



Danilo Makuc

Modeliranje električnih strojev

Zbirka rešenih nalog

Predgovor

Zbirka vsebuje rešene naloge, ki pridejo v poštev za pisni izpit pri predmetu *Modeliranje električnih strojev*. Naloge so vezane na laboratorijske vaje pri tem predmetu, zato se predpostavi, da je študent seznanjen z vsebino le-teh in jih je tudi praktično izvedel. Rešitve nalog so sicer komentirane, vendar to največkrat ni dovolj za razumevanje obravnavane vsebine, ki je natančneje predstavljena v predlogah za laboratorijske vaje. Predloge so na voljo na spletnem naslovu <http://les.fe.uni-lj.si/mes/literatura.htm>.

Naloge v zbirki so razvrščene po vsebinah, ki se obravnavajo pri posamezni laboratorijski vaji. Mislim, da ne bo težko poiskati ustrezno vajo h kateri sodijo naloge.

Računske in druge napake niso izključene, zato prosim, da me o njih obvestite (e-pošta: danilo.makuc@fe.uni-lj.si). Dobrodošli so seveda tudi pripombe in predlogi.

Danilo Makuc

Ljubljana, januar 2012

Kazalo

1 Nadomestno vezje in obremenitev transformatorja.....	4
2 Parametri kolektorskega stroja.....	19
3 Sinhronske reaktance in medsebojna induktivnost.....	24
4 Merjenje vztrajnostnega momenta z iztečnim preizkusom	28
5 Nadomestno vezje asinhronskega motorja.....	35
6 Enosmerni generator s paralelnim vzbujanjem.....	39
7 Obremenilni preizkus asinhronskega motorja.....	50
8 Potierova reaktanca in švedski diagram sinhronskega stroja.....	52
9 Meritev navorne karakteristike asinhronskega stroja	62

1 Nadomestno vezje in obremenitev transformatorja

1.1 Na trifaznem transformatorju z nazivnimi podatki: Yyn6, $S_n = 160 \text{ kVA}$, $U_{1n} = 21 \text{ kV}$, $U_{2n} = 0,42 \text{ kV}$, $f_n = 50 \text{ Hz}$, smo opravili naslednje meritve:

- upornost med sponkami primarja: $R_{1U-1V} = R_{1U-1W} = R_{1V-1W} = 40 \ \Omega$;
- preizkus prostega teka: $P_0 = 300 \text{ W}$;
- preizkus kratkega stika: $P_k = 2340 \text{ W}$, $u_k = 4 \%$.

Izračunajte:

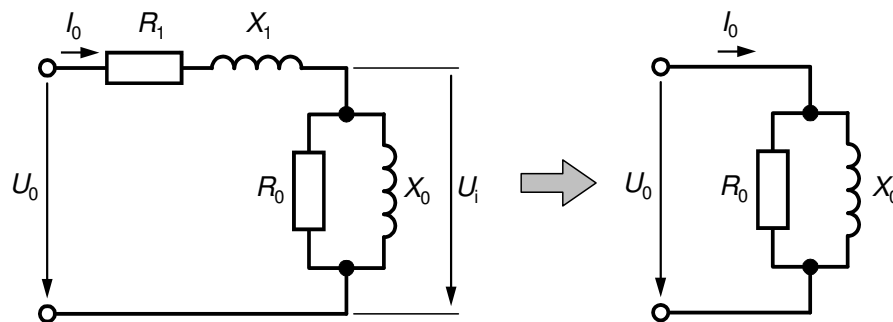
- nazivni primarni tok transformatorja,
- vrednost elementa R_0 v nadomestnem vezju transformatorja,
- vrednost elementa X_2' v nadomestnem vezju transformatorja,
- upornost sekundarnega navitja med sponkama 2U-2V.

REŠITEV:

a) Nazivni primarni tok transformatorja izračunamo s pomočjo nazivne moči in nazivne primarne napetosti transformatorja:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{160000}{\sqrt{3} \cdot 21000} = \mathbf{4,399 \text{ A}}. \quad (1)$$

b) Moč, ki se troši na upornosti R_0 v nadomestnem vezju predstavlja izgube v železu transformatorja. Osnova za izračun so rezultati preizkusa prostega teka transformatorja. Napetost na upornosti R_0 je dejansko inducirana napetost (U_i), a pri izračunu elementov R_0 in X_0 padce napetosti na elementih v serijski veji (R_1 , X_1) največkrat zanemarimo.



Tako velja, da je delovna moč prostega teka enaka izgubam v železu. Pri tem ne smemo pozabiti, da so nadomestna vezja trifaznih strojev enofazna, zato moramo to upoštevati pri izračunih (fazna napetost, tretjina moči, ...). Moč izgub v železu sedaj izrazimo:

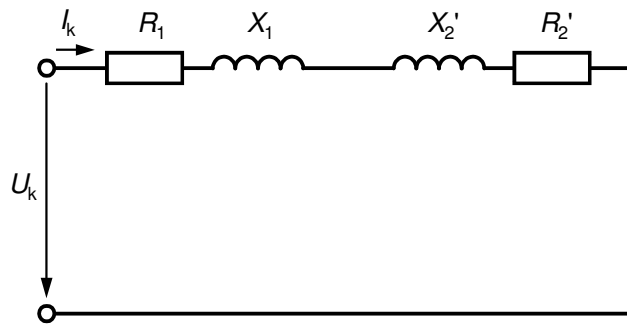
$$\frac{P_{Fe}}{3} = \frac{P_0}{3} = \frac{\left(\frac{U_0}{\sqrt{3}}\right)^2}{R_0} \quad (2)$$

in izračunamo R_0 :

$$R_0 = \frac{U_0^2}{P_0} = \frac{21000^2}{300} = \mathbf{1,47 \text{ M}\Omega}. \quad (3)$$

c) Vrednost elementa X_2' , ki predstavlja stresano reaktanco sekundarnega navitja (reducirano na primarno napetost), izračunamo s pomočjo rezultatov preizkusa kratkega

stika, saj lahko takrat nadomestno vezje poenostavimo tako, da prečno vejo zanemarimo in dobimo le vezje z elementi serijske veje.



Vrednost elementa X_2 bomo izračunali iz jalove moči kratkega stika. Podano imamo relativno vrednost kratkostične napetosti, zato lahko izračunamo njeno absolutno vrednost:

$$U_k = u_k \cdot U_{1n} = 0.04 \cdot 21000 = 840 \text{ V} . \quad (4)$$

Pri preizkusu kratkega stika je tok enak nazivnemu ($I_k = I_n$), tako da lahko izračunamo navidezno moč kratkega stika:

$$S_k = \sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 840 \cdot 4,399 = 6400,205 \text{ VA} , \quad (5)$$

jalova moč v kratkem stiku pa je:

$$Q_k = \sqrt{S_k^2 - P_k^2} = \sqrt{6400,205^2 - 2340^2} = 5957,10 \text{ VAR} . \quad (6)$$

Na kratkostični reaktanci je tretjina jalove moči kratkega stika, zato dobimo:

$$X_k = \frac{Q_k}{3 \cdot I_k^2} = \frac{5957,10}{3 \cdot 4,399^2} = 102,61 \Omega . \quad (7)$$

Kratkostična reaktanca je vsota primarne in sekundarne stresane reaktance in ker boljše delitve ne poznamo, največkrat kratkostično reaktanco kar razpolovimo in dobimo stresano reaktanco:

$$X_2' = \frac{X_k}{2} = \frac{102,61}{2} = \mathbf{51,307 \Omega} . \quad (8)$$

d) Upornosti primarnega in sekundarnega navitja predstavljata elementa R_1 in R_2' v nadomestnem vezju transformatorja. Tudi tu bomo izhajali iz preizkusa kratkega stika, saj se tretjina delovne moči kratkega stika troši na teh elementih:

$$R_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_k^2} = \frac{2340}{3 \cdot 4,399^2} = 40,308 \Omega . \quad (9)$$

Transformator je na primarni strani vezan v zvezdo, predstavlja izmerjena upornost med primarnimi sponkami upornost dveh faznih navitij. Upornost R_1 predstavlja fazno upornost, zato lahko izračunamo:

$$R_1 = \frac{R_{1U-IV}}{2} = \frac{40}{2} = 20 \Omega , \quad (10)$$

nato pa poiščemo še:

$$R_2' = R_k - R_1 = 40,308 - 20 = 20,308 \Omega . \quad (11)$$

Ta vrednost je reducirana na primarno napetost zato izračunajmo pravo vrednost:

$$R_2 = \frac{R_2'}{p^2} = \frac{20,308}{50^2} = 0,0081232 \Omega . \quad (12)$$

Ker nas zanima upornost med sekundarnima sponkama 2U-2V in je sekundar ravno tako vezan v vezavo zvezda, je upornost med omenjenima sponkama dvakrat večja od upornosti faznega navitja:

$$R_{2U-2V} = 2 \cdot R_2 = 2 \cdot 0,0081232 = \mathbf{0,01624 \Omega} . \quad (13)$$

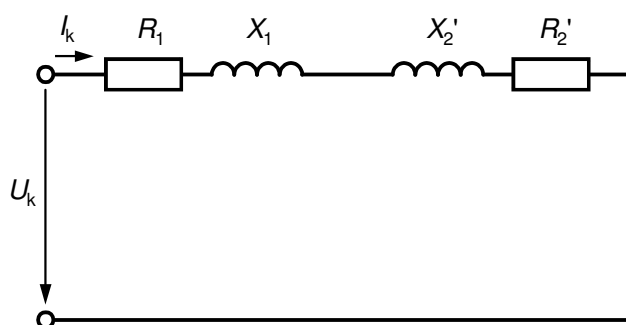
1.2 Na trifaznem transformatorju z nazivnimi podatki: Dyn5, $S_n = 1600$ kVA, $U_{1n} = 20$ kV, $U_{2n} = 400$ V, $f_n = 50$ Hz, smo opravili preizkusa prostega teka in kratkega stika. Rezultati so sledeči:

- prosti tek: $P_0 = 1800$ W, $I_0 = 0,5$ A;
- kratek stik: $P_k = 20000$ W, $u_k = 6\%$.

Določite vrednosti elementov nadomestnega vezja transformatorja.

REŠITEV:

Elemente nadomestnega vezja bomo izračunali iz rezultatov preizkusa prostega teka in kratkega stika. V kratkem stiku se nadomestno vezje transformatorja poenostavi v vezje brez paralelne veje (R_0 , X_0), saj lahko izgube v železu in magnetilni tok zanemarimo.



V primeru trifaznih strojev moramo upoštevati, da nadomestno vezje predstavlja eno fazo in so zato vse napetosti, ki v vezju nastopajo fazne.

Preizkus kratkega stika se izvede tako, da na primar transformatorja priključimo napetost, ki požene naziven tok. Nazivni tok transformatorja izračunamo s pomočjo nazivne moči in nazivne primarne napetosti transformatorja:

$$I_n = I_k = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{1600000}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 46,19 \text{ A.} \quad (1)$$

Celotno moč izgub v kratkem stiku torej predstavljajo izgube v bakru, zato lahko izračunamo kratkostično upornost R , ki jo bomo kasneje razdelili na R_1 in R_2' . Kot smo dejali, gre za enofazno nadomestno vezje, zato je potrebno moči, dobljene z meritvami ustrezno deliti s številom faz:

$$R_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_n^2} = \frac{20000}{3 \cdot 46,19^2} = 3,125 \Omega. \quad (2)$$

Ker nimamo podatka o razmerju upornosti predpostavimo:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = \frac{3,125}{2} = 1,562 \Omega. \quad (3)$$

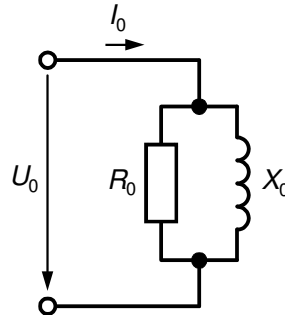
S pomočjo kratkostične impedance in kratkostične upornosti, podobno izračunamo še elementa stresanih reaktanc:

$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{u_k \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{0,06 \cdot 20000}{\sqrt{3} \cdot 46,19} = 15,00 \Omega, \quad (4)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{15,00^2 - 3,125^2} = 14,671 \Omega, \quad (5)$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2} = \frac{14,671}{2} = 7,335 \Omega. \quad (6)$$

Elementa paralelne veje R_0 in X_0 bomo določili s pomočjo rezultatov preizkusa prostega teka, ko je transformator priključen na nazivno napetost, na sekundarni strani pa ni bremena. Ker sta elementa R_0 in X_0 običajno dosti večja od elementov v serijski veji R_1 in X_1 , nadomestno vezje prostega teka poenostavimo v obliko, kjer nastopata le R_0 , katerega moč predstavlja izgube v železu in X_0 , skozi katerega teče magnetilni tok transformatorja.



Izgube preizkusa prostega v celoti torej predstavljajo izgube v železu, tako da lahko izračunamo element R_0 :

$$R_0 = \frac{\left(\frac{U_0}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{P_0}{3}} = \frac{U_0^2}{P_0} = \frac{20000^2}{1800} = \mathbf{222,22 \text{ k}\Omega}. \quad (7)$$

Na elementu X_0 imamo jalovo moč prostega teka, tako da element X_0 izračunamo na podlagi le-te:

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2} = \sqrt{(\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0)^2 - P_0^2} = \sqrt{(\sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 0,5)^2 - 1800^2} = 17226,7 \text{ VAr}. \quad (8)$$

$$X_0 = \frac{\left(\frac{U_0}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{Q_0}{3}} = \frac{U_0^2}{Q_0} = \frac{20000^2}{17226,7} = \mathbf{23,22 \text{ k}\Omega}. \quad (9)$$

1.3 Na enofaznem transformatorju s podatki $U_{1n} = 10 \text{ kV}$, $U_{2n} = 0,4 \text{ kV}$, $S_n = 10 \text{ kVA}$, $f_n = 50 \text{ Hz}$, sta bila opravljena preizkusa prostega teka in kratkega stika. Rezultati obeh preizkusov so:

- a) preizkus prostega teka: $U_{10} = 10 \text{ kV}$, $U_{20} = 0,4 \text{ kV}$, $I_{10} = 0,1 \text{ A}$, $P_{10} = 100 \text{ W}$;
 b) preizkus kratkega stika: $U_{1k} = 1000 \text{ V}$, $P_{1k} = 600 \text{ W}$.

Določite absolutni (V) in relativni (%) padec napetosti na sekundarju, če transformator obremenimo z dvojn timer nazivnim tokom čistega ohmskega karakterja.

Določite karakter in impedanco bremena (v obliki $R + jX$), da bo transformator nazivno obremenjen in da na sekundarju ne bo padca napetosti.

REŠITEV:

Če je transformator obremenjen z dvakratno vrednostjo nazivnega toka so tudi padci na stresanih reaktancah (U_x) in upornostih navitij (U_r) dvakrat večji od tistih pri nazivnem toku. Ker imamo podatke preizkusa kratkega stika lahko izračunamo relativne nazivne padce napetosti pri nazivnem toku:

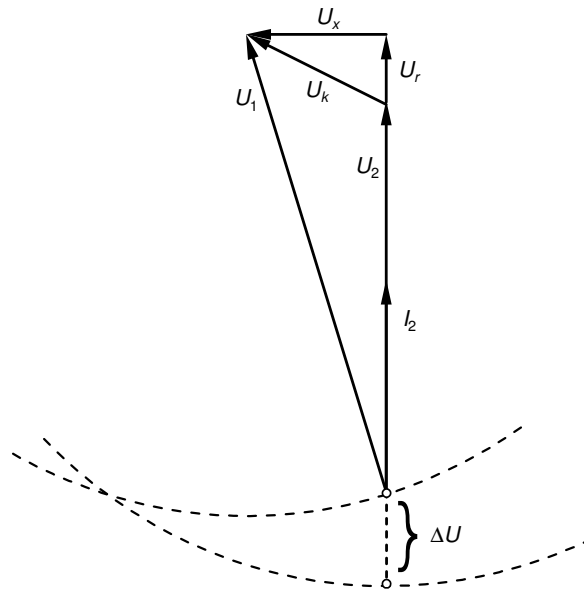
$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{10000}{10000} = 1 \text{ A}, \quad (1)$$

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1n}} = \frac{1000}{10000} = 0,1, \quad (2)$$

$$u_r = u_k \cdot \cos \varphi_k = u_k \cdot \frac{P_{1k}}{U_{1k} I_{1n}} = 0,1 \cdot \frac{600}{1000 \cdot 1} = 0,06, \quad (3)$$

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = \sqrt{0,1^2 - 0,06^2} = 0,08. \quad (4)$$

Zanima nas dejanski padec napetosti na sekundarju, ko je obremenjen z dvojn timer nazivnim tokom ohmskega karakterja. Če narišemo Kappov diagram z ustrezno velikim Kappovim trikotnikom, lahko padec napetosti odčitamo grafično (glej diagram).



Če pa želimo do rešitve priti po analitični poti, na podlagi kazalčnega diagrama napišemo:

$$U_1^2 = U_x^2 + (U_r + U_2)^2, \quad (5)$$

oziroma

$$U_2 = \sqrt{U_1^2 - U_x^2} - U_r. \quad (6)$$

Enako velja za relativno izražene napetosti, zato pri dvojnem nazivnem toku zapišemo:

$$u_2 = \sqrt{u_1^2 - (2 \cdot u_x)^2} - 2 \cdot u_r = \sqrt{1 - (2 \cdot 0,08)^2} - 2 \cdot 0,06 = 0,867 \quad (7)$$

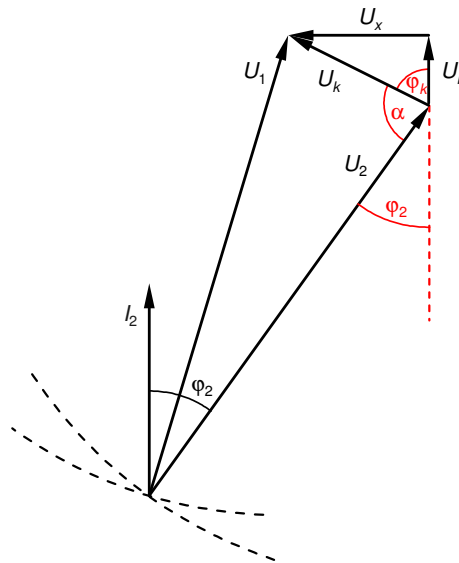
Relativni padec napetosti na sekundarju je tako:

$$\Delta u_2 = 1 - u_2 = 1 - 0,867 = \mathbf{0,133}, \quad (8)$$

kar znaša absolutno:

$$\Delta U_2 = \Delta u_2 \cdot U_{2n} = 0,133 \cdot 400 = \mathbf{53,2 \text{ V}}. \quad (9)$$

Če želimo, da na sekundarju ni padca napetosti, mora biti transformator obremenjen s takšnim bremenom, da je izgled kazalčnega diagrama kot na spodnji sliki.



