu teče struja od 35 A i 50 Hz? Kolik će biti napon sekundara ako u primaru teče struja od 18 A i 50 Hz?

$$\begin{aligned} \text{a) } I_2 = 35 \text{ A} \quad \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 jX_{m1} = \dot{I}'_2 jX_{m1} = \frac{w_2 f_{n2}}{w_1 f_{n1}} \dot{I}_2 jX_{m1} = \frac{w_2 f_{n2}}{w_1 f_{n1}} \dot{I}_2 j2\pi f \frac{1}{R_m} (w_1 f_{n1})^2 \\ f &= 50 \text{ Hz} \quad = 2\pi f \frac{1}{R_m} (w_1 f_{n1} w_2 f_{n2}) j \dot{I}_2 = X_{12} j \dot{I}_2 \end{aligned}$$

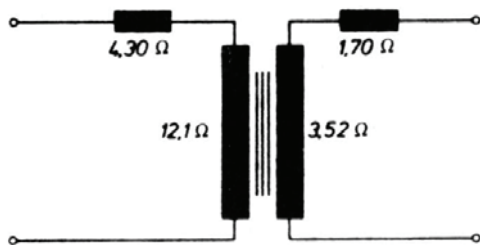
$$U_1 = I_2 X_{12} = 35 \cdot 6,52 = 228,2 \text{ V}$$

$$\text{b) } I_1 = 18 \text{ A}$$

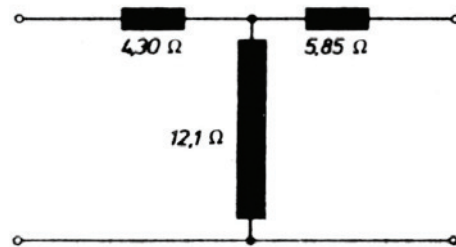
$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$U_2 = I_1 X_{12} = 18 \cdot 6,52 = 117,36 \text{ V}$$

21.3.3. Kako izgleda nadomjesna shema za namote prema 1. zadatku?



Sl. 21.3. Rješenje 3. zadatka.



Sl. 21.4. Rješenje 4. zadatka.

21.3.4. Izračunajte reaktancije iz 1. zadatka svedene na primarni namot i nacrtajte nadomjesnu shemu.

$$k_{12}^2 = \left(\frac{w_1 f_{n1}}{w_2 f_{n2}} \right)^2 = \left(\frac{80 \cdot 0,89}{40 \cdot 0,96} \right)^2 = 3,438$$

$$X'_{m2} = k_{12}^2 X_{m2} = 3,438 \cdot 3,52 = 12,1 \Omega$$

$$X'_{\sigma 2} = k_{12}^2 X_{\sigma 2} = 3,438 \cdot 1,7 = 5,85 \Omega$$

Reaktancije višefaznog namota

21.4.1. Namoti stroja u zadatku 21.2.4. bili su jednofazni. Pri narinutom naponu od 220 V i 50 Hz statorski je namot uzimao struju magnetiziranja od 18 A. Ako se stroj namota trofazno, s tri jednaka namota, poput onoga u spomenutom zadatku, koliku će struju magnetiziranja uzimati svaki namot ako su sva tri spojena u zvijezdu i priključena na trofaznu mrežu od 380 V i 50 Hz? Zanimarite rasipne reaktancije.

$$U_1 = 220 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$I_1 = 18 \text{ A}$$

Y

$$U'_1 = 380 \text{ V}$$

$$\underline{U'_f = 220 \text{ V}}$$

$$U_f = U'_f$$

$$B = B'$$

$$\Theta = \Theta'$$

$$\Theta = \frac{m}{2} \frac{4}{\pi} \frac{I \sqrt{2} w}{2p} f_n$$

$$I_1 = \frac{m'}{2} I'_1$$

$$I'_1 = \frac{2}{3} \cdot 18 = 12 \text{ A}$$

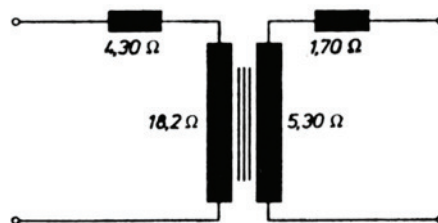
21.4.2. Kolike će biti reaktancije X_{m1} , X_{m2} i X_{12} za jedan fazni namot iz 1. zadatka?

$$X_{m1} = \frac{3}{2} \cdot 12,1 = 18,2 \Omega$$

$$X_{m2} = \frac{3}{2} \cdot 3,52 = 5,3 \Omega$$

$$X_{12} = \frac{3}{2} \cdot 6,52 = 9,8 \Omega$$

21.4.3. Za trofazni namot iz 1. zadatka, na osnovi podataka iz zadatka 21.3.1. i zadatka 21.4.2. nacrtajte nadomjesnu shemu za jednu fazu trofaznog stroja i unesite podatke, uzevši u obzir i rasipne reaktancije.

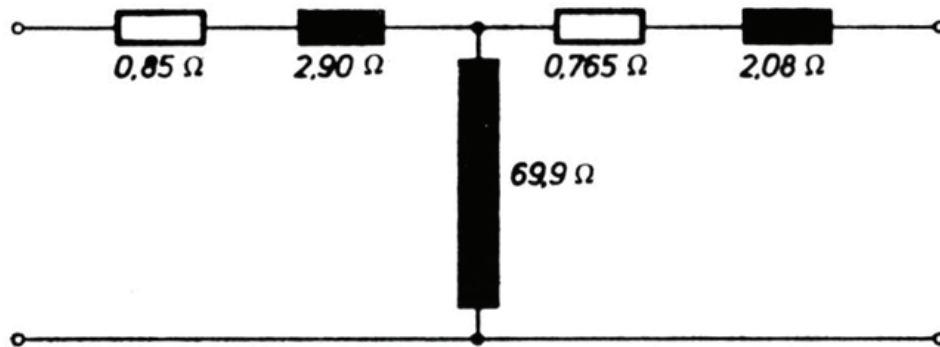


Sl. 21.5. Rješenje 3. zadatka.

21.4.4. Trofazni namot statora ima po fazi 120 zavoja, $f_{n1} = 0,88$, otpor je $R_1 = 0,85 \Omega$, ukupna je reaktancija $X_1 = 72,8 \Omega$, a rasipna reaktancija $X_{\sigma 1} = 2,90 \Omega$. Rotor ima dvofazni namot sa 100 zavoja po fazi, $f_{n2} = 0,85$, otpor je $R_2 = 0,33 \Omega$, rasipna je reaktancija $X_{\sigma 2} = 0,90 \Omega$ po fazi. Nacrtajte nadomjesnu shemu svedenu na jednu fazu statora i unesite vrijednosti.

$m_1 = 3$	$m_2 = 2$	$X_{m1} = X_1 - X_{\sigma1} = 72,8 - 2,9 = 69,9 \ \Omega$
$w_1 = 120$	$w_2 = 100$	$k_{12}^2 = \left(\frac{w_1 f_{n1}}{w_2 f_{n2}} \right)^2 = \left(\frac{120 \cdot 0,88}{100 \cdot 0,85} \right)^2 = 1,543$
$f_{n1} = 0,88$	$f_{n2} = 0,85$	$R'_2 = \frac{m_1}{m_2} k_{12}^2 R_2 = \frac{3}{2} \cdot 1,543 \cdot 0,33 = 0,765 \ \Omega$
$R_1 = 0,85 \ \Omega$	$R_2 = 0,33 \ \Omega$	$X'_{\sigma2} = \frac{m_1}{m_2} k_{12}^2 X_{\sigma2} = \frac{3}{2} \cdot 1,543 \cdot 0,9 = 2,08 \ \Omega$
$X_1 = 72,8 \ \Omega$	$X_{\sigma2} = 0,90 \ \Omega$	
<u>$X_{\sigma1} = 2,90 \ \Omega$</u>		

Ovakva shema ne uzima u obzir promjenu zasićenja magnetskih krugova.



Sl. 21.6. Rješenje 4. zadatka.

21.4.5. Kolik će se napon pojaviti na otvorenim stezaljkama faznog namota statora u 4. zadatku ako u rotorskom namotu teče dvofazna struja od 5,5 A i 50 Hz po fazi?

$$I_2 = 5,5 \text{ A} \quad I'_2 = \frac{m_2}{m_1} \frac{w_2 f_{n2}}{w_1 f_{n1}} I_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{100 \cdot 0,85}{120 \cdot 0,88} \cdot 5,5 = 2,95 \text{ A}$$

$$\underline{f = 50 \text{ Hz}} \quad U_1 = I'_2 X_{m1} = 2,95 \cdot 69,9 = 206 \text{ V}$$

Kad je jedna strana otvorena koristimo stroj kao transformator i rotor miruje.

Utjecaj skošenja utora

21.5.1. Rotor 4-polnog stroja skošen je za jedan statorski utor. Stator ima 36, a rotor 44 utora. Koliko je skošenje? Kolik je kut β ? Kolik je faktor skošenja?

$$\begin{aligned}
 p &= 2 & m_s &= \frac{1}{N_1} = \frac{1}{36} \\
 N_1 &= 36 & \beta &= 2\pi p m_s = \frac{2 \cdot 180^\circ \cdot 2}{36} = 20^\circ \\
 \underline{N_2 = 44} & & f_\beta &= \frac{\sin m_s p \pi}{m_s p \pi} = \frac{\sin 10^\circ}{\frac{2\pi}{36}} = 0,995
 \end{aligned}$$

Treba paziti da izraz $m_s p \pi$ u nazivniku izraza za faktor skošenja mora bit u radijanima.

21.5.2. Kolik je faktor skošenja u 1. zadatku za 17. i 19. prostorni harmonički član indukcije u rasporu? (Skošenje djelotvorno smanjuje utjecaj utorskih harmonika.)

$$\begin{aligned}
 f_{\beta 17} &= \frac{\sin v \frac{\beta}{2}}{v \frac{\beta}{2}} = \frac{\sin 17 \cdot 10^\circ}{17 \cdot \frac{2\pi}{36}} = 0,0585 & f_{\beta 19} &= \frac{\sin v \frac{\beta}{2}}{v \frac{\beta}{2}} = \frac{\sin 19 \cdot 10^\circ}{19 \cdot \frac{2\pi}{36}} = -0,0524
 \end{aligned}$$

21.5.3. Trofazni 6-polni stroj ima na statoru 36 utora, uz $w_1 = 180$, $f_{n1} = 0,836$, i na rotoru dvofazni namot s 24 utora, uz $w_2 = 120$, $f_{n2} = 0,966$. Primarni otpor po fazi je $R_1 = 3 \Omega$, ukupna reaktancija $X_1 = 100,2 \Omega$, rasipna reaktancija $X_{\sigma 1} = 4,2 \Omega$. Kolik će se napon pojaviti na otvorenim stezaljkama sekundarnog namota ako je primarno narinut napon po fazi 220 V, a utori rotora su: a) neskošeni; b) skošeni za dva utora statora?

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 3 & Z_1 &= \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{3^2 + 100,2^2} = 100,245 \Omega \\
 p &= 3 & I_1 &= \frac{U_{f1}}{Z_1} = \frac{220}{100,245} = 2,195 \text{ A} \\
 N_1 &= 36 & X_{m1} &= X_1 - X_{\sigma 1} = 100,2 - 4,2 = 96 \Omega \\
 w_1 &= 180 & U_{m1} &= I_1 X_{m1} = 2,195 \cdot 96 = 210,68 \text{ V} \\
 f_{n1} &= 0,836 & \text{a) } m_s = 0: & U_2 = U'_2 \frac{w_2 f_{n2}}{w_1 f_{n1}} f_\beta = 210,68 \cdot \frac{120 \cdot 0,966}{180 \cdot 0,836} \cdot 1 = 162,3 \text{ V} \\
 R_1 &= 3 \Omega & & \\
 X_1 &= 100,2 \Omega & \text{b) } m_s = \frac{2}{36}: & \beta = 2\pi p m_s = \frac{2 \cdot 180^\circ \cdot 3 \cdot 2}{36} = 60^\circ \\
 X_{\sigma 1} &= 4,2 \Omega & & f_\beta = \frac{\sin 30^\circ}{\frac{2}{36} \cdot 3\pi} = 0,955 \\
 U_{f1} &= 220 \text{ V} & & U_2 = U'_2 \frac{w_2 f_{n2}}{w_1 f_{n1}} f_\beta = 210,68 \cdot \frac{120 \cdot 0,966}{180 \cdot 0,836} \cdot 0,955 = 155 \text{ V} \\
 m_2 &= 2 & & \\
 N_2 &= 24 & & \\
 w_2 &= 120 & & \\
 \underline{f_{n2} = 0,966} & & &
 \end{aligned}$$

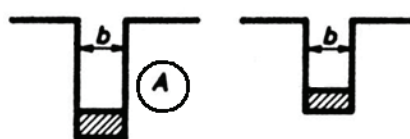
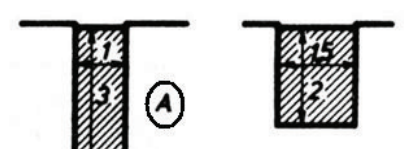
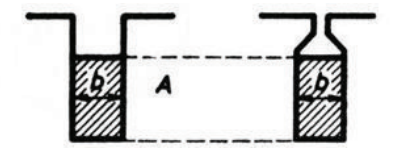
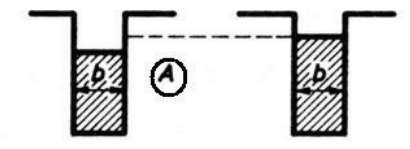
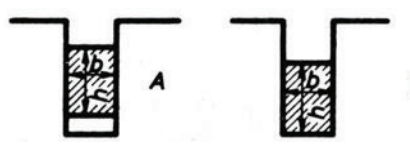
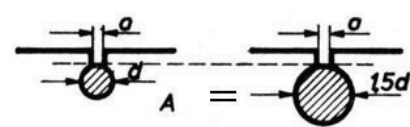
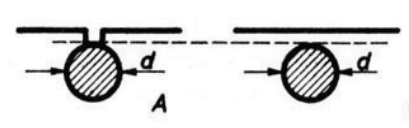
21.5.4. Koliko je povećanje rasipne reaktancije zbog skošenja u 3. zadatku?