Ker breme priključimo na sekundar, izračunamo nazivni tok sekundarja in potrebno impedanco bremena:

$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} = \frac{10000}{400} = 25 \text{ A}, \quad (10)$$

$$|Z_b| = \frac{U_{2n}}{I_{2n}} = \frac{400}{25} = 16 \Omega. \quad (11)$$

Impedanco je potrebno podati v obliki $R + jX$, za kar pa moramo poznati fazni kot φ_2 . Dobimo ga lahko grafično, če narišemo ustrezen Kappov diagram, ali pa ga z nekoliko znanja geometrije izračunamo (glej Kappov diagram). Kot φ_2 izračunamo iz podatkov preizkusa kratkega stika:

$$\varphi_k = \arccos\left(\frac{u_r}{u_k}\right) = \arccos\left(\frac{0,06}{0,1}\right) = 53,13^\circ. \quad (12)$$

Ker je trikotnik, ki ga definirajo napetosti $U_1-U_2-U_k$, enakokrak, lahko izračunamo kot α , saj so dolžine vseh stranic poznane:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\frac{u_k}{2}}{u_2}\right) = \arccos\left(\frac{0,05}{1}\right) = 87,13^\circ. \quad (13)$$

Sedaj lahko izračunamo fazni kot:

$$\varphi_2 = 180^\circ - \varphi_k - \alpha = 180^\circ - 53,13^\circ - 87,13^\circ = 39,74^\circ. \quad (14)$$

Impedanco bremena zapišemo kompleksno kot vsoto upornosti in kapacitivne reaktance:

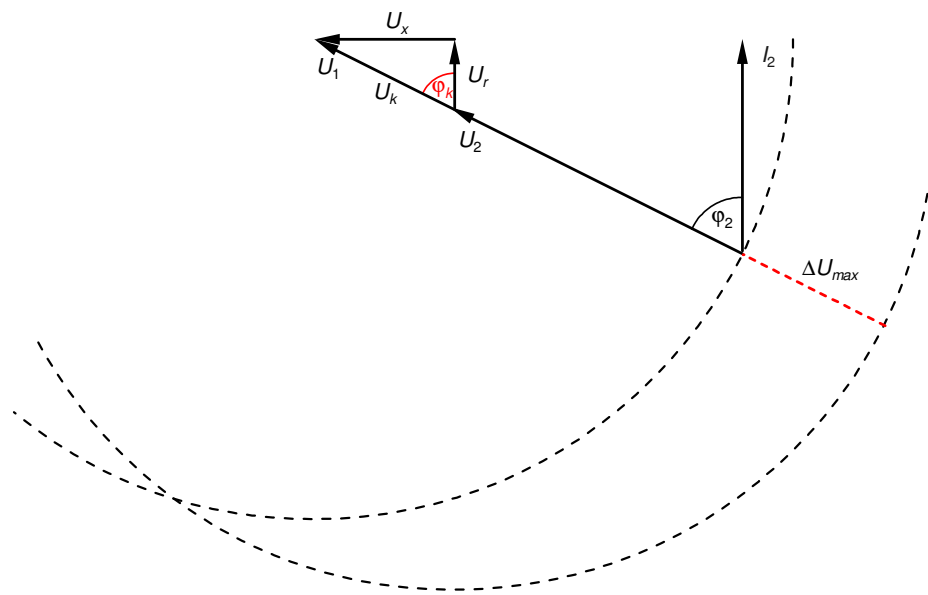
$$Z_b = |Z_b| \cos(39,74^\circ) - j|Z_b| \sin(39,74^\circ) = \mathbf{(12,3 - j10,2) \Omega}. \quad (15)$$

- 1.4 (Analitično)** Na enofaznem transformatorju s podatki $U_{1n} = 400 \text{ V}$, $U_{2n} = 230 \text{ V}$, $S_n = 500 \text{ VA}$, $f_n = 50 \text{ Hz}$, je bil opravljen preizkus kratkega stika: $U_{1k} = 40 \text{ V}$, $I_{1k} = I_n$, $P_{1k} = 30 \text{ W}$.

Določite breme, da bo pri dvakratnem nazivnem toku na sekundarju največji padec napetosti. Narišite vezalni načrt priključitve takega bremena na transformator in izračunajte vrednosti elementov (R , L ali C).

REŠITEV:

Na Kappovem diagramu je narisano obremenilno stanje, ko je padec napetosti na sekundarju največji. To je takrat, ko sta kazalca primarne in sekundarne napetosti v fazi. Breme mora imeti ohmsko-induktivni karakter, fazni kot pa je enak tistemu v kratkem stiku. Padec napetosti na sekundarju znaša, v primeru dvojnega nazivnega toka, dvojno vrednost kratkostične napetosti.



Najprej izračunamo relativno kratkostično napetost transformatorja in kratkostični $\cos\varphi$:

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1n}} = \frac{40}{400} = 0,1, \quad (1)$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1k}}{U_{1k} I_{1k}} = \frac{P_{1k} \cdot U_{1n}}{U_{1k} \cdot S_n} = \frac{30 \cdot 400}{40 \cdot 500} = 0,6. \quad (2)$$

Napetost na sekundarju, obremenjenem z dvojnem nazivnim tokom, bo tako:

$$U_2 = U_{2n}(1 - 2 \cdot u_k) = 230(1 - 2 \cdot 0,1) = 184 \text{ V}. \quad (3)$$

Potrebno absolutno vrednost impedance bremena izračunamo s pomočjo sekundarne napetosti v obremenjenem stanju in dvojnega nazivnega toka sekundarja:

$$|Z_b| = \frac{U_2}{2 \cdot I_{2n}} = \frac{U_2 \cdot U_{2n}}{2 \cdot S_n} = \frac{184 \cdot 230}{2 \cdot 500} = 42,32 \Omega. \quad (4)$$

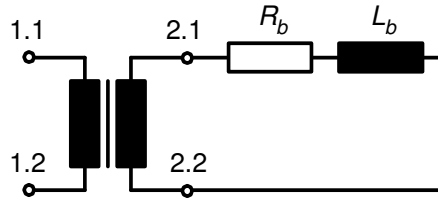
V primeru, da bo breme zaporedna vezave upornosti in induktivnosti, izračunamo posamezna elementa:

$$R_b = |Z_b| \cos \varphi_k = 42,32 \cdot 0,6 = \mathbf{25,39 \Omega}, \quad (5)$$

$$X_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2} = \sqrt{42,32^2 - 25,39^2} = 33,86 \Omega, \quad (6)$$

$$L_b = \frac{X_b}{\omega} = \frac{X_b}{2\pi \cdot f} = \frac{33,86}{2\pi \cdot 50} = 0,108 \text{ H}. \quad (7)$$

In še vezalni načrt:



1.5 (Analitično) Na trifaznem transformatorju v vezavi Dz s podatki $U_{1n} = 10$ kV, $U_{2n} = 0,4$ kV, $S_n = 10$ kVA, $f_n = 50$ Hz, sta bila opravljena preizkusa prostega teka in kratkega stika. Rezultati so:

- a) preizkus prostega teka: $U_{10} = 10$ kV, $I_{10} = 0,1$ A, $P_{10} = 100$ W, $U_{20} = 0,4$ kV;
 b) preizkus kratkega stika: $U_{1k} = 1000$ V, $P_{1k} = 600$ W.

Na transformator, ki je priključen na nazivno omrežje, želimo priključiti takšno breme, da bo pri nazivnem toku največji padec napetosti na sekundarju.

Narišite vezalni načrt transformatorskih navitij s priključenim bremenom ter označite vrednosti elementov bremena (R , L oz. C v ustreznih enotah).

REŠITEV:

Na Kappovem diagramu pri nalogi št. 1.4 je narisano obremenilno stanje, ko je padec napetosti na sekundarju največji. To je takrat, ko sta kazalca primarne in sekundarne napetosti v fazi. Breme mora imeti ohmsko-induktivni karakter, fazni kot pa je enak tistemu v kratkem stiku. Ker je transformator nazivno obremenjen so padci enaki tistim pri preizkusu kratkega stika. Izračunamo:

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1n}} = \frac{1000}{10000} = 0,1 \text{ in} \quad (1)$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1k}}{\sqrt{3} \cdot U_{1k} I_{1k}} = \frac{P_{1k} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1n}}{\sqrt{3} \cdot U_{1k} \cdot S_n} = \frac{600 \cdot 10000}{1000 \cdot 10000} = 0,6. \quad (2)$$

Napetost na sekundarju, obremenjenem z nazivnim tokom, bo tako:

$$U_2 = U_{2n}(1 - u_k) = 400(1 - 0,1) = 360 \text{ V}. \quad (3)$$

Odločili smo se, da bo breme vezano v zvezdo, zato je potrebno impedanco bremena izračunati s pomočjo fazne sekundarne napetosti v obremenjenem stanju:

$$|Z_b| = \frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot I_{2n}} = \frac{U_2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{2n}}{\sqrt{3} \cdot S_n} = \frac{360 \cdot \sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 14,4 \Omega. \quad (4)$$

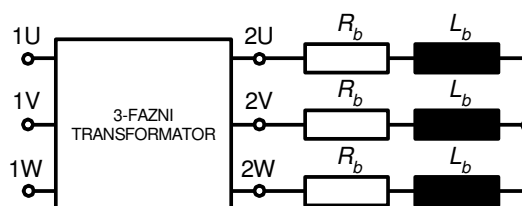
Breme bo zaporedna vezava upornosti in induktivnosti, zato izračunamo posamezna elementa:

$$R_b = |Z_b| \cos \varphi_k = 14,4 \cdot 0,6 = \mathbf{8,64 \Omega}, \quad (5)$$

$$X_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2} = \sqrt{14,4^2 - 8,64^2} = 11,52 \Omega, \quad (6)$$

$$L_b = \frac{X_b}{\omega} = \frac{X_b}{2\pi \cdot f} = \frac{11,52}{2\pi \cdot 50} = \mathbf{0,0367 \text{ H}}. \quad (7)$$

In še vezalni načrt:

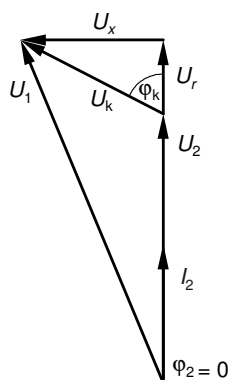


1.6 (Analitično) Enofazni ločilni transformator ($U_{1n} = U_{2n} = 230 \text{ V}$, $S_n = 1 \text{ kVA}$, $f_n = 50 \text{ Hz}$, $R_1 = R_2 = 0,6 \Omega$) je priključen na nazivno omrežje in je nazivno obremenjen s čistim ohmskim bremenom. Napetost na sekundarnih sponkah je pri tem $U_2 = 224 \text{ V}$.

- Kolikšna bo napetost na sekundarju, če transformator nazivno obremenimo s čistim kapacitivnim bremenom?
- Kolikšna mora biti kapacitivnost kondenzatorja, da bo sekundar obremenjen z nazivnim tokom?

REŠITEV:

Čeprav bomo rešitev poiskali analitično, si narišimo Kappov (kazalčni) diagram obremenilnega stanja s čistim ohmskim bremenom, za katerega poznamo sekundarno napetost:



Pri nazivni obremenitvi transformatorja je tok enak nazivnemu:

$$I_n = \frac{S_n}{U_n} = \frac{1000}{230} = 4,347 \text{ A} . \quad (1)$$

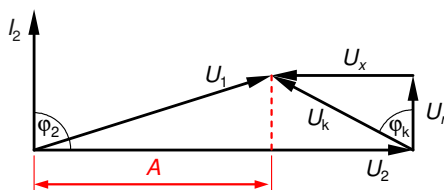
S pomočjo znane upornosti navitij lahko izračunamo padec napetosti na njih. Ker je prestava transformatorja 1, lahko padec računamo neposredno z izmerjenimi vrednostmi upornosti:

$$U_r = I_n \cdot (R_1 + R_2) = 4,347 \cdot (0,6 + 0,6) = 5,216 \text{ V} . \quad (2)$$

Na podlagi kazalčnega diagrama izračunamo padec na stresani reaktanci:

$$U_x = \sqrt{U_1^2 - (U_2 + U_r)^2} = \sqrt{230^2 - (224 + 5,216)^2} = 18,974 \text{ V} . \quad (3)$$

Sedaj, ko poznamo padce napetosti narišemo še kazalčni diagram za obremenitev s čistim kapacitivnim bremenom in s pomočjo geometrije izračunamo vrednost A (glej sliko):



$$A = \sqrt{U_1^2 - U_r^2} = \sqrt{230^2 - 5,216^2} = 229,94 \text{ V} \quad (4)$$

ter izračunamo sekundarno napetost, saj velja:

$$U_2 = A + U_x = 229,94 + 18,974 = \mathbf{248,92 \text{ V}} \quad (5)$$

b) Ker že poznamo sekundarno napetost pri nazivni obremenitvi s kapacitivnim bremenom lahko enostavno izračunamo potrebno kapacitivnost:

$$X_C = \frac{U_2}{I_n} = \frac{248,92}{4,347} = 57,262 \Omega \quad (6)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \rightarrow C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 57,262} = \mathbf{55,59 \mu F} \quad (7)$$

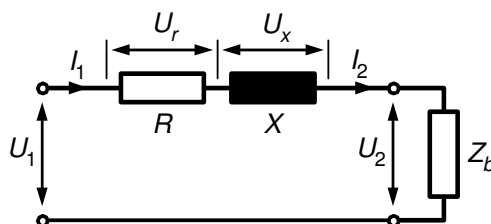
- 1.7 (Analitično) Enofazni ločilni transformator ($U_{1n} = U_{2n} = 230 \text{ V}$, $S_n = 920 \text{ VA}$, $f_n = 50 \text{ Hz}$) ima kratkostično napetost 10 % in nazivne izgube v bakru 40 W.

Določite breme (vrsta, vrednosti), tako da bo transformator nazivno obremenjen ter da bo na primarni strani $\cos\varphi_1 = 1$.

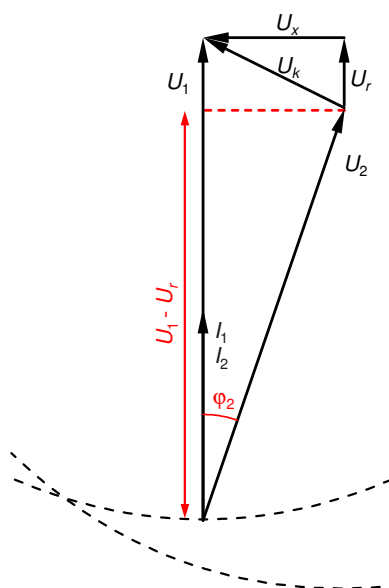
Zanemarite izgube v železu in magnetilni tok transformatorja.

REŠITEV:

Izgube v železu in magnetilni tok transformatorja zanemarimo, zato lahko uporabimo poenostavljeno nadomestno vezje transformatorja, kjer imamo v transformatorju le padca napetosti na upornosti navitij (U_r) in padec napetosti na stresani reaktanci navitij (U_x). Ker nimamo prečne veje sta toka I_1 in I_2 enaka. Na sekundarno stran priključimo breme, ki ga za zdaj označimo le kot impedanco Z_b .



Rešitev bomo poiskali analitično, a za lažjo predstavbo in pomoč pri izračuni si narišimo kazalčni (Kappov) diagram obremenilnega stanja, ko je na primarni strani $\cos\varphi_1 = 1$, kar pomeni, da sta primarna napetost U_1 in tok I_1 v fazi:



Za izračun bremena potrebujemo napetost na bremenu (U_2), tok (I_2) ter faktor moči oziroma $\cos\varphi_2$. Če želimo izračunati sekundarno napetost obremenjenega transformatorja moramo poznati padca napetosti U_r in U_x . Iz nazivnih podatkov transformatorja izračunamo nazivni tok:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_1} = \frac{920}{230} = 4 \text{ A}, \quad (1)$$

in kratkostično napetost:

$$U_k = u_k \cdot U_1 = 0,1 \cdot 230 = 23 \text{ V}. \quad (2)$$

Podane so nazivne izgube v bakru P_{Cu-n} , kar pomeni, da lahko izračunamo padec U_r , saj se celotne izgube P_{Cu-n} trošijo na elementu R :

$$U_r = \frac{P_{Cu-n}}{I_{1n}} = \frac{40}{4} = 10 \text{ V}. \quad (3)$$

Iz teh podatkov sledi še padec na stresani reaktanci, ki znaša:

$$U_x = \sqrt{U_k^2 - U_r^2} = \sqrt{23^2 - 10^2} = 20,712 \text{ V}. \quad (4)$$

S pomočjo kazalčnega diagrama lahko izračunamo sekundarno napetost:

$$U_2 = \sqrt{(U_1 - U_r)^2 + U_x^2} = \sqrt{(230 - 10)^2 + 20,712^2} = 220,973 \text{ V}. \quad (5)$$

Prestava transformatorja je 1, zato je izračunana napetost že dejanska napetost na sekundarju, v primeru drugačne prestave, pa je potrebno to vrednost ustrezno preračunati.

Transformator je nazivno obremenjen, kar pomeni, da je obremenjen z nazivnim tokom. Izračunamo lahko impedanco bremena, saj velja $I_{1n} = I_2$:

$$Z_b = \frac{U_2}{I_2} = \frac{220,973}{4} = 55,243 \Omega. \quad (6)$$

To pa ni končna rešitev, saj moramo določiti vrsto bremena in vrednosti elementov. Iz kazalčnega diagrama se vidi, da sekundarni tok prehiteva napetost, kar pomeni, da gre za ohmsko-kapacitivno breme, torej bomo impedanco razdelili na ohmsko upornost in kapacitivno reaktanco. Da lahko to naredimo, izračunamo faktor delavnosti $\cos\varphi_2$, pri čemer pazimo na zaokroževanje, saj gre za zelo majhen kot:

$$\cos\varphi_2 = \frac{U_1 - U_r}{U_2} = \frac{230 - 10}{220,973} = 0,9956. \quad (7)$$

Ohmski del znaša:

$$R_b = Z_b \cdot \cos\varphi_2 = 55,243 \cdot 0,9956 = \mathbf{55,00 \Omega}, \quad (8)$$

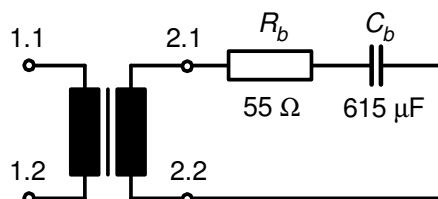
kapacitivna reaktanca pa:

$$X_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2} = \sqrt{55,243^2 - 55,00^2} = 5,176 \Omega, \quad (9)$$

kar pri nazivni frekvenci da naslednjo kapacitivnost:

$$C_b = \frac{1}{\omega \cdot X_b} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_b} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 5,176} = \mathbf{615 \mu F}. \quad (10)$$

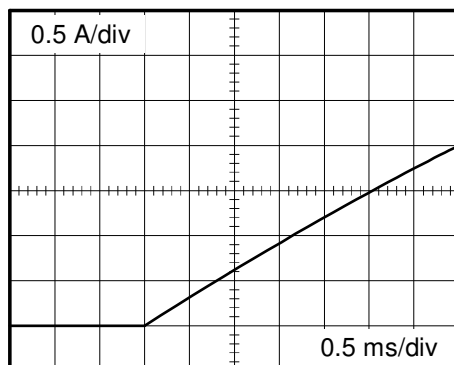
Narišimo še priključitev takega bremena na transformator:



2 Parametri kolektorskega stroja

- 2.1 Izmeriti želimo induktivnost dušilke brez železnega jedra in pri tem uporabimo metodo s skočno spremembo napetosti. Z Ω -metrom izmerimo upornost navitja $R = 1,55 \Omega$ ter nato dušilko preko stikala direktno priključimo na akumulator z napetostjo $U = 12,4 \text{ V}$. Zaradi neprimerno nastavljene občutljivosti in časovne baze osciloskopa, dobimo prikazani oscilogram toka.

Določite induktivnost dušilke. Notranjo upornost akumulatorja zanemarite.

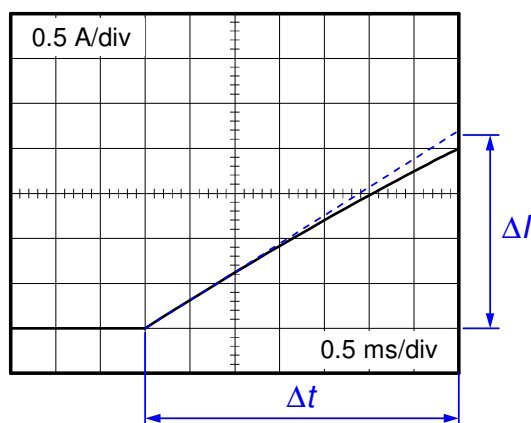


REŠITEV:

Ob vklopu dušilke na enosmerno napetost je časovni potek toka znana eksponencialna krivulja:

$$i(t) = I_{max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (1)$$

pri čemer je τ časovna konstanta definirana kot $\tau = L/R$. Običajno jo iz časovnega poteka toka odčitamo tako, da poiščemo subtangento na krivuljo v trenutku vklopa (med 0 in I_{max}). Kljub temu, da na oscilogramu nimamo celotne krivulje prehodnega pojava lahko narišemo tangento.



Prav tako lahko poiščemo vrednost subtangente, saj je tangenta linearna in zato velja:

$$\frac{\tau}{\Delta t} = \frac{I_{max}}{\Delta I}. \quad (2)$$

Vrednosti $\Delta t = 3,5 \text{ ms}$ in $\Delta I = 2,3 \text{ A}$ pridobimo grafično, vrednost maksimalne vrednosti toka pa dobimo iz napajalne napetosti in upornosti dušilke:

$$I_{max} = \frac{U}{R} = \frac{12,4}{1,55} = 8 \text{ A} . \quad (3)$$

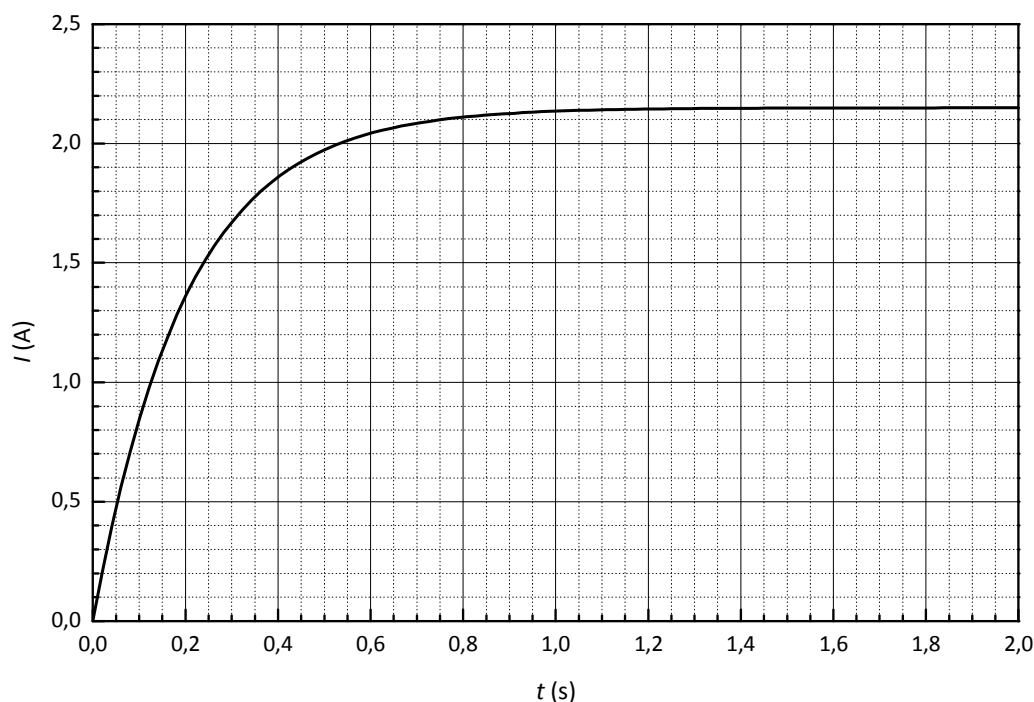
Časovna konstanta je tako:

$$\tau = \frac{I_{max} \Delta t}{\Delta I} = \frac{8 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3}}{2,3} = 12,2 \text{ ms} . \quad (4)$$

Upoštevajoč $\tau = L/R$ je induktivnost dušilke:

$$L = \tau \cdot R = 12,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,55 = \mathbf{18,9 \text{ mH}} . \quad (5)$$

- 2.2 Pri merjenju induktivnosti zračne tuljave s skočno spremembo napetosti smo dobili prikazani časovni potek toka. Določite induktivnost tuljave, če je upornost tuljave 2Ω .

**REŠITEV:**

Ob vklopu tuljave na enosmerno napetost je časovni potek toka znana eksponencialna krivulja:

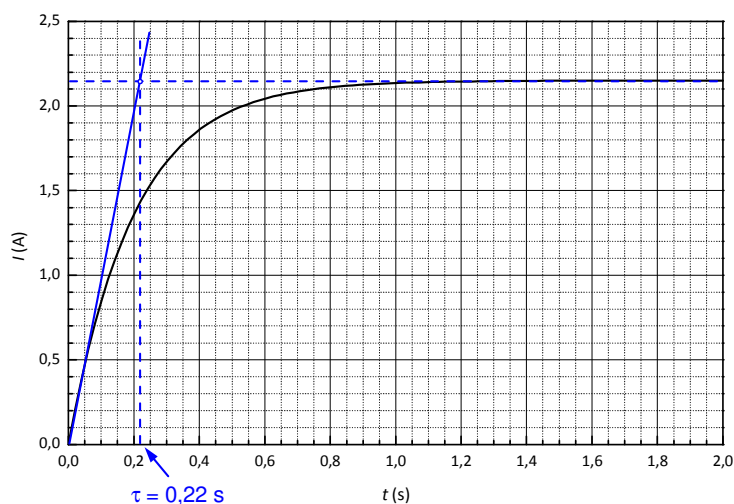
$$i(t) = I_{max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (1)$$

pri čemer je τ časovna konstanta definirana kot $\tau = L/R$.

V našem primeru jo bomo iz časovnega poteka toka določili na tri načine in sicer:

- s tangento na izhodišče prehodnega pojava in odčitanjem časa, ki ga določa subtangenta,
- z odčitanjem časa pri 63,2 % maksimalne vrednosti toka in
- z odčitanjem vrednosti toka in časa v poljubni točki in izračunom časovne konstante.

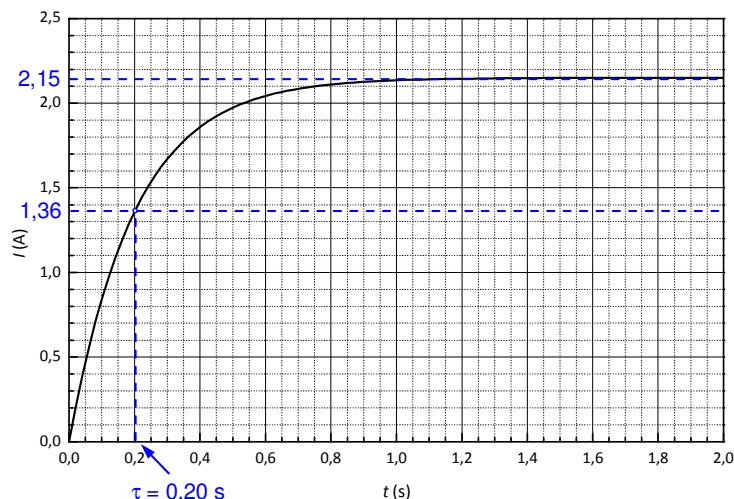
a) V prvem primeru narišemo tangento na začetek prehodnega pojava ter odčitamo vrednost časovne konstante, ki jo določa subtangenta na maksimalno vrednost toka:



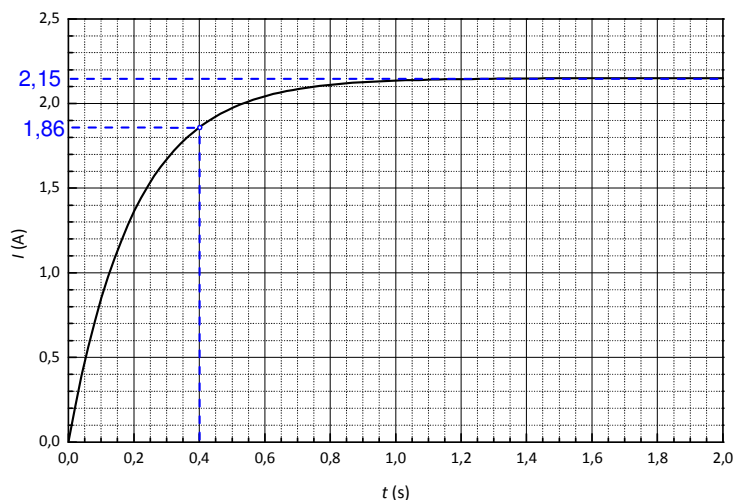
b) V drugem primeru izhajamo iz analitične rešitve enačbe (1), ki pravi, da v času, ki je enak časovni konstanti τ , doseže tok 63,21 % končne vrednosti. Iz časovnega poteka toka odčitamo maksimalno vrednost ter izračunamo:

$$I = 0,6321 I_{max} = 0,6321 \cdot 2,15 = 1,36 \text{ A} . \quad (2)$$

Iz časovnega poteka odčitamo čas pri tem toku in ta je enak iskani časovni konstanti, ki znaša $\tau = 0,20 \text{ s}$:



c) V tretjem primeru si izberemo poljubno točko na krivulji toka in s pomočjo enačbe (1) izračunamo vrednost časovne konstante. Izberimo čas $t = 0,4 \text{ s}$ in odčitamo vrednost toka, ki znaša $i = 1,86 \text{ A}$:



S pomočjo enačbe (1) izračunamo:

$$\tau = - \frac{t}{\ln\left(\frac{I_{max} - i}{I_{max}}\right)} = - \frac{0,4}{\ln\left(\frac{2,15 - 1,86}{2,15}\right)} = 0,20 \text{ s} . \quad (3)$$

Vidimo, da je najmanj natančna prva metoda, saj že majhna napaka pri grafičnem risanju tangente lahko povzroči veliko napako pri odčitani časovni konstanti. Ostali dve metodi sta enakovredni, saj grafično le odčitamo vrednosti iz časovnega poteka toka. Če torej upoštevamo časovno konstanto $\tau = 0,20 \text{ s}$, je induktivnost tuljave:

$$L = \tau R = 0,20 \cdot 2 = 0,4 \text{ H} . \quad (4)$$

- 2.3** Tuje vzbujan kolektorski generator se v prostem teku vrti s hitrostjo 2800 vrt/min. Vzbujalni tok znaša 1 A, izmerjena napetost na rotorskih sponkah pa je 200 V. Kolikšen je koeficient gibalne inducirane napetosti G v tej delovni točki?

REŠITEV:

Pojem koeficienta gibalne oz. rotacijske inducirane napetosti uvedemo pri kolektorskih strojih, saj je tam inducirana napetost na rotorju največja takrat, ko sta osi vzbujalnega in rotorskega navitja med seboj pravokotni. Uporaba medsebojne induktivnosti v takem primeru odpade, saj vemo, da je le-ta nič, če sta osi dveh tuljav pravokotni.

Enačba, ki povezuje inducirano napetost na rotorskem navitju (E_q) in vzbujalni tok statorskega navitja (I_D) se glasi:

$$E_q = \omega G_{qD} I_D, \quad (1)$$

pri čemer je ω kotna hitrost vrtenja rotorja in jo iz vrtilne hitrosti (n) podane v vrtljajih na minuto izračunamo:

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60}. \quad (2)$$

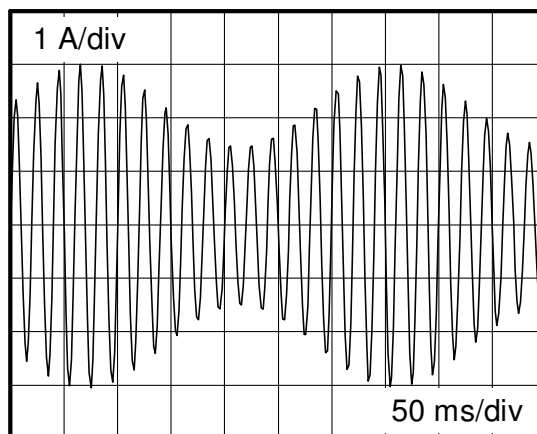
Koeficient gibalne inducirane napetosti v podani delovni točki je torej:

$$G_{qD} = \frac{E_q}{\omega I_D} = \frac{60 E_q}{2\pi n I_D} = \frac{60 \cdot 200}{2\pi \cdot 2800 \cdot 1} = \mathbf{0,682 \text{ H}}. \quad (3)$$

3 Sinhronske reaktance in medsebojna induktivnost

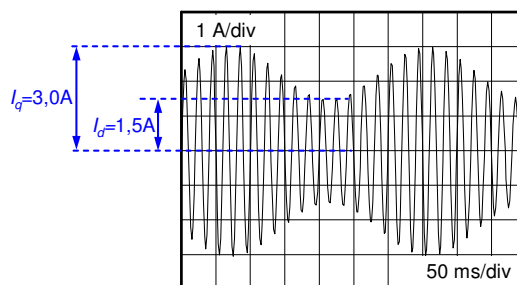
3.1 Statorsko navitje nevzbujenega trifaznega sinhronskega stroja z nazivnimi podatki 400 V, 5 kVA, 50 Hz, $\cos\varphi = 0,8$, 1500 vrt/min, priključimo na napetost 100 V. Z elektromotorjem poganjamo rotor, da se vrtili asinhrono in na osciloskopu opazujemo časovni potek statorskega toka ene faze.

Izračunajte absolutno ter relativno vrednost vzdolžne in prečne sinhronske reaktance. Določite hitrost vrtenja rotorja.



REŠITEV:

Pri metodi asinhronskega prostega teka sinhronskega stroja izračunamo sinhronski reaktanci enostavno kot impedanci, pri čemer vrednosti tokov v vzdolžni (I_d) in prečni legi (I_q) odčitamo iz oscilograma:



Pri izračunu reaktance je potrebno odčitani amplitudi toka seveda pretvoriti v efektivni vrednosti tokov, prav tako pa ne smemo pozabiti, da je napetost na katero je priključen stator podana kot medfazna napetost, pri izračunu reaktanc pa uporabimo vrednost fazne napetosti:

$$X_d = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot I_d} = \frac{100 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot 1,5} = \mathbf{54,43 \Omega}, \quad (1)$$

$$X_q = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot I_q} = \frac{100 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot 3,0} = \mathbf{27,22 \Omega}. \quad (2)$$

Relativna vrednost sinhronske reaktance predstavlja razmerje med padcem napetosti na reaktanci pri nazivnem toku stroja in nazivno napetostjo, tako da lahko zapišemo:

$$x_d = \frac{U_{X_d}}{U_n} = \frac{\sqrt{3} I_n X_d}{U_n}. \quad (3)$$

Če števec in imenovalc množimo z U_n dobimo:

$$x_d = \frac{\sqrt{3} U_n I_n X_d}{U_n^2} = \frac{S_n \cdot X_d}{U_n^2} = \frac{5000 \cdot 54,43}{400^2} = \mathbf{1,70}. \quad (4)$$

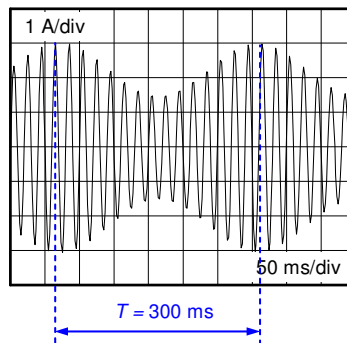
Relativno vrednost lahko izračunamo tudi kot razmerje absolutne sinhronske reaktance in osnovne impedance stroja Z_{osn} , ki znaša:

$$Z_{osn} = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{400^2}{5000} = 32 \Omega. \quad (5)$$

Tako izračunamo:

$$x_q = \frac{X_q}{Z_{osn}} = \frac{27,22}{32} = \mathbf{0,85}. \quad (6)$$

Vrtilno hitrost rotorja lahko izračunamo na podlagi oscilograma, saj vemo, da ravno asinhronska hitrost vrtenja rotorja povzroča spreminjanje amplitude toka. V času med dvema maksimuma oz. minimuma amplitude toka, se je rotor glede na vrtilno polje statorja zavrtel ravno za kot, kolikor znaša njegova polova delitev, saj so se magnetne (reluktančne) razmere v tem času ponovile.