$$\sigma_{\beta} = \frac{1}{f_{\beta}^2} - 1 = \frac{1}{0,955^2} - 1 = 0,09646$$

$$X_{\beta} = \sigma_{\beta} X_{m1} = 0,09646 \cdot 96 = 9,26 \ \Omega$$

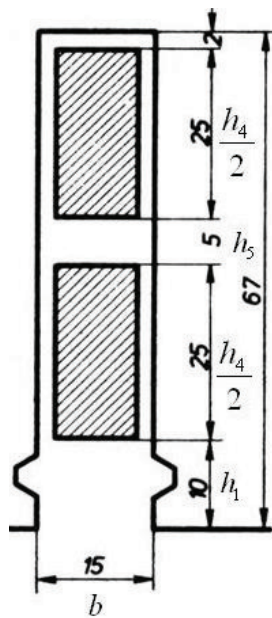
Utorsko rasipanje

21.6.1. Kod kojeg će od dvaju označenih oblika utora na slici 21.18. rasipna reaktancija zbog utorskog rasipanja biti veća? Ukupni broj zavoja u utoru je u svim promatranim primjerima jednak.

- a)  a) Rasipna vodljivost dijela utora u kojem nema bakra (iznad vodiča) po jedinici duljine je $\lambda_u = \frac{h}{b}$. Za utor A je taj dio rasipanja veći. Rasipanje u dijelu utora u kojem se nalaze vodiči je isto.
- b)  b) Rasipna vodljivost dijela utora u kojem se nalaze vodiči po jedinici duljine je $\lambda_u = \frac{h}{3b}$. Kako je $\frac{3}{3 \cdot 1} > \frac{1,5}{3 \cdot 2}$ rasipanje utora A je veće.
- c)  c) Rasipanje u dijelu utora u kojem se nalaze vodiči je isto. Rasipanje u dijelu utora iznad vodiča je za utor B veće zbog suženja (mostića).
- d)  d) Utor A ima veće rasipanje iznad vodiča.
- e)  e) Rasipanje u dijelu utora u kojem se nalaze vodiči je isto. U dijelu utora ispod vodiča nema silnica (Ampereov zakon protjecanja). Utor B ima veće rasipanje iznad vodiča.
- f)  f) Za okrugli dio utora vrijedi $\lambda_u = 0,6$ pa razlika promjera ne utječe. Vodljivost mostića je također ista jer su dimenzije iste, pa oba ova utora imaju jednaka rasipanja.
- g)  g) Utor B ima veće rasipanje mostića jer nema otvora.

Sl.21.18. Usporedba oblika utora.

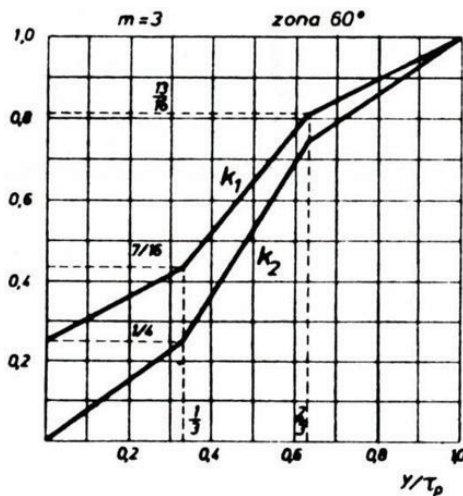
21.6.2. Stator trofaznog 4-polnog motora od 3000 V i 50 Hz ima 72 utora oblika prema slici 21.19. Promjer u rasporu je $D = 600$ mm, duljine je $l_i = 400$ mm. Namot je dvoslojan s 288 vodiča po fazi, sa skraćenim svicima $\frac{y}{\tau_p} = \frac{5}{6}$ i zonom od 60° . Omjer srednje i maksimalne vrijednosti indukcije u rasporu iznosi $\alpha_i = 0,715$. Zračni raspor, korigiran Carterovim faktorom i utjecajem zasićenja u željezu, iznosi $\delta'' = 1,6 \cdot 1,45 \cdot 1,57 = 3,64$ mm. Odredite: a) namotni faktor; b) vodljivost za glavni tok u rasporu λ_0 ; c) reaktanciju glavnog toka X_{m1} ; d) utorsku rasipnu vodljivost λ_u ; e) utorsku rasipnu reaktanciju $X_{\sigma u}$. Utjecaj otvora za klin na širinu odgovarajućeg dijela utora može se zanemariti.



$$\begin{aligned}
 m_1 &= 3 \\
 p &= 2 \\
 U &= 3000 \text{ V} \\
 f &= 50 \text{ Hz} \\
 N_1 &= 72 \\
 D &= 600 \text{ mm} \\
 l_i &= 400 \text{ mm} \\
 z_1 &= 288 \\
 \frac{y}{\tau_p} &= \frac{5}{6} = 0,833 \\
 \alpha_i &= 0,715 \\
 \delta'' &= \delta k_C k_{zas} = \\
 &= 1,6 \cdot 1,45 \cdot 1,57 = 3,64 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{N_1}{2pm_1} = \frac{72}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 6 \\
 \alpha_g &= \frac{2\pi}{N_1} = \frac{360^\circ}{72} = 5^\circ \\
 \alpha &= p\alpha_g = 2 \cdot 5^\circ = 10^\circ \\
 f_{z1} &= \frac{\sin \frac{6 \cdot 10^\circ}{2}}{6 \sin \frac{10^\circ}{2}} = 0,956 \\
 f_{t1} &= \sin \frac{5}{6} \frac{180^\circ}{2} = 0,966 \\
 f_{n1} &= f_{z1} f_{t1} = 0,924 \\
 \tau_p &= \frac{D\pi}{2p} = \frac{0,6\pi}{2 \cdot 2} = 0,4712 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Sl. 21.19. Dimenzije utora.



Sl. 21.14. Korekcijski faktori za rasipanje utora s 2-slojnim 2-faznim namotom uz zonu namatanja od 60° .

$$\lambda_0 = \frac{3}{\pi^2} \left(\frac{\alpha_i}{\frac{2}{\pi}} \right) \frac{\tau_p}{\delta''} = \frac{3}{\pi^2} \left(\frac{0,715}{\frac{2}{\pi}} \right) \frac{0,4712}{3,64 \cdot 10^{-3}} = 44,2$$

$$K_1 = 3,95 \frac{f}{50} \frac{l_i}{2p} \left(\frac{z_1}{100} \right)^2 = 3,95 \cdot \frac{50}{50} \cdot \frac{0,4}{2 \cdot 2} \cdot \left(\frac{288}{100} \right)^2 = 3,276$$

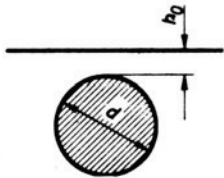
$$X_{m1} = K_1 \lambda_0 f_{n1}^2 = 3,276 \cdot 44,2 \cdot 0,924^2 = 124 \text{ } \Omega$$

$$\frac{y}{\tau_p} = \frac{5}{6} = 0,833 \text{ (sl. 21.14)} \rightarrow k_1 = 0,9 \quad k_2 = 0,86$$

$$\lambda_u = k_2 \frac{h_1}{b} + k_1 \left(\frac{h_4}{3b} + \frac{h_5}{2b} \right) = 0,86 \cdot \frac{10}{15} + 0,9 \left(\frac{50}{3 \cdot 15} + \frac{5}{2 \cdot 15} \right) = 1,72$$

$$X_{\sigma u} = K_1 \frac{\lambda_u}{q} = 3,276 \cdot \frac{1,72}{6} = 0,94 \, \Omega$$

21.6.3. Dimenzije rotorskog utora prema slici 21.20. su ove: $d = 8 \, \text{mm}$, $h_0 = 0,8 \, \text{mm}$, utorski korak $\tau_{u2} = 11,5 \, \text{mm}$. Kolika je utorska rasipna vodljivost λ_u , ako u utoru teče struja:
a) 50 A; b) 200 A; c) 1000 A?



$$\log \lambda_u \approx 3,95 - 0,94 \log \frac{d}{h_0} - 0,87 \log \frac{I_u}{100 \tau_u}$$

$$= 3,95 - 0,94 \log \frac{8}{0,8} - 0,87 \log \frac{I_u}{1,15}$$

Sl. 21.20. Dimenzije utora u 3. zadatku.

$$d = 8 \, \text{mm}$$

$$h_0 = 0,8$$

$$\tau_{u2} = 11,5 \, \text{mm}$$

$$\log \lambda_u = 3,01 - 0,87 \log \frac{I_u}{1,15} \quad - \text{ numerička relacija}$$

$$\text{a) } I_u = 50 \, \text{A}$$

$$\lambda_u = 38,4$$

$$\text{b) } I_u = 200 \, \text{A}$$

$$\lambda_u = 11,5$$

$$\text{c) } I_u = 1000 \, \text{A}$$

$$\lambda_u = 2,84$$

21.6.4. Kolika bi bila utorska rasipna vodljivost λ_u u 2. zadatku kad bismo stroj izveli sa 108 utora iste dubine od 67 mm, ali takve širine da indukcija u zubima ostane približno ista? Ako je broj vodiča po fazi nepromijenjen, kolika će biti reaktancija $X_{\sigma u}$? Skraćenje svitaka je 7/8.

$$N'_1 = 108$$

$$b' = b \frac{N_1}{N'_1} = 15 \cdot \frac{72}{108} = 10 \, \text{mm}$$

$$\frac{y}{\tau_p} = \frac{7}{8} = 0,875$$

$$\lambda'_u = k_2 \frac{h_1}{b'} + k_1 \left(\frac{h_4}{3b'} + \frac{h_5}{2b'} \right) = 0,91 \cdot \frac{10}{10} + 0,93 \left(\frac{50}{3 \cdot 10} + \frac{5}{2 \cdot 10} \right) = 2,69$$

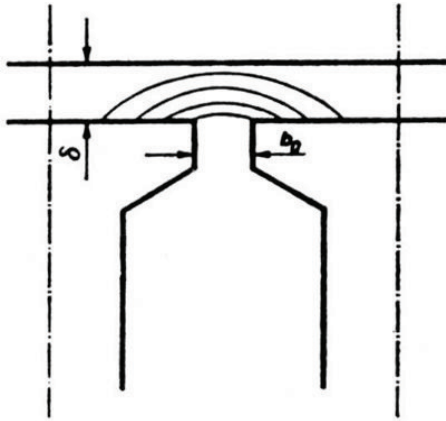
$$q' = \frac{N'_1}{2pm_1} = \frac{108}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 9$$

$$X'_{\sigma u} = K_1 \frac{\lambda'_u}{q'} = 3,276 \cdot \frac{2,69}{9} = 0,98 \, \Omega$$

Utorska rasipna reaktancija se ne mijenja ako povećavamo broj utora.

Rasipanje među glavama zubi

21.7.1. Kolika će biti rasipna vodljivost među glavama zubi i pripadna rasipna reaktancija za stator: a) iz zadatka 21.6.2; b) iz zadatka 21.6.4.? Zračni raspor je $\delta = 1,6$ mm.



Sl. 21.21. Rasipanje među glavama zubi.

$$\delta = 1,6 \text{ mm}$$

$$b_0 = 15 \text{ mm}$$

$$\underline{b'_0 = 10 \text{ mm}}$$

$$\text{a) } \lambda_z = \frac{5 \frac{\delta}{b_0}}{5 + 4 \frac{\delta}{b_0}} = \frac{5 \cdot \frac{1,6}{15}}{5 + 4 \cdot \frac{1,6}{15}} = 0,098$$

$$X_{\sigma} = K_1 \frac{\lambda_z}{q} = 3,276 \cdot \frac{0,098}{6} = 0,054 \text{ } \Omega$$

$$\text{b) } \lambda_z = \frac{5 \frac{\delta}{b_0}}{5 + 4 \frac{\delta}{b_0}} = \frac{5 \cdot \frac{1,6}{10}}{5 + 4 \cdot \frac{1,6}{10}} = 0,142$$

$$X_{\sigma} = K_1 \frac{\lambda_z}{q} = 3,276 \cdot \frac{0,142}{9} = 0,052 \text{ } \Omega$$

21.7.2. Kolike bi bile vrijednosti λ_z i X_{σ} iz 1.a. zadatka kad bi utor bio poluzatvoren, s utorskim otvorom $b_0 = 5$ mm?

$$\delta = 1,6 \text{ mm}$$

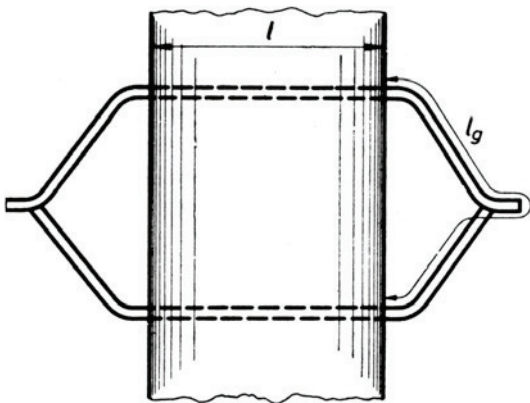
$$\underline{b_0 = 5 \text{ mm}}$$

$$\lambda_z = \frac{5 \frac{\delta}{b_0}}{5 + 4 \frac{\delta}{b_0}} = \frac{5 \cdot \frac{1,6}{5}}{5 + 4 \cdot \frac{1,6}{5}} = 0,255$$

$$X_{\sigma} = K_1 \frac{\lambda_z}{q} = 3,276 \cdot \frac{0,255}{6} = 0,139 \text{ } \Omega$$

Rasipanje glava namota

- 21.8.1. Odredite rasipnu vodljivost glave namota i pripadnu reaktanciju za stator stroja iz zadatka 21.6.2. ako je duljina vodiča (utor + glava namota) 1100 mm, a rotor je kavezni. Kakve bi bile te vrijednosti za stroj iz zadatka 21.6.4.?