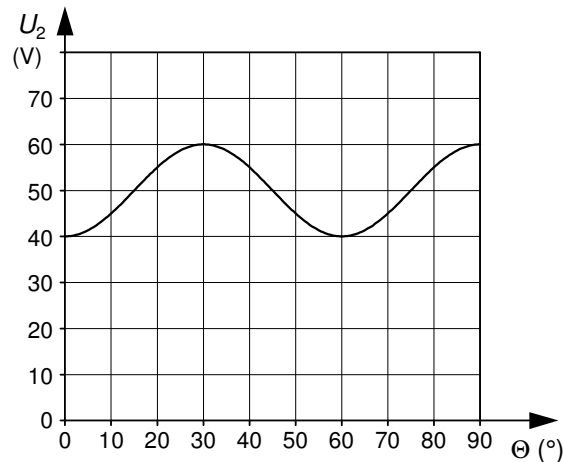
Če poznamo hitrost vrtilnega magnetnega polja, kar je pri sinhronskih strojih nazivna vrtilna hitrost, poznamo tudi število polov in s tem izgled rotorja z izraženimi poli. V našem primeru je nazivna hitrost 1500 min^{-1} , kar pomeni, da je stroj 4-polen ($2p = 4$). V omenjenem času se je torej rotor zavrtel glede na vrtilno magnetno polje za 90° , saj ima štiri izražene pole, ki so med seboj razmaknjeni ravno za ta kot. Ne vemo sicer ali je rotor prehitel ali zaostal za vrtilnim poljem, saj je časovni potek toka v obeh primerih enak. Ker poznamo čas T lahko izračunamo razliko hitrosti med rotorjem in vrtilnim poljem:

$$\Delta n = \frac{60}{2p \cdot T} = \frac{60}{2 \cdot 2 \cdot 0,300} = 50 \text{ min}^{-1}. \quad (7)$$

Ker ne vemo, ali se rotor vrtilni hitreje ali počasneje od vrtilnega polja lahko zapišemo le:

$$n_{rot} = n_s \pm \Delta n = 1500 \pm 50 = \mathbf{1550 \text{ oz. } 1450 \text{ min}^{-1}}. \quad (8)$$

3.2 Sinhronskemu stroju z izraženimi poli želimo izmeriti medsebojno induktivnost dveh faznih navitij. Pri mirujočem rotorju navitje ene faze napajamo s konstantnim izmeničnim tokom $I_1 = 10 \text{ A}$, $f = 50 \text{ Hz}$, pri čemer počasi spreminjamo položaj (kot) rotorja Θ in merimo efektivno inducirano napetost U_2 na navitju druge faze. Dobimo prikazani diagram.



Napišite matematični nastavek za medsebojno induktivnost $L_{12} = f(\Theta)$ v H ter določite nazivno vrtilno hitrost stroja.

REŠITEV:

V tem primeru merimo medsebojno induktivnost dveh navitij tako, da eno navitje napajamo z izmeničnim tokom (I_1), na drugem pa merimo izmenično inducirano napetost (U_2). Pri tem gre za transformirano inducirano napetost, ki je posledica izmeničnega magnetnega pretoka, ki ga ustvarja izmenični tok prvega navitja. Napišemo lahko enačbo za inducirano napetost:

$$U_2 = I_1 \cdot \omega L_{12}. \quad (1)$$

Medsebojna induktivnost L_{12} je torej:

$$L_{12} = \frac{U_2}{I_1 \cdot \omega}. \quad (2)$$

Ker je medsebojna induktivnost navitij odvisna od položaja (kota) rotorja, saj ima ta izražene pôle, je tudi izmerjena inducirana napetost U_2 funkcija kota Θ (glej diagram). Napetost v diagramu je seveda podana kot efektivna vrednost in na podlagi poteka krivulje zapišemo:

$$U_2 = 50 - 10 \cdot \cos(6 \cdot \Theta). \quad (3)$$

Če tako zapisano odvisnost napetosti od kota Θ vstavimo v enačbo (2) dobimo:

$$L_{12} = \frac{U_2(\Theta)}{I_1 \cdot \omega} = \frac{50 - 10 \cos(6 \Theta)}{10 \cdot 2\pi \cdot 50} = (15,92 - 3,18 \cos(6 \Theta)) \text{ mH}. \quad (4)$$

Ker se glede na potek inducirane napetosti razmere ponovijo pri premiku rotorja za 60° , lahko sklepamo, da je polova delitev $\tau_p = 60^\circ$. Število rotorskih polov je torej:

$$2p = \frac{360}{\tau_p} = \frac{360}{60} = 6. \quad (5)$$

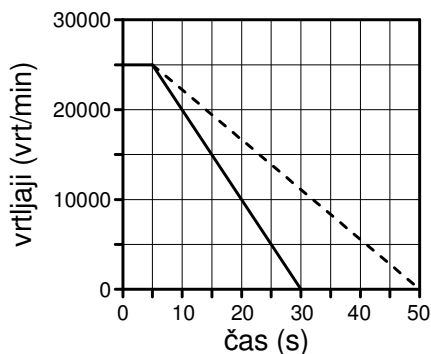
Nazivna hitrost 6-polnega ($p = 3$) sinhronskega stroja je:

$$n_n = n_s = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{3} = \mathbf{1000 \text{ min}^{-1}}. \quad (6)$$

4 Merjenje vztrajnostnega momenta z iztečnim preizkusom

4.1 Določite vztrajnostni moment rotorja serijskega enofaznega kolektorskega elektromotorja ter izračunajte moč trenja in ventilacije pri nazivnem obratovanju.

Nazivni podatki stroja so: $U_n = 230 \text{ V}$, $I_n = 7,7 \text{ A}$, $P_n = 1,5 \text{ kW}$, $n_n = 20000 \text{ vrt/min}$. Pri preizkusu prostega teka dobimo naslednje rezultate: $U_0 = 230 \text{ V}$, $I_0 = 3,1 \text{ A}$, $P_0 = 400 \text{ W}$ in $n_0 = 25000 \text{ vrt/min}$. Opravimo tudi dva iztečna preizkusa: pri prvem imamo v motorju le rotor, pri drugem pa na gred motorja pritrđimo valj z znanim vztrajnostnim momentom $J_{dod} = 0,001 \text{ kgm}^2$. Iztečni karakteristiki sta na sliki.



REŠITEV:

Pri izteku stroja je dinamični navor M_d po velikosti enak zavornemu navoru M_z . Lahko torej zapišemo:

$$-M_z = M_d = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}. \quad (1)$$

Zavornega navora žal ne moremo izračunati iz podatkov prostega teka, saj vrednosti posamičnih izgub (P_{Cu} , P_{Fe} in P_{tv}) ne moremo ločiti. Vemo pa, da je bil zavorni navor v obeh iztečnih preizkusih enak, saj se je spremenil le vztrajnostni moment rotirajočih mas. Upoštevajoč (1) lahko zapišemo:

$$M_{d1} = M_{d2} = J_r \frac{d\omega_1}{dt_1} = (J_r + J_{dod}) \frac{d\omega_2}{dt_2}. \quad (2)$$

Ker je iztečna krivulja v obeh primerih linearna, je tudi pojemek $d\omega/dt$ v obeh primerih konstanten in lahko zapišemo:

$$J_r \frac{\Delta n_1}{\Delta t_1} = (J_r + J_{dod}) \frac{\Delta n_2}{\Delta t_2}. \quad (3)$$

Iz diagrama odčitamo $\Delta n_1 = \Delta n_2 = n_0 = 25000 \text{ min}^{-1}$, $\Delta t_1 = 25 \text{ s}$, $\Delta t_2 = 45 \text{ s}$. Iztečni čas je daljši v primeru večjega vztrajnostnega momenta, torej takrat, ko je bil na rotor pritrjen valj. S preureditvijo enačbe (3) izračunamo vztrajnostni moment rotorja:

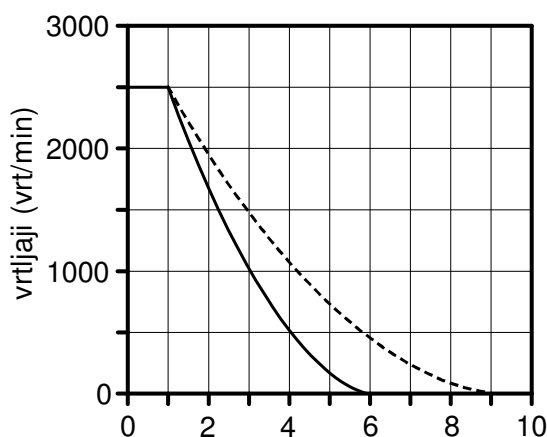
$$J_r = J_{dod} \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2 - \Delta t_1} = 0,001 \frac{25}{45 - 25} = \mathbf{0,00125 \text{ kgm}^2}. \quad (4)$$

Z znanim vztrajnostnim momentom rotorja izračunamo še izgube trenja in ventilacije pri nazivnem obratovanju. Ravno te izgube predstavljajo zavorno moč pri izteku, zato velja:

$$P_{tv} = P_z = M_z \omega_n = J_r \frac{2\pi}{60} \frac{\Delta n_1}{\Delta t_1} \cdot 2\pi \cdot \frac{n_n}{60} = 0,00125 \frac{2\pi}{60} \frac{25000}{25} \cdot 2\pi \cdot \frac{20000}{60} = \mathbf{274,2 \text{ W}}. \quad (5)$$

- 4.2 Nazivni podatki enosmernega kolektorskega elektromotorja s tujim vzbujanjem so: $U_n = 230 \text{ V}$, $I_n = 7,7 \text{ A}$, $P_n = 1,5 \text{ kW}$, $n_n = 2000 \text{ vrt/min}$, $U_{vzb-n} = 220 \text{ V}$. Pri preizkusu prostega teka pri nazivnih vrtljajih dobimo naslednje rezultate: $U_{rot} = 180 \text{ V}$, $I_{rot} = 3 \text{ A}$, $U_{vzb} = 220 \text{ V}$, $I_{vzb} = 0,5 \text{ A}$. Opravimo tudi dva iztečna preizkusa: pri prvem pustimo vzbujalno navitje vključeno (polno izvlečena krivulja), pri drugem pa izključimo tako rotorsko kot statorsko navitje (črtkana krivulja). Upornost rotorskega navitja je $R_{rot} = 5 \Omega$, padec na ščetkah pa $\Delta U_{šč} = 2 \text{ V}$.

Določite izgube v železu pri nazivnem obratovanju.



REŠITEV:

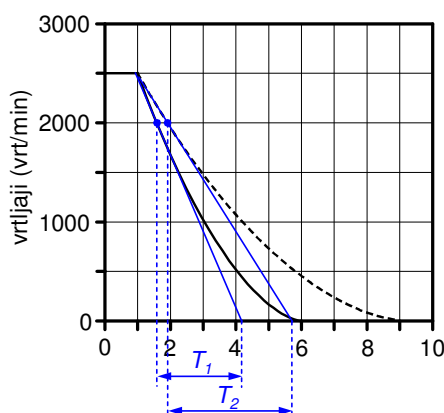
V prvem primeru, ko je vzbujalno navitje vključeno, zavorno moč predstavljajo izgube trenja in ventilacije ter izgube v železu, v drugem primeru pa le izgube trenja in ventilacije. Izgube v železu so torej razlika zavornih izgub:

$$P_{Fe} = P_{z1} - P_{z2}. \quad (1)$$

Pri izteku je zavorni navor enak dinamičnemu, zato lahko za prvi primer zapišemo:

$$M_{z1} = M_{d1} = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} = J \frac{2\pi}{60} \frac{n_n}{T_1}, \quad (2)$$

pri čemer čas $T_1 = 2,6 \text{ s}$ določimo s pomočjo tangente na iztečno krivuljo pri $n = n_n = 2000 \text{ min}^{-1}$.



Vztrajnostni moment rotirajočih mas je tako:

$$J = \frac{M_{z1} \cdot 60 \cdot T_1}{2\pi \cdot n_n}. \quad (3)$$

Zavorno moč, oz. zavorni navor pri nazivnih vrtljajih izračunamo iz podatkov preizkusa prostega teka. Ker električna moč, ki krije tudi zavorne izgube, priteka le v rotorski tokokrog, lahko zapišemo:

$$P_{z1} = P_{0-r} - P_{Cu-r} - P_{šč} = U_{rot} I_{rot} - I_{rot}^2 R_{rot} - I_{rot} \Delta U_{šč} = 180 \cdot 3 - 3^2 \cdot 5 - 3 \cdot 2 = 489 \text{ W}. \quad (4)$$

Zavorni navor (pri $n = n_n$) je tako:

$$M_{z1} = \frac{P_z}{\omega_n} = \frac{P_{z1} \cdot 60}{2\pi \cdot n_n}. \quad (5)$$

Ker je vztrajnostni moment rotirajočih mas v obeh primerih enak, lahko upoštevajoč enačbo (3) zapišemo:

$$M_{z1} \cdot T_1 = M_{z2} \cdot T_2. \quad (6)$$

Na podlagi enačb (5) in (6) lahko izračunamo zavorno moč P_{z2} :

$$P_{z2} = P_{z1} \frac{T_1}{T_2} = 489 \frac{2,6}{3,8} = 335 \text{ W}, \quad (7)$$

pri čemer je $T_2 = 3,8$ s določen grafično iz iztečne krivulje drugega primera.

Zavorne izgube obeh iztekov so znane in po enačbi (1) izračunamo izgube v železu pri nazivnem obratovanju:

$$P_{Fe} = P_{z1} - P_{z2} = 489 - 335 = \mathbf{154 \text{ W}}. \quad (8)$$

- 4.3 (Analitično)** Izmenični kolektorski motor s serijskim vzbujanjem in nazivnimi podatki $U_n = 230 \text{ V}$, $I_n = 12 \text{ A}$, $P_n = 2 \text{ kW}$, $n_n = 10\,000 \text{ vrt/min}$, ima vztrajnostni moment rotorja $J_R = 0,01 \text{ kgm}^2$. Izmerjena je bila iztečna karakteristika motorja v prostem teku, katere potek lahko matematično zapišemo z enačbo $n(t) = 5(t - 50)^2$ [vrt/min] za čase $0 \leq t \leq 50 \text{ s}$.

Kolikšna je zavorna moč pri nazivnih vrtljajih motorja?

REŠITEV:

Za izračun zavorne moči potrebujemo zavorni navor pri nazivnih vrtljajih. Ker je pri izteku stroja dinamični navor po velikosti enak zavornemu, lahko zapišemo:

$$M_z = M_d = J_R \frac{d\omega}{dt} = J_R \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}. \quad (1)$$

Zanima nas zavorni navor pri nazivni vrtilni hitrosti, zato izračunamo odvod vrtilne hitrosti pri $n = n_n$.

$$\frac{dn}{dt} = 10(t - 50). \quad (2)$$

Zavorna moč je $P_z = M_z \omega_n$, zato enačbo (2) vstavimo v enačbo (1) in zapišemo:

$$P_z = J_R \frac{2\pi}{60} \cdot 10(t - 50) \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60}. \quad (3)$$

Izračunamo še čas po izključitvi stroja, ko vrtilna hitrost pade do n_n :

$$10000 = 5(t - 50)^2. \quad (4)$$

Po rešitvi kvadratične enačbe dobimo $t = 5,28 \text{ s}$, tako da zavorna moč znaša:

$$P_z = J_R \frac{2\pi}{60} \cdot 10(t - 50) \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} = 0,01 \frac{2\pi}{60} \cdot 10(5,28 - 50) \cdot \frac{2\pi \cdot 10000}{60} = \mathbf{-490 \text{ W}}. \quad (5)$$

Negativni predznak dobimo samo zato, ker v enačbi (1) nismo upoštevali, da imata dinamični in zavorni navor nasproten predznak. Ker nas zanimajo le velikosti, lahko tudi pri izračunani zavorni moči predznak zanemarimo.

- 4.4** Trifaznemu asinhronskemu motorju z nazivnimi podatki: 5 kW, 400 V, 11 A, 1450 min⁻¹ je bila z iztečnim preizkusom določena zavorna moč pri nazivnih vrtljajih, ki znaša 350 W. Pri izklopu nazivno obremenjenega motorja z omrežja se rotor ($J_r = 0,15 \text{ kgm}^2$) ustavlja po linearni iztečni krivulji. Ker je čas izteka predolg, dodamo na rotor torno zavoro, katere vztrajnostni moment znaša $J_z = 0,05 \text{ kgm}^2$.

Izračunajte potrebni navor zavore, da se bo rotor ustavil v 1 s.