Sl. 21.22. Rasipanje glava namota.

$$l_g + l = 1100 \text{ mm}$$

$$l = 400 \text{ mm}$$

$$l_g = 700 \text{ mm}$$

	Statorski namot	
Rotor	jednoslojni	dvoslojni
jednoslojni	0,50	0,40-0,30
dvoslojni	0,40	0,30
kavezni	0,35	0,25-0,15

Za dvoslojni namot statora i kavezni rotor uzimamo da je $\lambda_g = 0,20$.

$$X_{\sigma g} = K_1 \frac{l_g}{l} \lambda_g = 3,276 \cdot \frac{700}{400} \cdot 0,2 = 1,15 \text{ } \Omega$$

Za stroj iz zadatka 21.6.4. vrijednosti bi bile iste.

- 21.8.2. Kakve bi bile vrijednosti λ_g i $X_{\sigma g}$ iz 1. zadatka kad bi rotor bio s dvoslojnim dvofaznim namotom?

$$\lambda_g = 0,30$$

$$X_{\sigma g} = K_1 \frac{l_g}{l} \lambda_g = 3,276 \cdot \frac{700}{400} \cdot 0,3 = 1,72 \text{ } \Omega$$

Dvostruko ulančeno rasipanje

21.9.1. Kolika je dvostruko ulančana (diferencijalna) rasipna vodljivost λ_v i pripadna reaktancija za stator iz zadatka 21.6.2.? Uzmite u obzir prvih šest od postojećih harmoničkih članova.

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 44,2 \\ \alpha &= 10^\circ \\ \underline{f_{n1} = 0,924} \end{aligned}$$

$$f_{zv} = \frac{\sin v \frac{6 \cdot 10^\circ}{2}}{6 \sin v \frac{10^\circ}{2}}$$

$$f_{tv} = \sin \frac{5}{6} v \frac{180^\circ}{2}$$

$$\underline{f_{nv} = f_{zv} f_{tv}}$$

v	f_{zv}	f_{tv}	f_{nv}
5	0,19718	0,2588	0,051
7	0,14529	0,2588	0,0376
11	0,1017	0,9659	0,0982
13	0,09195	0,9659	0,0888
17	0,08365	0,2588	0,0216
19	0,08365	0,2588	0,0216

$$\begin{aligned} \sigma_{v1} &= \sum_{\substack{v=6k \pm 1 \\ k=1}}^{k=\infty} \left(\frac{f_{nv}}{v f_{n1}} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{0,924^2} \left[\left(\frac{0,051}{5} \right)^2 + \left(\frac{0,0376}{7} \right)^2 + \left(\frac{0,0982}{11} \right)^2 + \left(\frac{0,0888}{13} \right)^2 + \left(\frac{0,0216}{17} \right)^2 + \left(\frac{0,0216}{19} \right)^2 \right] = 3,07 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\lambda_{v1} = \lambda_0 f_{n1}^2 \sigma_{v1} = 44,2 \cdot 0,924^2 \cdot 3,07 \cdot 10^{-4} = 0,0116$$

$$X_{\sigma v1} = K_1 \lambda_{v1} = 3,276 \cdot 0,0116 = 0,038 \, \Omega$$

21.9.2. Koliko je λ_v i $X_{\sigma v}$ za stator iz zadatka 21.6.4.? (Zonski namotni faktor uzmite iz odjeljka 20.2., tablica 3, za $q = \infty$.)

v	f_{zv}	f_{tv}	f_{nv}
1	0,955	0,9808	0,937
5	0,191	0,5555	0,1061
7	0,136	0,1951	0,0265
11	0,087	0,5555	0,0483
13	0,073	0,0831	0,0607
17	0,056	0,9808	0,0549
19	0,050	0,8315	0,0416

$$f_{tv} = \sin \frac{7}{8} v \frac{180^\circ}{2}$$

$$\lambda_{v1} = \lambda_0 f_{n1}^2 \sigma_{v1} = 44,2 \cdot 0,937^2 \cdot 5,93 \cdot 10^{-4} = 0,023$$

$$X_{\sigma v1} = K_1 \lambda_{v1} = 3,276 \cdot 0,023 = 0,075 \, \Omega$$

$$\sigma_{v1} = \frac{1}{0,937^2} \left[\left(\frac{0,1061}{5} \right)^2 + \left(\frac{0,0265}{7} \right)^2 + \left(\frac{0,0483}{11} \right)^2 + \left(\frac{0,0607}{13} \right)^2 + \left(\frac{0,0549}{17} \right)^2 + \left(\frac{0,0416}{19} \right)^2 \right] = 5,93 \cdot 10^{-4}$$

Rasipna reaktancija

21.10.1. Kolika je rasipna reaktancija statora iz zadatka 21.6.2. sa 72 utora? Rotor je s dvoslojnim dvofaznim namotom. Upotrijebite rezultate iz prijašnjih zadataka.

$$X_{\sigma 1} = 3,95 \frac{f}{50} \cdot \frac{l_i}{2p} \left(\frac{z}{100} \right)^2 \left(\frac{\lambda_u}{q} + \frac{\lambda_z}{q} + \lambda_g \frac{l_g}{l} + \lambda_v \right)$$

$$= 3,95 \cdot \frac{50}{50} \cdot \frac{0,4}{2 \cdot 2} \left(\frac{288}{100} \right)^2 \left(\frac{1,72}{6} + \frac{0,098}{6} + 0,3 \cdot \frac{700}{400} + 0,0116 \right) = 0,94 + 0,054 + 1,72 + 0,038 = 2,75 \Omega$$

21.10.2. Kolika je rasipna reaktancija statora iz zadatka 21.6.4. sa 108 utora? Rotor je s dvoslojnim dvofaznim namotom.

$$X_{\sigma 1} = 3,95 \cdot \frac{50}{50} \cdot \frac{0,4}{2 \cdot 2} \left(\frac{288}{100} \right)^2 \left(\frac{2,69}{9} + \frac{0,142}{9} + 0,3 \cdot \frac{700}{400} + 0,023 \right) =$$

$$= 0,98 + 0,052 + 1,72 + 0,075 = 2,83 \Omega$$

21.10.3. Rotor stroja u zadatku 21.6.2. ima dvofazni namot sa 160 vodiča po fazi, $f_{n2} = 0,880$.

Rasipna reaktancija po fazi rotora iznosi $0,577 \Omega$. Kolika je ukupna rasipna reaktancija po fazi statora ako su utori rotora neskošeni?

$$m_2 = 2 \quad X'_{\sigma 2} = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 f_{n1}}{w_2 f_{n2}} \right)^2 X_{\sigma 2} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{144 \cdot 0,924}{80 \cdot 0,88} \right)^2 \cdot 0,577 = 3,09 \Omega$$

$$z_2 = 160$$

$$f_{n2} = 0,88$$

$$X_{\sigma 2} = 0,577 \Omega$$

$$X'_\sigma = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = 2,75 + 3,09 = 5,84 \Omega$$

21.10.4. Kolika je ukupna rasipna reaktancija u 3. zadatku svedena na fazu statora ako je skošenje rotorskih utora $m_s = 3/72$? (Reaktancija glavnog toka izračunata je u zadatku 21.6.2.)

$$m_s = \frac{3}{72}$$

$$p = 2$$

$$\sigma_\beta = \frac{1}{f_\beta^2} - 1 = \frac{1}{0,989^2} - 1 = 0,0232$$

$$X_\beta = \sigma_\beta X_{m1} = 0,0232 \cdot 124 = 2,87 \Omega$$

$$\beta = 2\pi p m_s = 2 \cdot 180^\circ \cdot 2 \cdot \frac{3}{72} = 30^\circ$$

$$f_\beta = \frac{\sin m_s p \pi}{m_s p \pi} = \frac{\sin 15^\circ}{\frac{3}{72} \cdot 2 \cdot \pi} = 0,989$$

$$X_\sigma = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} + X_\beta = 2,75 + 3,09 + 2,87 = 8,71 \Omega$$

KAVEZNI NAMOT

Mnogofazni kratkospojni namot

22.1.1. Koliko štapova ima 48-fazni kavezni namot 4-polnog stroja?



$m = N = 48$ - broj faza jednak je broju utora

Sl. 22.2.c Višefazni kratkospojni namot s po jednim štapom po fazi.