REŠITEV:

Če želimo, da se stroj po izklopu napajanja ustavi prej, moramo povečati zavorno moč oziroma zavorni navor. Ker ima stroj linearno iztečno krivuljo, pomeni, da je zavorni navor neodvisen od hitrosti, torej konstanten. Zavorni navor pri izteku brez zavore izračunamo iz znane zavorne moči:

$$M_{z1} = \frac{P_{z1}}{\omega_n} = \frac{P_{z1} \cdot 60}{2\pi \cdot n_n} = \frac{350 \cdot 60}{2\pi \cdot 1450} = 2,31 \text{ Nm} . \quad (1)$$

Pri izteku stroja je zavorni navor enak dinamičnemu, zato zapišemo:

$$M_z = M_d = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} = J \frac{2\pi}{60} \frac{\Delta n}{\Delta t} . \quad (2)$$

Sedaj izračunamo potrebni zavorni navor, da se bo rotor ustavil v $\Delta t = 1 \text{ s}$:

$$M_{z2} = J \frac{2\pi}{60} \frac{\Delta n}{\Delta t} = (J_r + J_z) \frac{2\pi}{60} \frac{n_n}{\Delta t} = (0,15 + 0,05) \frac{2\pi}{60} \frac{1450}{1} = 30,4 \text{ Nm} , \quad (3)$$

pri čemer smo upoštevali povečanje vztrajnostnega momenta rotirajočih mas, pa tudi dejstvo, da je tudi navor torne zavore neodvisen od hitrosti in zato konstanten. Potrebni dodatni navor zavore je torej:

$$M_{zav} = M_{z2} - M_{z1} = 30,4 - 2,31 = \mathbf{28,1 \text{ Nm}} . \quad (4)$$

- 4.5** Trifaznemu asinhronskemu motorju z nazivnimi podatki: $U_n = 400 \text{ V}$, $I_n = 12 \text{ A}$, $P_n = 6 \text{ kW}$, $\cos\varphi_n = 0,83$, $n_n = 2900 \text{ vrt/min}$, smo izmerili izgube trenja in ventilacije, ki v prostem teku ($n \approx n_s$) znašajo $P_{tr,v} = 60 \text{ W}$. V prostem teku je bila izmerjena tudi iztečna karakteristika stroja, katere potek smo aproksimirali s enačbo $n(t) = 2t^2 - 160t + 3000$ [vrt/min], ki velja za čase do 30 s.

Izračunajte:

- vztrajnostni moment rotirajočih mas,
- zavorni navor zaradi trenja in ventilacije pri nazivnem obratovanju motorja,
- čas izteka motorja iz prostega teka, če bi bil zavorni navor konstanten $M_z = 0,5 \text{ Nm}$.

REŠITEV:

a) Vztrajnostni moment določimo s pomočjo iztečnega preizkusa. Podano imamo enačbo iztečne krivulje in ker izhajamo iz dejstva, da je ob izteku stroja dinamični navor po velikosti enak zavornemu lahko zapišemo:

$$M_z + M_d = 0 \rightarrow M_z = -M_d = -J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (1)$$

Zavorni navor izračunamo iz izgub trenja in ventilacije, saj ta moč predstavlja zavorno moč pri izteku stroja. V prostem teku, pri katerem so bile izmerjene te izgube, se je rotor vrtel skoraj s sinhronskimi vrtljaji, zato ne naredimo velike napake, če pri izračunu vzamemo kar sinhronsko hitrost. Iz podatka o nazivni vrtilni hitrosti lahko določimo sinhronsko hitrost $n_s = 3000 \text{ vrt/min}$ in izračunamo:

$$M_z = \frac{P_z}{\omega_s} = \frac{P_z \cdot 60}{2\pi \cdot n_s} = \frac{60 \cdot 60}{2\pi \cdot 3000} = 0,19098 \text{ Nm}. \quad (2)$$

Ker sta zavorna moč in navor podana za prosti tek (sinhronska hitrost) moramo pri isti hitrosti poiskati tudi odvod vrtilne hitrosti. Če pogledamo enačbo iztečne krivulje, vidimo, da ima rotor hitrost 3000 vrt/min ravno v času $t = 0$. V kolikor to ni razvidno rešimo enačbo za zelene vrtljaje, npr.:

$$3000 = 2t^2 - 160t + 3000. \quad (3)$$

Rešitvi sta dve: $t_1 = 0$ in $t_2 = 80$, a le prva je v definicijskem območju funkcije ($t < 30 \text{ s}$). Poiščimo torej vrednost odvoda pri času $t = 0$:

$$\frac{dn}{dt} = 4t - 160 \rightarrow \left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0} = 4 \cdot 0 - 160 = -160. \quad (4)$$

Če sedaj dobljeno vstavimo v enačbo (1) lahko izračunamo vztrajnostni moment:

$$J = -\frac{M_z \cdot 60}{2\pi \cdot \frac{dn}{dt}} = -\frac{0,19098 \cdot 60}{2\pi \cdot (-160)} = \mathbf{0,01140 \text{ kg m}^2}. \quad (5)$$

b) Da bi izračunali zavorno moč pri nazivnih vrtljajih uporabimo enačbo (1), le da tokrat vztrajnostni moment že poznamo, odvod iztečne krivulje pri nazivnih vrtljajih pa moramo še poiskati. Ker je iztečna krivulja podana s časovno funkcijo, poiščimo pri katerem času vrtljaji padejo na vrednost nazivnih:

$$2900 = 2t^2 - 160t + 3000. \quad (6)$$

Rešitvi sta dve $t_1 = 0,630 \text{ s}$ in $t_2 = 79,370$, a uporabimo prvo, ker je v definicijskem območju iztečne krivulje, tako da znaša zavorni navor:

$$M_z = -J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0,63} = -0,01140 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot (4 \cdot 0,63 - 160) = \mathbf{0,1895 \text{ Nm}}. \quad (7)$$

c) Če bi bil zavorni navor med iztekom konstanten, bi bil tak tudi odvod vrtilne hitrosti (pri izteku gre za pojemek):

$$M_z = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} \rightarrow \frac{dn}{dt} = \frac{M_z \cdot 60}{2\pi} = \frac{0,5 \cdot 60}{2\pi} = 418,828 \frac{\text{vrt}}{\text{s}}. \quad (8)$$

Odvod v takem primeru lahko zapišemo z diferenciali in poiščemo iskani čas izteka:

$$\frac{\Delta n}{\Delta t} = 418,828 \frac{\text{vrt}}{\text{s}} \rightarrow \Delta t = \frac{\Delta n}{418,828} = \frac{n_s}{418,828} = \frac{3000}{418,828} = \mathbf{7,163 \text{ s}}. \quad (9)$$

5 Nadomestno vezje asinhronskega motorja

5.1 Poznamo enofazno nadomestno shemo trifaznega asinhronskega motorja z nazivnimi podatki 380 V, 1,5 kW, 1410 vrt/min, $\cos\varphi = 0,85$. Elementi nadomestne sheme so bili določeni s preizkusoma prostega teka in kratkega stika:

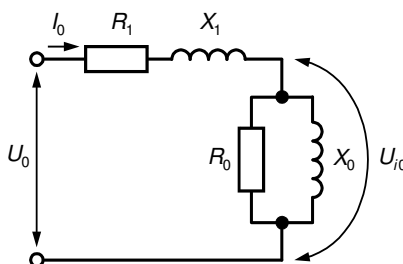
$$R_1 = 6 \Omega, X_1 = 8 \Omega, R_2' = 4 \Omega, X_2' = 8 \Omega, R_0 = 2000 \Omega, X_0 = 200 \Omega$$

a) Kolikšne so največje izgube v železu tega motorja?

b) Motor je priključen na nazivno omrežje. V katerem obratovalnem stanju motorja bodo izgube v bakru največje in kolikšne so?

REŠITEV:

a) Izgube v železu so največje takrat, ko je asinhronski motor v prostem teku, tok je takrat najmanjši zato so padci napetosti na upornosti navitja in stresanih reaktancah najmanjši, posledično je inducirana napetost najvišja, kar pomeni največji magnetni pretok v železnem jedru stroja in s tem največje izgube v železu. Pri nadomestnem vezju asinhronskega stroja v prostem teku lahko zaradi skoraj sinhronske vrtilne hitrosti rotorja ($s \approx 0$) zanemarimo rotorsko vejo (R_2', X_2').



Ker so v nadomestnem vezju izgube v železu predstavljene z močjo na upor R_0 , so celotne izgube v železu v stroju:

$$P_{Fe0} = 3 \cdot \frac{|U_{i0}|^2}{R_0}. \quad (1)$$

Izračunati je torej potrebno napetost na upor, ki je pravzaprav inducirana napetost U_{i0} . Napetost U_{i0} dobimo, če od priključene nazivne napetosti odštejemo padca napetosti na R_1 in X_1 . Za izračun teh padcev potrebujemo tok prostega teka, tega pa izračunamo s pomočjo nazivne napetosti in impedance prostega teka:

$$I_0 = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_0}. \quad (2)$$

Impedanco Z_0 izračunamo iz elementov nadomestnega vezja:

$$Z_0 = R_1 + jX_1 + \frac{R_0 \cdot jX_0}{R_0 + jX_0} = (25,8 + j206,0) \Omega. \quad (3)$$

Tok prostega teka je tako:

$$I_0 = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_0} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot (25,8 + j206,0)} = (0,131 - j1,049) \text{ A}. \quad (4)$$

Napetost U_{i0} na uporu R_0 je:

$$\begin{aligned} |U_{i0}| &= \left| \frac{U_n}{\sqrt{3}} - I_0(R_1 + jX_1) \right| = \left| \frac{380}{\sqrt{3}} - (0,131 - j1,049)(6 + j8) \right| = \\ &= |210,22 + j5,264| = 210,28 \text{ V} \end{aligned} \quad (5)$$

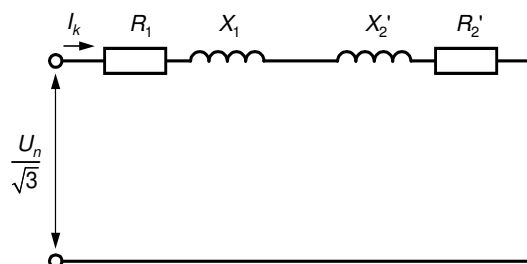
Tako so izgube v železu stroja:

$$P_{Fe0} = 3 \cdot \frac{|U_{i0}|^2}{R_0} = 3 \cdot \frac{210,28^2}{2000} = \mathbf{66,3 \text{ W}}. \quad (6)$$

b) Izgube v bakru bodo največje takrat, ko bo v navitjih tekel največji tok, saj so te izgube določene z enačbo PR . Obratovavno stanje, pri katerem je tok v navitjih največji, je kratek stik motorja. Kratkotrajno stanje kratkega stika pa je tudi zagon motorja, saj rotor v trenutku vklopa miruje. Izračunati moramo torej tok kratkega stika pri nazivni napetosti:

$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|}. \quad (7)$$

Kratkostično impedanco Z_k dobimo iz elementov nadomestnega vezja, pri čemer lahko v kratkem stiku zanemarimo prečno vejo z elementoma R_0 in X_0 :



$$Z_k = (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2') = (6 + 4) + j(8 + 8) = (10 + j16) \Omega, \quad (8)$$

$$|Z_k| = \sqrt{10^2 + 16^2} = 18,868 \Omega. \quad (9)$$

Kratkostični tok tako znaša:

$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 18,868} = 11,63 \text{ A}. \quad (10)$$

Glede na to, da imamo opravka z enofaznim nadomestnim vezjem, so celotne izgube v navitjih stroja trikratnik izgub posamezne faze:

$$P_{Cuk} = 3 \cdot I_k^2 \cdot (R_1 + R_2') = 3 \cdot 11,63^2 \cdot (6 + 4) = \mathbf{4056 \text{ W}}. \quad (11)$$

5.2 Poznamo enofazno nadomestno shemo trifaznega asinhronskega motorja z nazivnimi podatki 400V, 50Hz, 1410 min⁻¹. Elemente nadomestne sheme smo določili s preizkusoma prostega teka in kratkega stika:

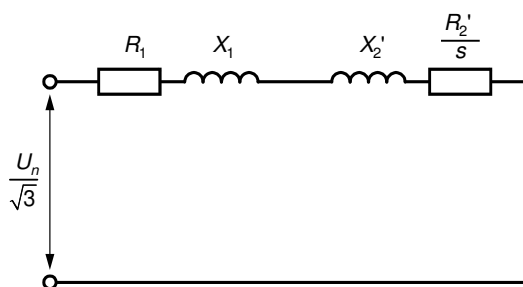
$$R_1 = 6 \, \Omega, X_1 = 10 \, \Omega, R_2' = 3 \, \Omega, X_2' = 10 \, \Omega, R_0 = 2000 \, \Omega, X_0 = 200 \, \Omega.$$

S pomočjo nadomestne sheme, pri kateri zanemarite prečno vejo, izračunajte naslednje nazivne podatke motorja: tok, moč in izkoristek.

(Neupoštevanje prečne veje nima nikakršnega fizikalnega ozadja, temveč naredimo to le zaradi lažjega računanja.)

REŠITEV:

Nadomestno vezje samo zaradi lažjega računanja poenostavimo in sedaj izgleda tako:



Ker je rotorski element upornosti določen kot R_2'/s , najprej izračunamo nazivni slip. Iz podatka o nazivni vrtilni hitrosti lahko ugotovimo, da je stroj 4-polen ($2p = 4$), kar pomeni, da je njegova sinhronska vrtilna hitrost 1500 min⁻¹.

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0,06. \quad (1)$$

S pomočjo impedance nadomestnega vezja lahko izračunamo nazivni tok:

$$Z = \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_n} \right) + j(X_1 + X_2') = \left(6 + \frac{3}{0,06} \right) + j(10 + 10) = (56 + j20) \, \Omega. \quad (2)$$

$$I_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z|} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot |56 + j20|} = \mathbf{3,884 \, A}. \quad (3)$$

Moč, ki se v nadomestnem vezju troši na upornosti R_2'/s je vsota izgub v navitju rotorja in oddane mehanske moči:

$$P_{rot} = I_n^2 \cdot \frac{R_2'}{s_n} = 3,884^2 \cdot \frac{3}{0,06} = 754,27 \, \text{W}. \quad (4)$$

Iz te moči izločimo mehansko moč:

$$P_{meh} = P_{rot}(1 - s_n) = 754,27(1 - 0,06) = 709,01 \, \text{W}. \quad (5)$$

Ker izračunana moč predstavlja mehansko moč ene faze, je nazivna moč motorja 3-krat večja:

$$P_n = 3 \cdot P_{meh} = 3 \cdot 709,01 = \mathbf{2127 \, W}, \quad (6)$$

Če želimo izračunati še nazivni izkoristek stroja, moramo poznati celotno delovno moč, ki teče v stroj (oziroma nadomestno vezje):

$$P_1 = 3 \cdot I^2 \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_n} \right) = 3 \cdot 3,884^2 \left(6 + \frac{3}{0,06} \right) = 2534 \, \text{W}. \quad (7)$$

Ker je izkoristek stroja razmerje med oddano in prejeto delovno močjo, je torej izkoristek motorja pri nazivnem obratovanju:

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_1} = \frac{2127}{2534} = \mathbf{0,839} \quad (8)$$

6 Enosmerni generator s paralelnim vzbujanjem

- 6.1 (Analitično)** Enosmerni paralelni generator ima v prostem teku pri nazivnih vrtljajih $n_n = 1200$ vrt/min napetost na sponkah 130 V. Karakteristika prostega teka generatorja, izmerjena pri teh vrtljajih, je podana z izrazom (za tok 0 do 5A):

$$E_A = \frac{150I_1}{0,4 + I_1} + 15 \quad (\text{V}).$$

Na kolikšno napetost se bo stroj samovzbudil v prostem teku, če bomo zmanjšali hitrost vrtenja na polovico? Upornost rotorskega navitja je 3Ω , upornost ščetk pa zanemarite.

REŠITEV:

Pri generatorju s paralelnim vzbujanjem teče skozi rotorsko navitje tok tudi v prostem teku, saj je na rotorsko napetost priključeno vzbujalno navitje. Tako je izmerjena napetost na sponkah manjša od inducirane in sicer za padca napetosti na rotorski upornosti in ščetkah:

$$U_A = E_A - I_A R_A - \Delta U_{\text{šč}}. \quad (1)$$

Če padec na ščetkah zanemarimo, za inducirano napetost pa vpišemo podano karakteristiko dobimo:

$$U_A = \frac{150I}{0,4 + I} + 15 - I \cdot R_A. \quad (2)$$

Toka skozi rotorsko in vzbujalno navitje sta v prostem teku generatorja enaka, zato velja $I_A = I_1 = I$. Če v enačbo (2) vstavimo znane podatke, lahko izračunamo tok v prostem teku:

$$130 = \frac{150I}{0,4 + I} + 15 - I \cdot 3. \quad (3)$$

Rešitev kvadratične enačbe (3), ki ustreza definicijskemu območju karakteristike prostega teka je $I = 1,584$ A. Ker je stacionarno stanje generatorja s paralelnim vzbujanjem določeno s presečiščem uporovne premice ($R_A + R_1$) in karakteristike prostega teka $E_A = f(I_A)$, najprej izračunamo upornost vzbujalnega navitja:

$$R_1 = \frac{U_A}{I} = \frac{130}{1,584} = 82,07 \Omega. \quad (4)$$

Za novo obratovalno stanje pri polovični vrtilni hitrosti zapišemo napetostno enačbo, pri čemer upoštevamo, da je inducirana napetost sorazmerna vrtilni hitrosti in zato vzamemo polovično vrednost inducirane napetosti, ki jo podaja karakteristika prostega teka:

$$I(R_A + R_1) = 0,5 \cdot E_A(I), \quad (5)$$

$$I(3 + 82,07) = 0,5 \left(\frac{150I}{0,4 + I} + 15 \right). \quad (6)$$

Pozitivna rešitev kvadratične enačbe (6) je $I = 0,626$ A, tako da je napetost na sponkah generatorja:

$$U_A = I \cdot R_1 = 0,626 \cdot 82,07 = \mathbf{51,4 \text{ V}}. \quad (7)$$

- 6.2 (Analitično)** Enosmerni paralelni generator ima v prostem teku pri nazivnih vrtljajih $n_n = 1200$ vrt/min napetost na sponkah 130 V. Karakteristika prostega teka generatorja, izmerjena pri teh vrtljajih, je podana z izrazom (za tok 0 do 5 A):

$$E_A = \frac{150I_1}{0,4 + I_1} + 15 \quad (\text{V}).$$

Kolikšna je upornost rotorskega navitja, če je upornost vzbujalnega navitja 82Ω , padec napetosti na ščetkah pa 2 V.

REŠITEV:

Pri generatorju s paralelnim vzbujanjem teče skozi rotorsko navitje tok tudi v prostem teku, saj je na rotorsko napetost priključeno vzbujalno navitje. Tako je izmerjena napetost na sponkah manjša od inducirane in sicer za padca napetosti na rotorski upornosti in ščetkah:

$$U_A = E_A - I_A R_A - \Delta U_{\check{c}}. \quad (1)$$

Da bi lahko izračunali upornost rotorskega navitja R_A , moramo torej poznati tok skozi rotorsko navitje. Ker je podana upornost vzbujalnega navitja ter napetost na sponkah generatorja, na obeh pa je napetost ista, lahko tok enostavno izračunamo:

$$I = \frac{U_A}{R_1} = \frac{130}{82} = 1,585 \text{ A}. \quad (2)$$

Toka skozi rotorsko in vzbujalno navitje sta v prostem teku generatorja enaka, zato velja $I_A = I_1 = I$. Z znanim tokom lahko sedaj izračunamo inducirano napetost:

$$E_A = \frac{150I}{0,4 + I} + 15 = \frac{150 \cdot 1,585}{0,4 + 1,585} + 15 = 134,77 \text{ V}. \quad (3)$$

Če v enačbo (1) vstavimo vse znane podatke, lahko izračunamo padec napetosti na rotorski upornosti in seveda rotorsko upornost:

$$R_A = \frac{E_A - \Delta U_{\check{c}} - U_A}{I} = \frac{134,77 - 2 - 130}{1,585} = 1,75 \Omega. \quad (4)$$

- 6.3 (Analitično)** Enosmerni paralelni generator daje pri nazivnih vrtljajih $n_n = 1200$ vrt/min napetost prostega teka 130 V. Na kolikšno napetost se bo stroj samovzbudil, če bomo povečali hitrost vrtenja za 20%? Karakteristika prostega teka generatorja, izmerjena pri $n = 1000$ vrt/min, je podana enačbo:

$$E_A = \frac{130I_1}{0,4 + I_1} + 10 \quad (\text{V}).$$

Padca napetosti na rotorskem navitju in ščetkah zanemarite.

REŠITEV:

Ker padca napetosti na rotorskem navitju in ščetkah zanemarimo, je napetost na sponkah generatorja enaka inducirani in lahko zapišemo:

$$130 = \frac{1200}{1000} \left(\frac{130I_1}{0,4 + I_1} + 10 \right), \quad (1)$$

pri čemer smo karakteristiko prostega teka $E_A(I_1)$, zaradi višje hitrosti vrtenja (1200 vrt/min), ustrezno korigirali. Rešitev enačbe (1) nam da tok I_1 , s pomočjo katerega izračunamo še upornost vzbujalnega navitja R_1 :

$$I_1 = 1,242 \text{ A}, \quad (2)$$

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{130}{1,242} = 104,66 \Omega. \quad (3)$$

Pri 20% višji vrtilni hitrosti od nazivne, torej pri $n = 1,2 n_n = 1440$ vrt/min velja:

$$E_A = U_1 = I_1 R_1 = \frac{1440}{1000} \left(\frac{130I_1}{0,4 + I_1} + 10 \right). \quad (4)$$

Po rešitvi kvadratične enačbe (4) dobimo:

$$I_1 = 1,561 \text{ A}, \quad (5)$$

tako da je napetost na sponkah pri tej hitrosti:

$$U_1 = I_1 R_1 = 1,561 \cdot 104,66 = \mathbf{163,42 \text{ V}}. \quad (6)$$

- 6.4 (Analitično)** Enosmerni paralelno vzbujan generator ima v prostem teku pri nazivnih vrtljajih $n_n = 1200$ vrt/min napetost na sponkah 120 V. Karakteristika prostega teka generatorja, izmerjena pri teh vrtljajih, je za vzbujalni tok $0 \leq I_1 \leq 5$ A podana z izrazom:

$$E = \frac{150 I_1}{0,4 + I_1} + 15 \quad (\text{V})$$

Na kolikšno napetost se bo stroj samovzbudil v prostem teku, če bomo zmanjšali hitrost vrtenja na polovico? Upornost rotorskega navitja je 3Ω , padec napetosti na ščetkah pa $\Delta U_{\text{šč}} = 1,5$ V.

REŠITEV:

Pri generatorju s paralelnim vzbujanjem teče skozi rotorsko navitje tok tudi v prostem teku, saj je na rotorsko napetost priključeno vzbujalno navitje. Tako je izmerjena napetost na sponkah manjša od inducirane in sicer za padca napetosti na rotorski upornosti in ščetkah:

$$U_A = E_A - I_A R_A - \Delta U_{\text{šč}}. \quad (1)$$

Da bi lahko izračunali napetost pri drugačni vrtilni hitrosti moramo poznati obe upornosti navitij. Z enačbo (1) najprej poiščemo tok $I = I_A = I_1$ s katerim bomo izračunali upornost vzbujalnega navitja:

$$120 = \frac{150 I}{0,4 + I} + 15 - I \cdot 3 - 1,5. \quad (2)$$

Rešitev kvadratične enačbe (2) nam da:

$$I = 1,0916 \text{ A}, \quad (3)$$

tako da je upornost vzbujalnega navitja:

$$R_1 = \frac{U_1}{I} = \frac{120}{1,0916} = 109,93 \Omega. \quad (4)$$

Ker poznamo obe upornosti lahko s pomočjo enačbe (1) izračunamo novo delovno točko samovzbujanja pri polovični vrtilni hitrosti:

$$I \cdot R_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{150 I}{0,4 + I} + 15 \right) - I \cdot R_A - \Delta U_{\text{šč}} \quad (5)$$

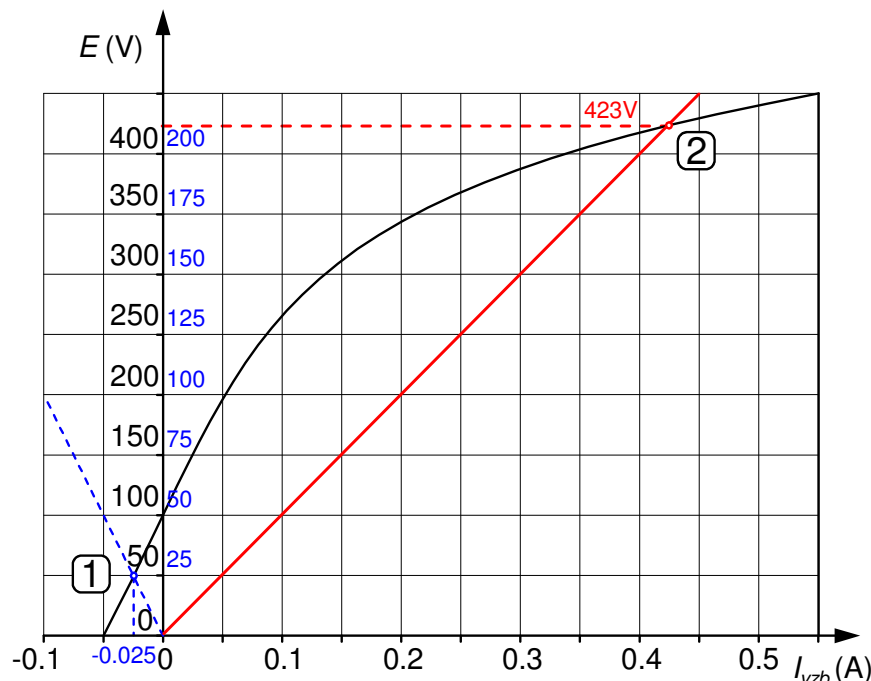
$$I \cdot 109,93 = \frac{1}{2} \left(\frac{150 I}{0,4 + I} + 15 \right) - I \cdot 3 - 1,5$$

Rešitev enačbe (5) je $I = 0,374$ A, tako da je napetost na sponkah generatorja:

$$U_1 = I R_1 = 0,374 \cdot 109,93 = \mathbf{41,12 \text{ V}}. \quad (6)$$

- 6.5** Enosmerni kolektorski generator s paralelnim vzbujanjem ima podano karakteristiko prostega teka pri nazivnih vrtljajih $n_n = 1000$ vrt/min. Po priključitvi vzbujalnega navitja na rotorske sponke, smo v prostem teku pri polovični nazivni hitrosti ($n = 500$ vrt/min) dobili na rotorskih sponkah napetost $U_A = 25$ V.

Na kolikšno napetost se generator samovzbudi pri nazivnih vrtljajih, če zamenjamo sponki vzbujalnega navitja? Upornost rotorskega tokokroga zanemarite.



REŠITEV:

Ker upornost rotorskega navitja zanemarimo, predstavlja karakteristika praznega teka kar napetost na sponkah generatorja pri različnih vzbujalnih tokih. Iz enačbe za inducirano napetost kolektorskega stroja:

$$E = k \cdot \Phi \cdot n \quad (1)$$

vidimo, da je inducirana napetost pri istem vzbujalnem toku (oz. vzbujalnemu fluksu) sorazmerna vrtilni hitrosti, zato je inducirana napetost pri polovični vrtilni hitrosti, za polovico manjša. Da se izognemo risanju druge karakteristike lahko le spremenimo skalo (manjše številke).

Ker je inducirana napetost generatorja s paralelnim vzbujanjem v stacionarnem stanju enaka vsem padcem napetosti v tokokrogu, določa delovno točko ravno presečišče KPT in uporovne premice. Podatek, da je napetost na sponkah 25V, določa tako točko, vendar se ta nahaja pri negativnem vzbujalnem toku, kar pomeni, da je generator v tako imenovani samomorilni vezavi. Iz diagrama lahko določimo tok v tej delovni točki (črtkana krivulja), ki znaša $I_{vzb} = 0,025$ A, kar pomeni, da je upornost vzbujalnega tokokroga (edina upornost, ki jo v našem primeru upoštevamo):

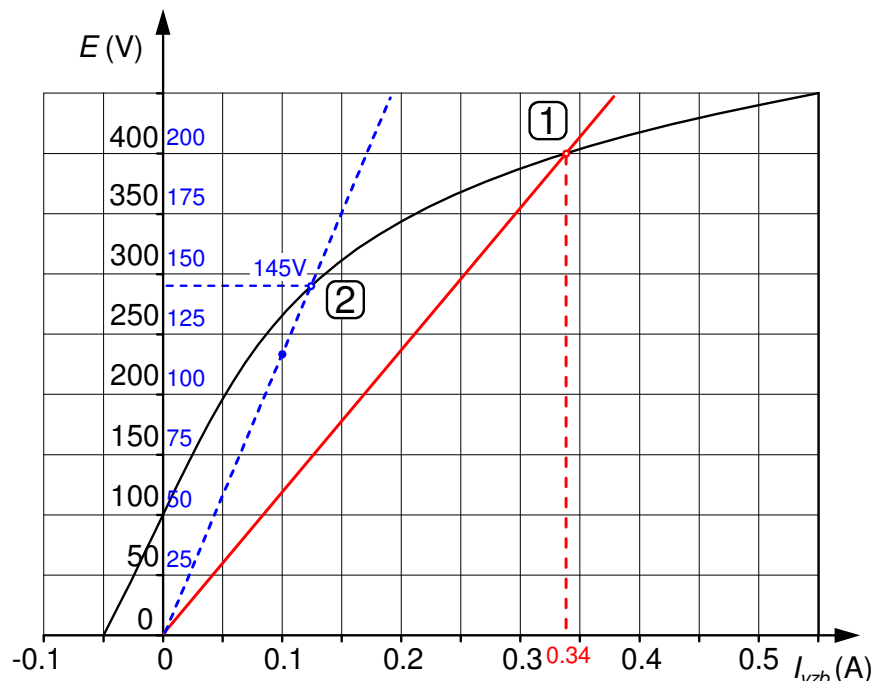
$$R_{vzb} = \frac{E}{I_{vzb}} = \frac{25}{0,025} = 1000 \, \Omega. \quad (2)$$

Če zamenjamo sponki, bo generator deloval v normalnem režimu, zato iskano napetost pri nazivni hitrosti dobimo tako, da poiščemo novo presečišče uporovne premice ($1000 \, \Omega$) s KPT. Ker se stroj vrti z nazivnimi vrtljaji, upoštevamo originalno KPT, tako da dobimo:

$$U = E = 423 \, \text{V}.$$

- 6.6** Enosmerni paralelno vzbujan generator ima pri nazivnih vrtljajih $n_n = 1200$ vrt/min napetost na sponkah 400 V. Karakteristika prostega teka generatorja, izmerjena pri teh vrtljajih, je podana v diagramu.

Na kolikšno napetost se bo stroj samovzbudil v prostem teku, če bomo zmanjšali hitrost vrtenja na polovico? Upornost rotorskega navitja in padec napetosti na ščetkah zanemarite.



REŠITEV:

Ker padca napetosti na upornosti rotorskega navitja in ščetkah zanemarimo, predstavlja karakteristika praznega teka kar napetost na sponkah generatorja pri različnih vzbujalnih tokih. Tako lahko za podano delovno točko grafično določimo vzbujalni tok: $400\text{V} \rightarrow 0,34\text{A}$. Ker sta to tudi napetost in tok na vzbujalnem navitju, izračunamo upornost vzbujalnega navitja:

$$R_{vzb} = \frac{400}{0,34} = 1176\Omega. \quad (1)$$

Iz enačbe za inducirano napetost kolektorskega stroja:

$$E = k \cdot \Phi \cdot n \quad (2)$$

vidimo, da je inducirana napetost pri istem vzbujalnem toku (oz. vzbujalnemu fluksu) sorazmerna vrtilni hitrosti, zato je inducirana napetost pri polovični vrtilni hitrosti, za polovico manjša. Da se izognemo risanju druge karakteristike lahko le spremenimo skalo (manjše številke). Ker poznamo upornost tokokroga, vrišemo uporovno premico (1176Ω) in presečišče s KPT določa novo delovno točko:

$$U = E = 145\text{ V}.$$

- 6.7 (Analitično)** V prostem teku pri 3000 vrt/min je bila na sponkah enosmernega paralelnega generatorja izmerjena napetost 250 V. Karakteristika prostega teka generatorja, izmerjena pri tej hitrosti je, za vzbujaalni tok od 0 do 2 A, podana z enačbo:

$$E_A = \frac{300 I_1}{0,3 + I_1} + 30 \text{ (V)}.$$

Pri kolikšni vrtilni hitrosti bo napetost prostega teka 125 V? Padec napetosti na rotorskem navitju in ščetkah zanemarimo

REŠITEV:

Ker padca napetosti na upornosti rotorskega navitja in ščetkah zanemarimo, predstavlja karakteristika praznega teka kar napetost na sponkah generatorja pri različnih vzbujaalnih tokih. Izračunamo lahko vzbujaalni tok pri dani delovni točki:

$$250 = \frac{300 I_1}{0,3 + I_1} + 30. \quad (1)$$

Rešimo kvadratično enačbo (1) in dobimo:

$$I_1 = 0,825 \text{ A}. \quad (2)$$

Pri znanem vzbujaalnem toku in napetosti na sponkah izračunamo upornost vzbujaalnega navitja:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{250}{0,825} = 303,03 \Omega. \quad (3)$$

Ker je v drugem primeru napetost le 125 V, bo tudi vzbujaalni tok dvakrat manjši:

$$I_1' = \frac{U_1'}{R_1} = \frac{125}{303,03} = 0,4125 \text{ A}. \quad (4)$$

Inducirana napetost je sorazmerna vrtilni hitrosti ($E = k \cdot \Phi \cdot n$) in ker je vzbujaalni tok v drugem primeru znan, lahko zapišemo:

$$125 = \frac{n'}{n} \left(\frac{300 I_1}{0,3 + I_1} + 30 \right) = \frac{n'}{3000} \left(\frac{300 \cdot 0,4125}{0,3 + 0,4125} + 30 \right) = n' \cdot 0,06789, \quad (5)$$

tako da je nova hitrost:

$$n' = \frac{125}{0,06789} = \mathbf{1841 \text{ min}^{-1}}. \quad (6)$$

- 6.8 (Analitično)** Enosmerni generator s paralelnim vzbujanjem ima v prostem teku pri nazivnih vrtljajih $n_n = 2800$ vrt/min napetost na sponkah 330V. Karakteristiko prostega teka, izmerjeno pri teh vrtljajih, smo aproksimirali z izrazom (za tok od 0 do 1A):

$$E_A = \frac{450 \cdot I_1}{0.2 + I_1} + 15 \quad (\text{V})$$

Kolikšno dodatno upornost moramo vezati v vzbujalni tokokrog, da bo napetost prostega teka pri nazivnih vrtljajih 250 V? Upornost rotorskega navitja je $R_A = 7 \Omega$, padec napetosti na ščetkah pa zanemarimo.

REŠITEV:

Če želimo znižati napetost prostega teka pri isti vrtilni hitrosti, je potrebno zmanjšati vzbujalni tok in posledično inducirano napetost generatorja. To najenostavneje naredimo tako, da povečamo upornost vzbujalnega tokokroga, kar pomeni, da zaporedno k vzbujalnemu navitju vežemo dodatno upornost.