22.1.2. Koliko štapova ima 48-fazni kavezni namot 6-polnog stroja?

1 vodič po fazi \rightarrow 48 štapova

22.1.3. Koliko zavoja po fazi ima kavezni namot iz 1. i 2. zadatka?

$w = \frac{1}{2}$ - broj zavoja po fazi je $\frac{1}{2}$ (1 vodič po fazi)

22.1.4. Dva statora jednakih duljina i provrta namotani su ovako:

stator A - 3-fazni 4-polni namot,
stator B - 3-fazni 6-polni namot.

Na raspolaganju su četiri rotora jednakih dimenzija, koji pristaju u statore. Namotani su:

rotor a - 3-fazni 4-polni namot,
rotor b - 3-fazni 6-polni namot,
rotor c - 2-fazni 4-polni namot,
rotor d - 42-fazni kavezni namot.

Koje su kombinacije statora i rotora dopuštene da bi motor uopće mogao raditi?

A: a – 4-polni
c – 4-polni
d – kavezni odgovara svakom polaritetu statora

B: b – 6-polni
d – kavezni odgovara svakom polaritetu statora

Naponi i struje u kavezu

22.2.1. Kavezni rotor s $N = 48$ utora nalazi se u 6-polnom statoru. Kolik je fazni kut između napona induciranih u štapovima?

$$p = 3$$

$$N = 48$$

$$\alpha_v = \frac{2\pi p v}{N} = \alpha_1 = \frac{2 \cdot 180^\circ \cdot 3 \cdot 1}{48} = 22,5^\circ$$

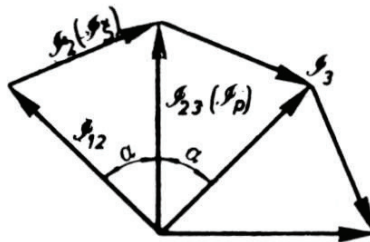
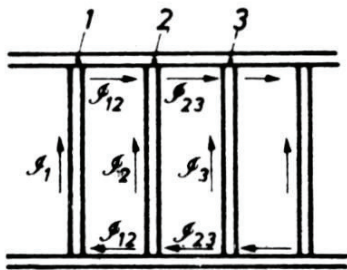
22.2.2. Isti rotor nalazi se u 4-polnom statoru. Kolik je fazni kut između napona u štapovima?

$$p = 2$$

$$N = 48$$

$$\alpha_1 = \frac{2\pi p v}{N} = \frac{2 \cdot 180^\circ \cdot 2 \cdot 1}{48} = 15^\circ$$

22.2.3. U štapu kaveznog namota iz 1. zadatka teče struja od 400 A. Kolika struja teče u prstenu?



$$I_s = 400 \text{ A}$$

$$\alpha = 22,5^\circ$$

Sl. 22.4. Struje u štapovima i prstenima kaveza.

$$k_{pv} = 2 \sin \frac{v\alpha}{2} = 2 \cdot \sin \frac{1 \cdot 22,5^\circ}{2} = 0,39$$

$$I_p = \frac{I_s}{k_p} = \frac{400}{0,39} = 1025 \text{ A}$$

22.2.4. Isto pitanje kao u 3. zadatku za motor iz 2. zadatka.

$$I_s = 400 \text{ A}$$

$$\alpha = 15^\circ$$

$$k_{p1} = 2 \cdot \sin \frac{15^\circ}{2} = 0,261$$

$$I_p = \frac{I_s}{k_p} = \frac{400}{0,261} = 1532 \text{ A}$$

22.2.5. Kolik mora biti odnos presjeka prstena i presjeka štapa kaveza u 1. zadatku ako dopustimo isto opterećenje u A/mm²?

$$\frac{1}{k_p} = \frac{1}{0,39} = 2,56$$

22.2.6. Isto pitanje za motor iz 2. zadatka.

$$\frac{1}{k_p} = \frac{1}{0,261} = 3,83$$

22.2.7. Ako su štap i prsten u 3. zadatku pri struji u štapu od 400 A opterećeni do termičke granice, a omjer presjeka prstena i štapa je 2,56 , koja je dopuštena struja u štapu istog kaveza kad se nalazi u 4-polnom statoru?

$$I_{6s} = 400 \text{ A}$$

$$\frac{1}{k_{6p}} = \frac{1}{0,39} = 2,56$$

$$\frac{1}{k_{4p}} = \frac{1}{0,261} = 3,83$$

$$I_{4s} = I_{6s} \frac{k_{6p}}{k_{4p}} = 400 \cdot \frac{2,56}{3,83} = 268 \text{ A}$$

22.2.8. U štapu kaveza iz 1. zadatka teče struja od 60 A koju inducira sedmi harmonički član polja u rasporu. Kolika struja sedmog člana teče u prstenu?

$$I_{s7} = 60 \text{ A}$$

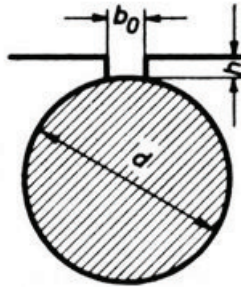
$$k_{p7} = 2 \sin \frac{\nu \alpha}{2} = 2 \sin \frac{7 \cdot 22,5^\circ}{2} = 1,9615$$

$$\alpha = 22,5^\circ$$

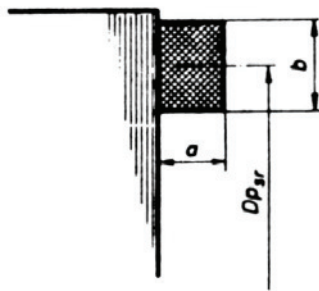
$$I_{p7} = \frac{I_{s7}}{k_{p7}} = \frac{60}{1,9615} = 30,6 \text{ A}$$

Otpor i rasipanje

22.3.1. Kavezni rotor 4-polnog motora promjera $D = 230$ mm i duljine 180 mm, s rasporom $\delta = 0,4$ mm, ima 44 utora prema slici 21.12.b, dimenzija $h = 1$ mm, $b_0 = 1$ mm, $d = 10$ mm. Dimenzije kratkospojnih prstena (sl. 22.5) su $a = 15$ mm, $b = 20$ mm, $D_{pr} = 210$ mm. Kavez je od aluminija specifične vodljivosti pri 75°C od $26,5 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$. Kolik je otpor štapa, otpor segmenta prstena i ukupni otpor po fazi rotora?



Sl. 21.12.b Okrugli utor.