Iz danih podatkov najprej izračunajmo upornost vzbujalnega navitja. Napetost na sponkah je zaradi padcev napetosti na upornosti rotorskega navitja in ščetkah nižja od inducirane napetosti. V našem primeru padca napetosti na ščetkah ne upoštevamo, zato poiščemo tok skozi rotor in vzbujalno navitje z rešitvijo enačbe:

$$U_A = E_A(I_1) - I_1 \cdot R_A, \quad (1)$$

$$U_A = \frac{450 \cdot I_1}{0.2 + I_1} + 15 - I_1 \cdot R_A, \quad (2)$$

$$330 = \frac{450 \cdot I_1}{0.2 + I_1} + 15 - I_1 \cdot 7 \quad (3)$$

Ustrezna rešitev kvadratične enačbe je:

$$I_1 = 0,4838 \text{ A}. \quad (4)$$

Ker poznamo napetost na sponkah lahko enostavno izračunamo upornost vzbujalnega navitja:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{330}{0,4838} = 682,069 \Omega. \quad (5)$$

Sedaj s pomočjo enačbe (1) in (2) izračunajmo kolikšen je potreben vzbujalni tok, da bo napetost nižja:

$$250 = \frac{450 \cdot I_1}{0.2 + I_1} + 15 - I_1 \cdot 7 \rightarrow I_1 = 0,2216 \text{ A} \quad (6)$$

To je potrebni vzbujalni tok, zato izračunamo ustrezno upornost vzbujalnega tokokroga, saj je napetost na sponkah znana:

$$R_{\text{cel}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{250}{0,2216} = 1128,16 \Omega. \quad (7)$$

To je celotna upornost vzbujalnega tokokroga:

$$R_{\text{cel}} = R_1 + R_{\text{dod}}, \quad (8)$$

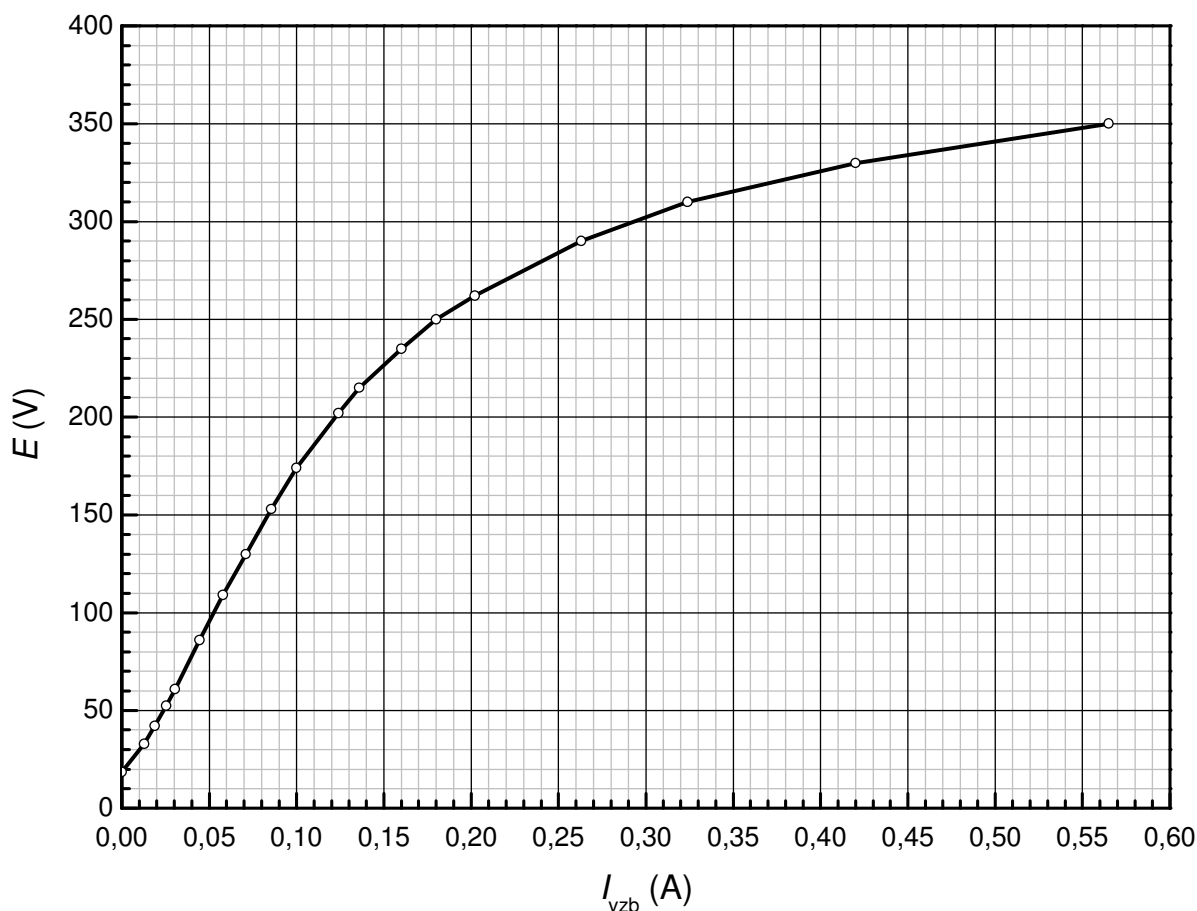
tako da je potrebna vrednost dodatne upornosti:

$$R_{\text{dod}} = R_{\text{cel}} - R_1 = 1128,16 - 682,069 = \mathbf{446,1 \Omega}. \quad (9)$$

6.9 V prostem teku pri 1500 vrt/min je bila na sponkah enosmernega generatorja s paralelnim vzbujanjem izmerjena napetost 330 V. V diagramu je prikazana karakteristika prostega teka generatorja, izmerjena pri istih vrtljajih. Upornost rotorskega navitja in padec napetosti na ščetkah zanemarimo.

a) Pri kolikšni vrtilni hitrosti bi bila napetost prostega teka 250 V?

b) Kolikšno dodatno upornost moramo vezati v vzbujalni tokokrog, če želimo, da bo napetost prostega teka prav tako 250 V, a pri 1500 vrt/min?



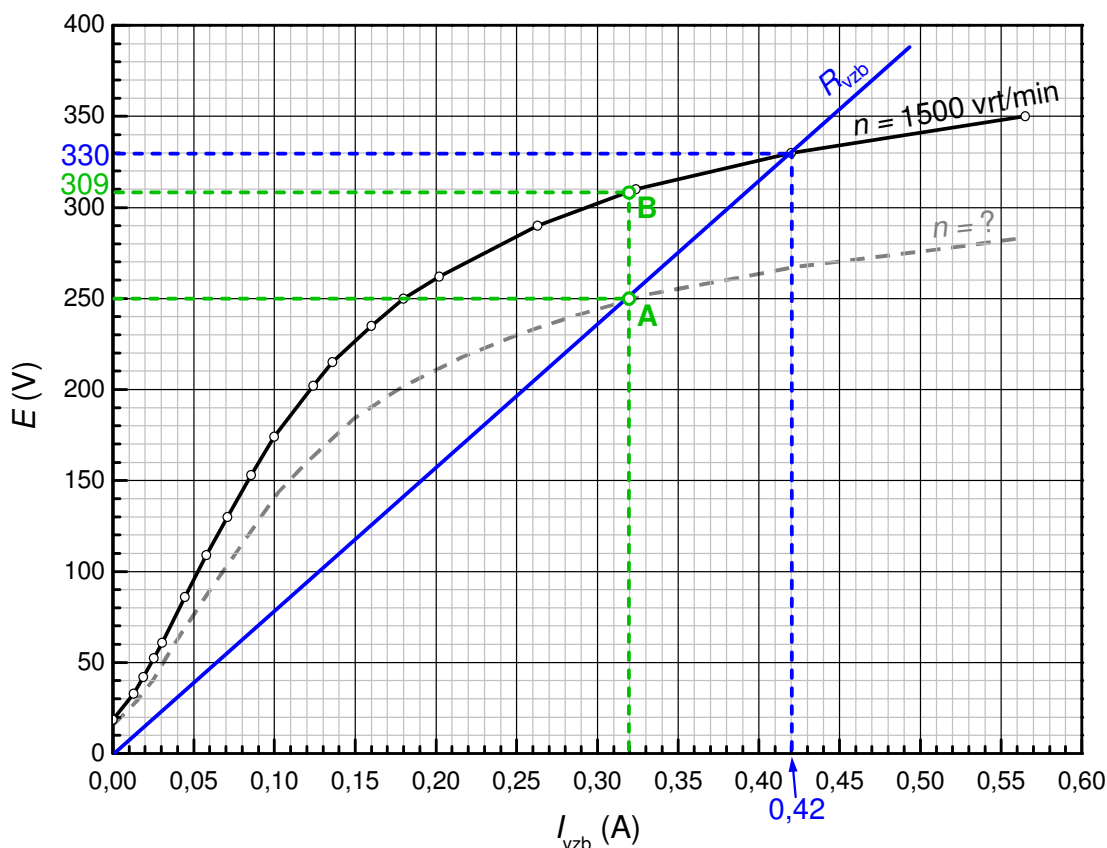
REŠITEV:

a) Ker lahko padec napetosti na ščetkah in rotorskem navitju zanemarimo, je napetost na rotorskih sponkah generatorja enaka rotorski inducirani napetosti. Vzbujalno navitje je vezano paralelno k rotorskem, tako da je na njem ista napetost. Delovna točka je torej presečišče karakteristike prostega teka (KPT) in upornovne premice vzbujalnega navitja. Iz diagrama KPT odčitamo vzbujalni tok pri 330 V in izračunamo upornost vzbujalnega navitja:

$$R_{vzb} = \frac{U_0}{I_{vzb}} = \frac{330}{0,42} = 785,72 \, \Omega \quad (1)$$

Če upornosti vzbujalnega tokokroga ne spreminjamo, bo obratovalna točka generatorja vedno na uporovni premici vzbujalnega navitja (R_{vzb}). Če pa spremenimo hitrost generatorja se bo seveda spremenila tudi inducirana napetost, a linearno z vrtljaji se spremeni le KPT ne pa tudi dejanska inducirana napetost stroja, saj sprememba KPT pomeni novo delovno točko na uporovni premici R_{vzb} in to točko želimo poiskati. Želimo,

da je napetost na generatorju 250 V, zato lahko to novo delovno točko označimo na uporovni premici R_{vzb} (točka A na sliki)



KPT se bo morala tako spremeniti, da bo presečišče z uporovno premico v točki A. S sivo prekinjeno črto je narisana KPT pri novih vrtljajih, za določitev nove hitrosti pa ni potrebno risati celotne krivulje, saj potrebujemo le razmerje hitrosti. To lahko izračunamo tako, da poznamo dve točki (napetosti) na KPT pri istem vzbujalnem toku: novo pri neznanih vrtljajih (točka A) in točko pri istem vzbujalnem toku, a pri znani vrtilni hitrosti (točka B). Razmerje teh dveh napetosti podaja razmerje hitrosti in lahko izračunamo iskano hitrost vrtenja:

$$\frac{n_B}{n_A} = \frac{U_B}{U_A}, \quad (2)$$

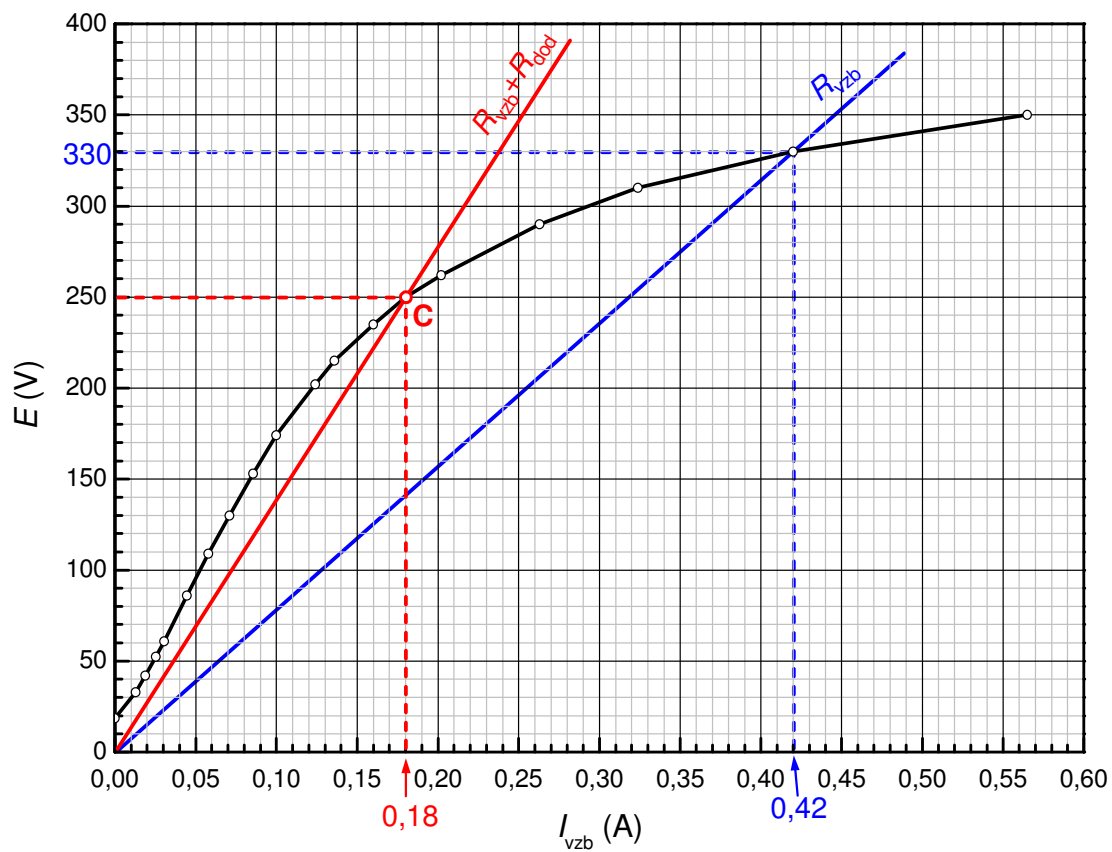
$$n_B = n_A \cdot \frac{U_B}{U_A} = 1500 \cdot \frac{250}{309} = \mathbf{1213,6 \text{ vrt / min}}, \quad (3)$$

b) Če želimo pri isti vrtilni hitrosti spremeniti napetost paralelnega enosmerne generatorja moramo v našem primeru spremeniti naklon uporovne premice vzbujalnega tokokroga, saj le tako dobimo novo delovno točko, ki leži na KPT. Jasno je, da lahko upornost vzbujalnega tokokroga le povečamo, zato v tokokrog vežemo dodatno upornost R_{dod} . Ker vemo, da leži novo presečišče na KPT in to pri željeni napetosti (točka C) lahko v diagram vrišemo novo uporovno premico ter odčitamo nov vzbujalni tok. Izračunamo celotno upornost:

$$R_{cel} = \frac{U_C}{I_{Cvzb}} = \frac{250}{0,18} = 1388,9 \Omega \quad (4)$$

ter poiščemo potrebno dodatno upornost:

$$R_{dod} = R_{cel} - R_{vzb} = 1388,9 - 785,7 = \mathbf{603,2 \Omega}. \quad (5)$$



7 Obremenilni preizkus asinhronskega motorja

7.1 Trifazni asinhronski motor z nazivnimi podatki: $U_n = 380$ V, $I_n = 2.5$ A, $P_n = 1$ kW, $n_n = 1380$ vrt/min, $\cos\varphi = 0,8$, $f_n = 50$ Hz ni nazivno obremenjen.

Pri stroboskopski metodi merjenja slipa se slika oznake na gredi v času 16 s zavrti 20-krat. Ostali izmerjeni veličini sta: $I_1 = 1,75$ A in $P_1 = 750$ W. Navitje je vezano v trikot, upornost toplega navitja merjena med priključnimi sponkami je $15,5$ Ω . Pri preizkusu prostega teka istega motorja pa je bilo izmerjeno: $I_0 = 1,4$ A, $P_0 = 125$ W, $P_{tr-v} = 15$ W, $P_{dod} \approx 0$.

Izračunajte izkoristek motorja pri tej obremenitvi in ga primerjajte z nazivnim.

REŠITEV:

Izkoristek motorja izračunamo po indirektni metodi, saj nimamo podatka o navoru na gredi:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{izg}}{P_1} = 1 - \frac{P_{izg}}{P_1}. \quad (1)$$

Pri danem obratovalnem stanju moramo torej določiti velikost vseh izgub v stroju. Te so: izgube v bakru (stator, rotor), izgube v železu ter izgube trenja in ventilacije:

$$P_{izg} = P_{Cu-s} + P_{Fe} + P_{dod} + P_{Cu-r} + P_{tr-v}. \quad (2)$$

Ker je upornost izmerjena med priključnimi sponkami, uporabimo temu ustrezno enačbo za izračun izgub v bakru v statorskem navitju:

$$P_{Cu-s} = 1,5 \cdot I_1^2 \cdot R_{sp} = 1,5 \cdot 1,75^2 \cdot 15,5 = 71,20 \text{ W}. \quad (3)$$

Izgube v železu dobimo iz preizkusa prostega teka. Velja:

$$P_0 = P_{Cu0} + P_{Fe} + P_{tr-v} + P_{dod}, \quad (4)$$

zato so izgube v železu:

$$P_{Fe} = P_0 - (P_{Cu0} + P_{tr-v} + P_{dod}) = P_0 - (1,5 \cdot I_0^2 \cdot R_{sp} + P_{tr-v} + P_{dod}) \quad (5)$$

$$P_{Fe} = 125 - (1,5 \cdot 1,4^2 \cdot 15,5 + 15 + 0) = 64,43 \text{ W}$$

Moč, ki prehaja na rotor znaša:

$$P_\delta = P_1 - P_{Cu-s} - P_{Fe} - P_{dod} = 750 - 71,20 - 64,43 - 0 = 614,37 \text{ W}. \quad (6)$$