Sl. 22.5. Dimenzije kratkospojnog prstena.

$$\begin{aligned} p &= 2 \\ D &= 0,23 \text{ m} \\ l &= 0,18 \text{ m} \\ \delta &= 0,4 \text{ mm} \\ N &= 44 \\ h &= 1 \text{ mm} \\ b_0 &= 1 \text{ mm} \\ d &= 10 \text{ mm} \\ a &= 15 \text{ mm} \\ b &= 20 \text{ mm} \\ D_{pr} &= 0,21 \text{ m} \\ \kappa_{75^\circ\text{C}} &= 26,5 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$r_s = \rho \frac{l}{q} = \frac{1}{26,5} \cdot \frac{0,18}{5^2 \pi} = 0,865 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$l_p = \frac{D_{pr} \pi}{N} = \frac{0,21 \pi}{44} = 0,015 \text{ m}$$

$$r_p = \rho \frac{l_p}{q_p} = \frac{1}{26,5} \cdot \frac{0,015}{15 \cdot 20} = 1,886 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$k_p = 2 \sin \frac{p\pi}{N} = 2 \sin \frac{2 \cdot 180^\circ}{44} = 0,2846$$

$$R = r_s + \frac{2r_p}{k_p^2} = 0,865 \cdot 10^{-4} + \frac{2 \cdot 1,886 \cdot 10^{-6}}{0,2846^2} = 1,33 \cdot 10^{-4} \Omega$$

22.3.2. Kolika je rasipna reaktancija štapa, rasipna reaktancija prstena i ukupna reaktancija po štapu za kavez iz zadatka 1? Uzmite u obzir utorsko rasipanje i rasipanje među glavama zubi.

$$\lambda = \frac{h}{b_0} = \frac{1}{1} = 1$$

$$\lambda_u = 0,6$$

$$\lambda_z = \frac{5 \frac{\delta}{b_0}}{5 + 4 \frac{\delta}{b_0}} = \frac{5 \cdot \frac{0,4}{1}}{5 + 4 \cdot \frac{0,4}{1}} = 0,303$$

$$\lambda_s = \lambda + \lambda_u + \lambda_z = 1 + 0,6 + 0,303 = 1,903$$

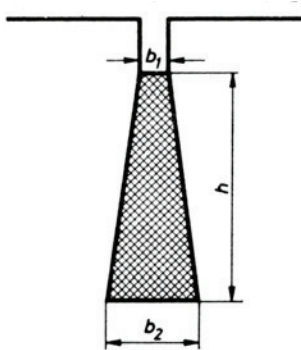
$$x_s = 0,4\pi^2 10^{-4} \frac{f}{50} l_i \lambda_s = 0,4\pi^2 10^{-4} \cdot 1 \cdot 0,18 \cdot 1,903 = 1,35 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$\lambda_p = 0,46 \log \frac{2,35 D_{pr}}{2a + b} = 0,46 \log \frac{2,35 \cdot 210}{2 \cdot 15 + 20} = 0,457$$

$$x_p = 0,4\pi^2 10^{-4} \frac{f}{50} l_p \lambda_p = 0,4\pi^2 10^{-4} \cdot 1 \cdot 0,015 \cdot 0,457 = 2,71 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$X_\sigma = x_s + \frac{2x_p}{k_p^2} = 1,35 \cdot 10^{-4} + \frac{2 \cdot 2,71 \cdot 10^{-6}}{0,2846^2} = 2,02 \cdot 10^{-4} \Omega$$

22.3.3. U dubokom utoru nalaze se štapovi od plosnatog bakra 40×6 mm, specifične vodljivosti $47 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$. Koliko se postotno mijenja otpor i induktivitet štapa ako se frekvencija mijenja od 0 do 50 Hz?



Sl. 22.6. Duboki (klinasti) utor.

$$b_1 = b_2 = b$$

$$h \times b = 40 \times 6 \text{ mm}$$

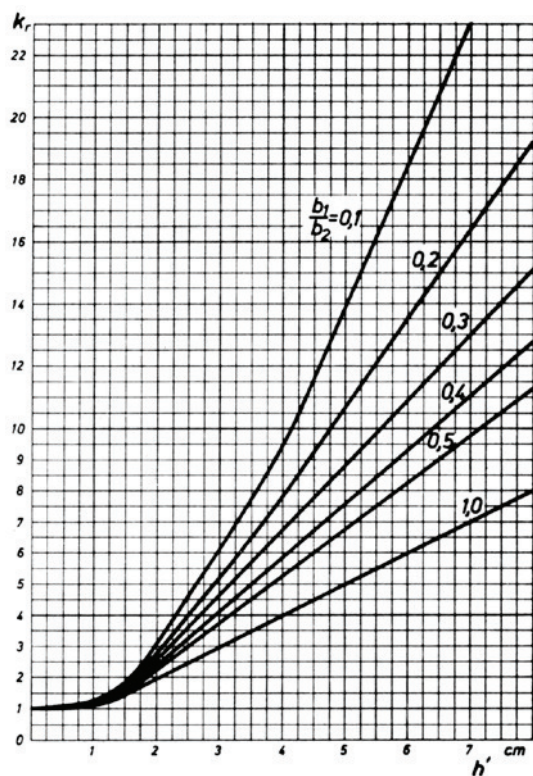
$$\kappa = 47 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$$

$$f_1 = 0$$

$$f_2 = 50 \text{ Hz}$$

Reducirana visina vodiča h' (u cm):

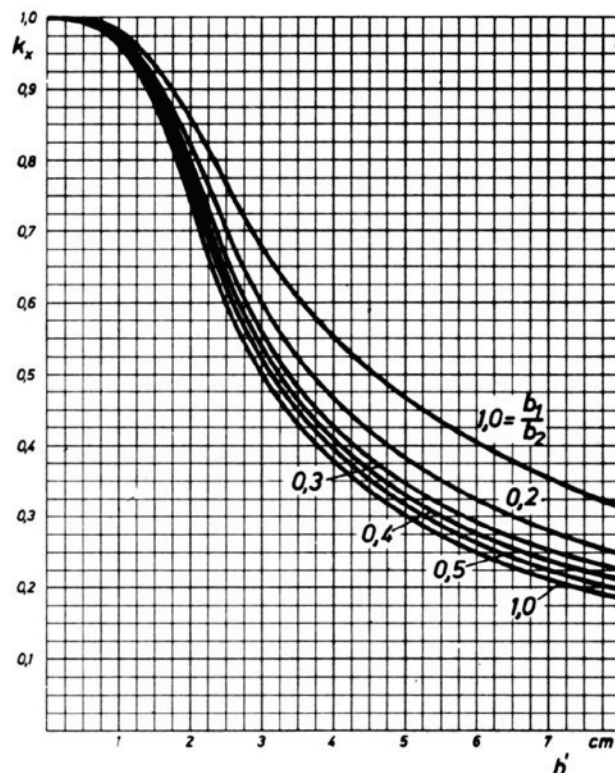
$$h' = h 0,02 \sqrt{\frac{f}{\rho}} = 4 \cdot 0,02 \sqrt{50 \cdot 47} = 3,878 \text{ cm}$$



Sl. 22.7. Faktor k_r za određivanje utjecaja potiskivanja struje na otpor štapa

$$k_r = 3,8 \rightarrow \Delta R_s = \frac{3,8 - 1}{1} = +280\%$$

$$r_{s\sim} = k_r r_s \quad k_r > 1$$



Sl. 22.8. Faktor k_x za određivanje utjecaja potiskivanja struje na rasipnu vodljivost štapa.

$$k_x = 0,39 \rightarrow \Delta X_s = \frac{0,39 - 1}{1} = -61\%$$

$$\lambda_{us\sim} = k_x \lambda_{us} \quad k_x < 1$$

22.3.4. Kolika je reaktancija glavnog toka za rotor iz zadatka 1, ako je $\alpha_i = 0,7$, a $\delta'' = 0,93$ mm?

$$p = 2 \quad \tau_p = \frac{D\pi}{2p} = \frac{0,23\pi}{2 \cdot 2} = 0,1806 \text{ m}$$

$$\alpha_i = 0,7 \quad \Lambda_m = \mu_0 \frac{2}{\pi} \frac{\alpha \tau_p l_i}{p \delta''} = 4\pi 10^{-7} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{0,7 \cdot 0,1806 \cdot 0,18}{2 \cdot 0,93 \cdot 10^{-3}} = 9,79 \cdot 10^{-6} = \frac{1}{R_m}$$

$$\delta'' = 0,93 \text{ mm}$$

$$m = N = 44 \quad X_{m2} = 2\pi f L_{m2} = 2\pi f \frac{m}{2} \frac{1}{R_m} (w_2 f_{n2})^2 =$$

$$= 2\pi \cdot 50 \cdot \frac{44}{2} \cdot 9,79 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 1\right)^2 = 169 \cdot 10^{-4} \Omega$$

22.3.5. Kolika je reaktancija dvostruko ulančanog rasipanja rotora iz zadatka 1?

$$\sigma_{v2} = \left(\frac{\frac{p\pi}{N_2}}{\sin \frac{p\pi}{N_2}} \right)^2 - 1 = \left(\frac{\frac{2\pi}{44}}{\sin \frac{2 \cdot 180^\circ}{44}} \right)^2 - 1 = 6,825 \cdot 10^{-3}$$

$$X_{\sigma v2} = X_{m2} \sigma_{v2} = 169 \cdot 10^{-4} \cdot 6,825 \cdot 10^{-3} = 1,153 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Preračunavanje na primarni namot

22.4.1. Kavezni rotor iz zadataka 1, 2, 4. i 5. u odjeljku 22.3. smješten je u trofazni 4-polni stator s 564 vodiča po fazi i namotnim faktorom $f_{n1} = 0,960$. Statorski namot ima otpor po fazi $R_1 = 2,72 \Omega$ i rasipnu reaktanciju $X_{\sigma1} = 5,66 \Omega$. Koliki su rotorski otpor i rasipna reaktancija svedeni na fazu statora? Kolika će biti struja kratkog spoja ako je narinut napon po fazi 380 V i 50 Hz (zanemaruje se glavna reaktancija i računa samo s rasipnom)? Rotor je neskošen.

$$m = 3$$

$$p = 2$$

$$z_1 = 564$$

$$f_{n1} = 0,96$$

$$R_1 = 2,72 \Omega$$

$$X_{\sigma1} = 5,66 \Omega$$

$$U_f = 380 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$w_2 = \frac{1}{2}$$

$$f_{n2} = 1$$

$$m_2 = N_2 = 44$$

$$k_{12} = \frac{w_1 f_{n1}}{w_2 f_{n2}} = 2 w_1 f_{n1} = z_1 f_{n1} = 564 \cdot 0,96 = 541,44$$

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{k_{12}}{f_\beta} \right)^2 \frac{m_1}{N_2} = R_2 \frac{m_1}{N_2} \left(\frac{z_1 f_{n1}}{f_\beta} \right)^2 =$$

$$= 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{3}{44} \cdot \left(\frac{541,44}{1} \right)^2 = 2,66 \Omega$$

$$X'_{\sigma2} = X_{\sigma2} \left(\frac{k_{12}}{f_\beta} \right)^2 \frac{m_1}{N_2} = X_{\sigma2} \frac{m_1}{N_2} \left(\frac{z_1 f_{n1}}{f_\beta} \right)^2 = (X_\sigma + X_{\sigma v2}) \frac{m_1}{N_2} \left(\frac{z_1 f_{n1}}{f_\beta} \right)^2 =$$

$$= (2,02 + 1,153) \cdot 10^{-4} \cdot \frac{3}{44} \cdot \left(\frac{541,44}{1} \right)^2 = 6,34 \Omega$$

$$Z_k = \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_{\sigma1} + X'_{\sigma2})^2} =$$

$$= \sqrt{(2,72 + 2,66)^2 + (5,66 + 6,34)^2} = 13,15 \Omega$$

$$I_k = \frac{U}{Z_k} = \frac{380}{13,15} = 28,9 \text{ A}$$

22.4.2. Rotor u 1. zadatku je skošen za jedan statorski utor ($m_s = 1/36$). Koliko je povećanje rasipne reaktancije? Kolika je struja kratkog spoja?

$$\underline{m_s = \frac{1}{36}}$$

$$\beta = 2\pi p m_s = 2\pi \cdot 2 \cdot \frac{1}{36} = 0,349$$

$$f_\beta = \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\frac{\beta}{2}} = \frac{\sin 0,1745}{0,1745} = 0,995$$

$$\sigma_\beta = \frac{1}{f_\beta^2} - 1 = \frac{1}{0,995^2} - 1 = 0,01007$$

$$X_{m1} = X_{m2} \frac{m_1}{N_2} (z_1 f_{n1})^2 = 169 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{3}{44} \cdot 541,44^2 = 338 \, \Omega$$

$$X_\beta = X_{m1} \sigma_\beta = 338 \cdot 0,01007 \approx 3,5 \, \Omega$$

$$\begin{aligned} Z_k &= \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} + X_\beta)^2} = \\ &= \sqrt{(2,72 + 2,66)^2 + (5,66 + 6,34 + 3,5)^2} = 16,4 \, \Omega \end{aligned}$$

$$I_k = \frac{U}{Z_k} = \frac{380}{16,4} = 23,1 \, \text{A}$$

22.4.3. Kolika struja teče u štapu rotora, a kolika u prstenu pri kratkom spoju iz 1. zadatka?

$$I'_2 = I_2 \frac{f_\beta N_2}{k_{12} m_1} = I_2 \frac{f_\beta N_2}{m_1 z_1 f_{n1}} \rightarrow I_2 = I'_2 \frac{m_1 k_{12}}{f_\beta N_2} = 28,9 \cdot \frac{3 \cdot 541,44}{1 \cdot 44} = 1067 \, \text{A} = I_s$$

$$I_p = \frac{I_s}{k_p} = \frac{1067}{0,2846} = 3748 \, \text{A}$$

22.4.4. Isto pitanje, ali za skošeni rotor iz 2. zadatka.

$$I_2 = I'_2 \frac{m_1 k_{12}}{f_\beta N_2} = 23,1 \cdot \frac{3 \cdot 541,44}{0,995 \cdot 44} = 857 \, \text{A} = I_s$$

$$I_p = \frac{I_s}{k_p} = \frac{857}{0,2846} = 3011 \, \text{A}$$