Del te moči se pretvori v mehansko moč, del pa so izgube v navitju rotorja:

$$P_{Cu-r} = P_\delta \cdot s. \quad (7)$$

Slip izračunamo iz podatkov stroboskopske metode merjenja slipa. Najprej določimo slipno frekvenco:

$$f_{slip} = \frac{N}{T} = \frac{20}{16} = 1,25 \text{ Hz}. \quad (8)$$

Iz nazivne hitrosti vidimo, da gre za 4-polni stroj ($n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$ oz. $f_s = 25$ Hz) zato lahko izračunamo še slip:

$$s = \frac{f_{slip}}{f_s} = \frac{1,25}{25} = 0,05. \quad (9)$$

Po enačbi (7) lahko sedaj določimo izgube v navitju rotorja:

$$P_{Cu-r} = 614,37 \cdot 0,05 = 30,72 \text{ W} . \quad (10)$$

Imamo vse izgube, tako da lahko določimo izkoristek:

$$P_{izg} = P_{Cu-s} + P_{Fe} + P_{dod} + P_{Cu-r} + P_{tr-v} = 71,20 + 64,43 + 0 + 30,72 + 15 = 181,35 \text{ W} ,$$

$$\eta = 1 - \frac{P_{izg}}{P_1} = 1 - \frac{181,35}{750} = \mathbf{0,758} .$$

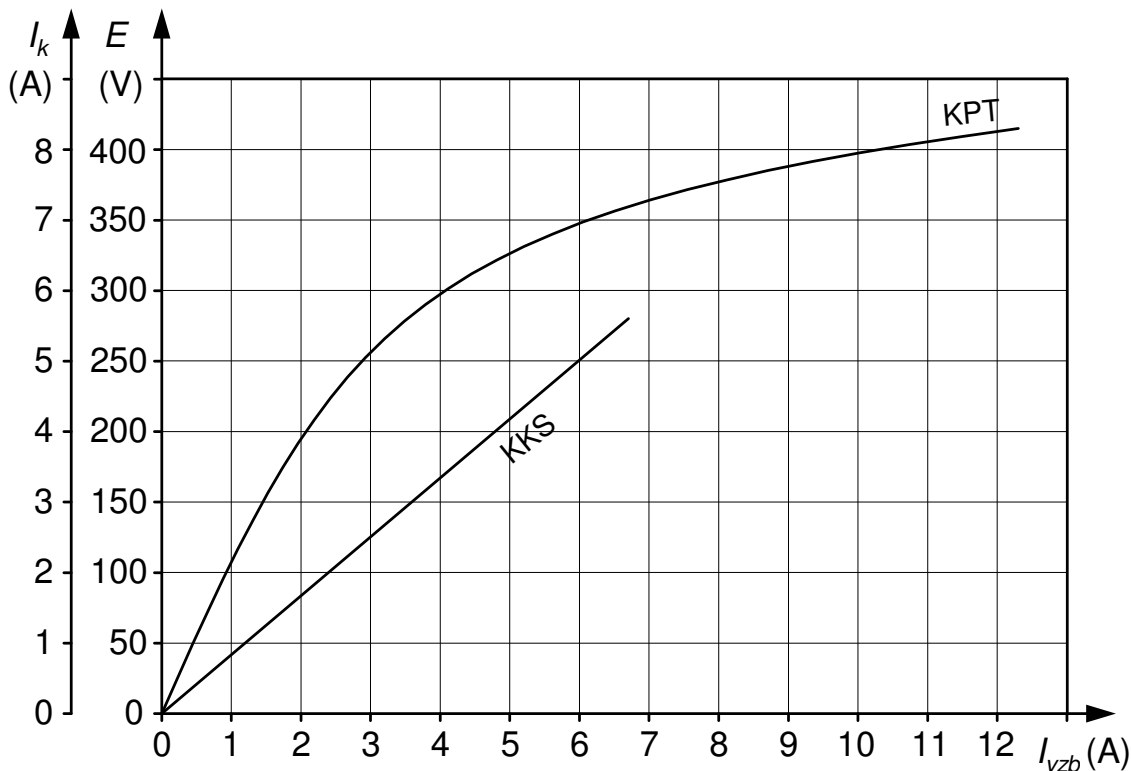
Iz nazivnih podatkov stroja izračunamo še nazivni izkoristek:

$$\eta_n = \frac{P_{2n}}{P_{1n}} = \frac{P_{2n}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 2,5 \cdot 0,8} = \mathbf{0,760} . \quad (11)$$

8 Potierova reaktanca in švedski diagram sinhronskega stroja

- 8.1 Na trifaznem sinhronskem stroju z nazivnimi podatki $U_n = 300$ V, $S_n = 2,6$ kVA, $\cos\varphi_n = 0,8$, $n_n = 1500$ vrt/min, $f_n = 50$ Hz, sta bili izmerjeni karakteristiki prostega teka in kratkega stika (glej diagram) ter vzbujanje $I_v = 12$ A, v delovni točki $U = U_n$, $I = I_n$, $\cos\varphi_L = 0$.

Določite absolutno (Ω) in relativno (%) Potierovo reaktanco stroja.



REŠITEV:

Z grafično metodo narišemo Potierov trikotnik in odčitamo vrednost Potierovega padca napetosti. V ta namen potrebujemo še nazivni tok generatorja, ki ga izračunamo:

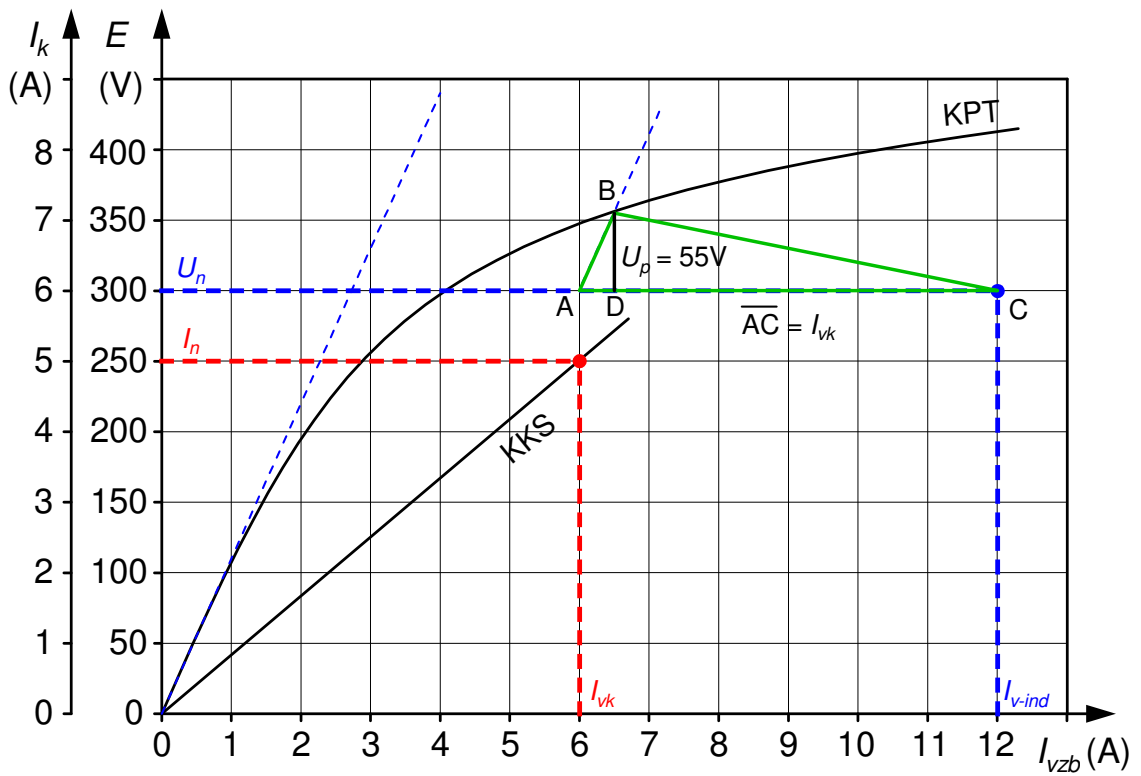
$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{2600}{\sqrt{3} \cdot 300} = 5,0 \text{ A.} \quad (1)$$

Odčitamo $U_p = 55$ V in izračunamo relativno Potierovo reaktanco:

$$x_p = u_p = \frac{U_p}{U_n} = \frac{55}{300} = 0,183. \quad (2)$$

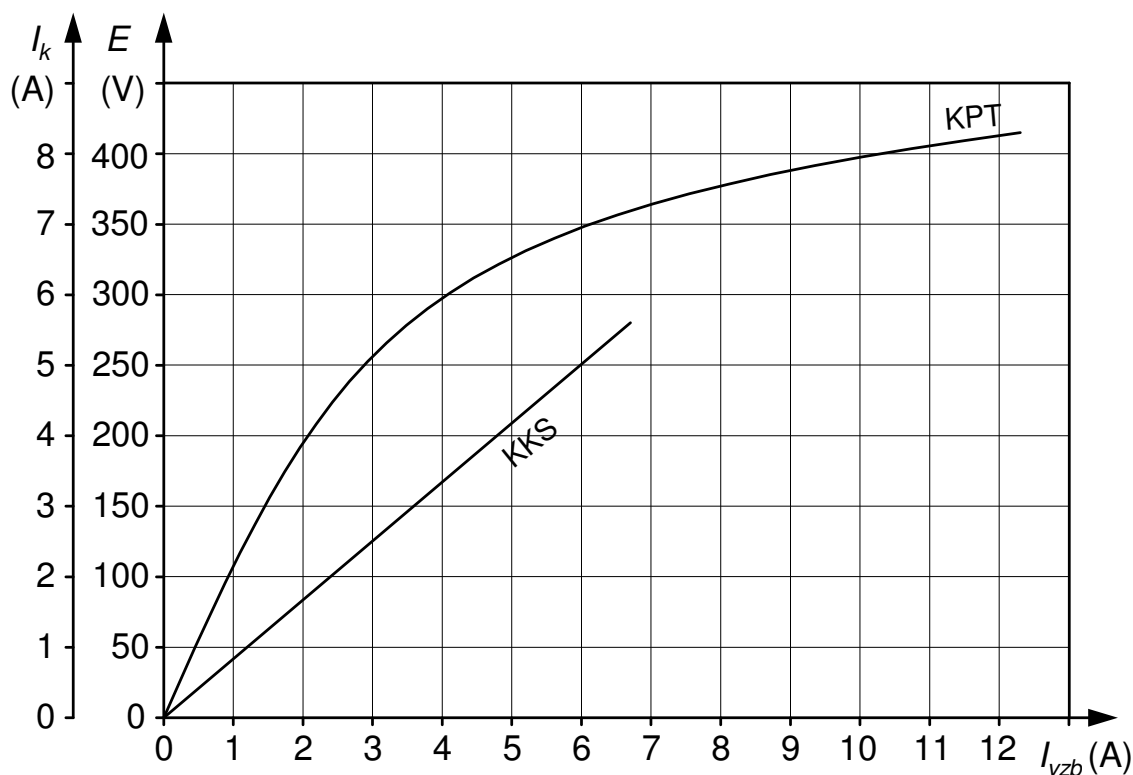
Absolutna vrednost Potierove reaktance pa znaša:

$$X_p = \frac{U_p}{\sqrt{3} I_n} = \frac{55}{\sqrt{3} \cdot 5} = 6,35 \Omega. \quad (3)$$



- 8.2** Trifazni sinhronski stroj z nazivnimi podatki $U_n = 300 \text{ V}$, $S_n = 2 \text{ kVA}$, $\cos\varphi_n = 0.8$, $n_n = 1500 \text{ vrt/min}$, $f_n = 50 \text{ Hz}$ in Potierovo reaktanco $x_p = 16,7 \%$, deluje na togem omrežju nazivne napetosti kot kompenzator jalove energije. Izmerjeni karakteristiki prostega teka in kratkega stika sta prikazani v diagramu.

Kolikšen je vzbujalni tok, če teče v omrežje čisti induktivni tok nazivne vrednosti?



REŠITEV:

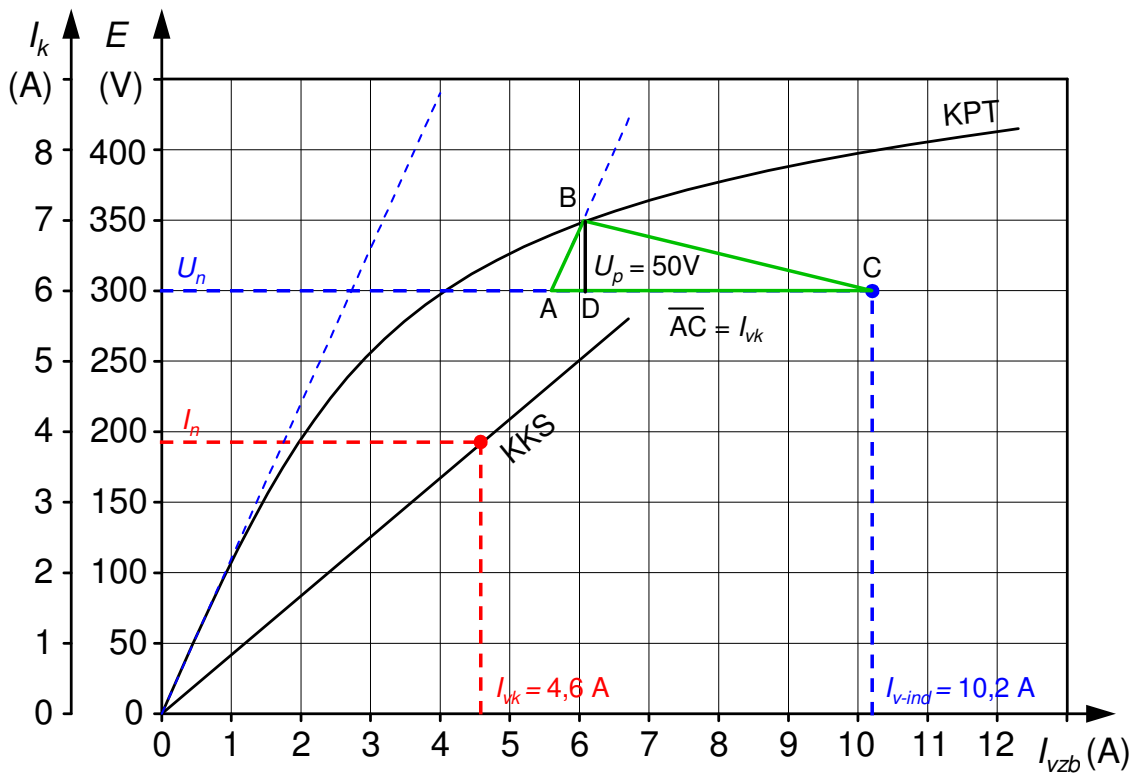
Ker poznamo vrednost relativne Potierove reaktance, izračunamo absoluten Potierov padec napetosti in v diagram vrišemo točko B:

$$U_p = x_p \cdot U_n = 0,167 \cdot 300 = 50,0 \text{ V} . \quad (1)$$

Z linearno (nenasičeno) karakteristiko prostega teka določimo točko A, od te pa odmerimo velikost vzbujalnega I_{vk} , ki ga dobimo s pomočjo nazivnega toka in KKS:

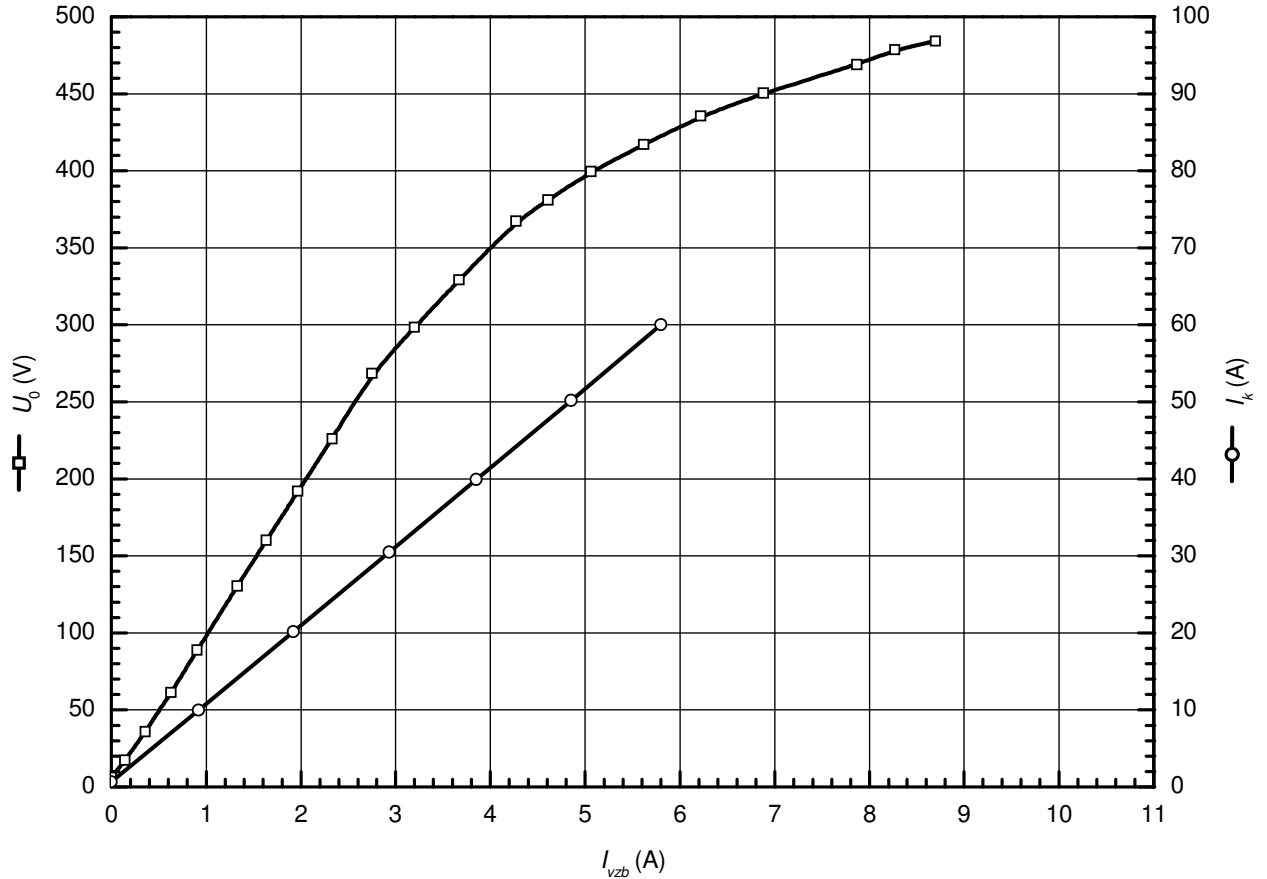
$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{2000}{\sqrt{3} 300} = 3,85 \text{ A} . \quad (2)$$

Dobimo točko C, ki nam določa potrebni vzbujalni tok $I_{v-ind} = 10,2 \text{ A}$.



8.3 Na trifaznem sinhrobnem stroju z nazivnimi podatki $U_n = 400 \text{ V}$, $S_n = 40 \text{ kVA}$, $\cos\varphi_n = 0,8$, $n_n = 1500 \text{ vrt/min}$, sta bili izmerjeni karakteristiki prostega teka in kratkega stika (glej diagram pri nalogi 4) ter vzbujalni tok $I_v = 11 \text{ A}$ v delovni točki $U = U_n$, $I = I_n$, $\cos\varphi_L = 0$.

Kolikšen je vzbujalni tok pri nazivnem obratovanju?



REŠITEV:

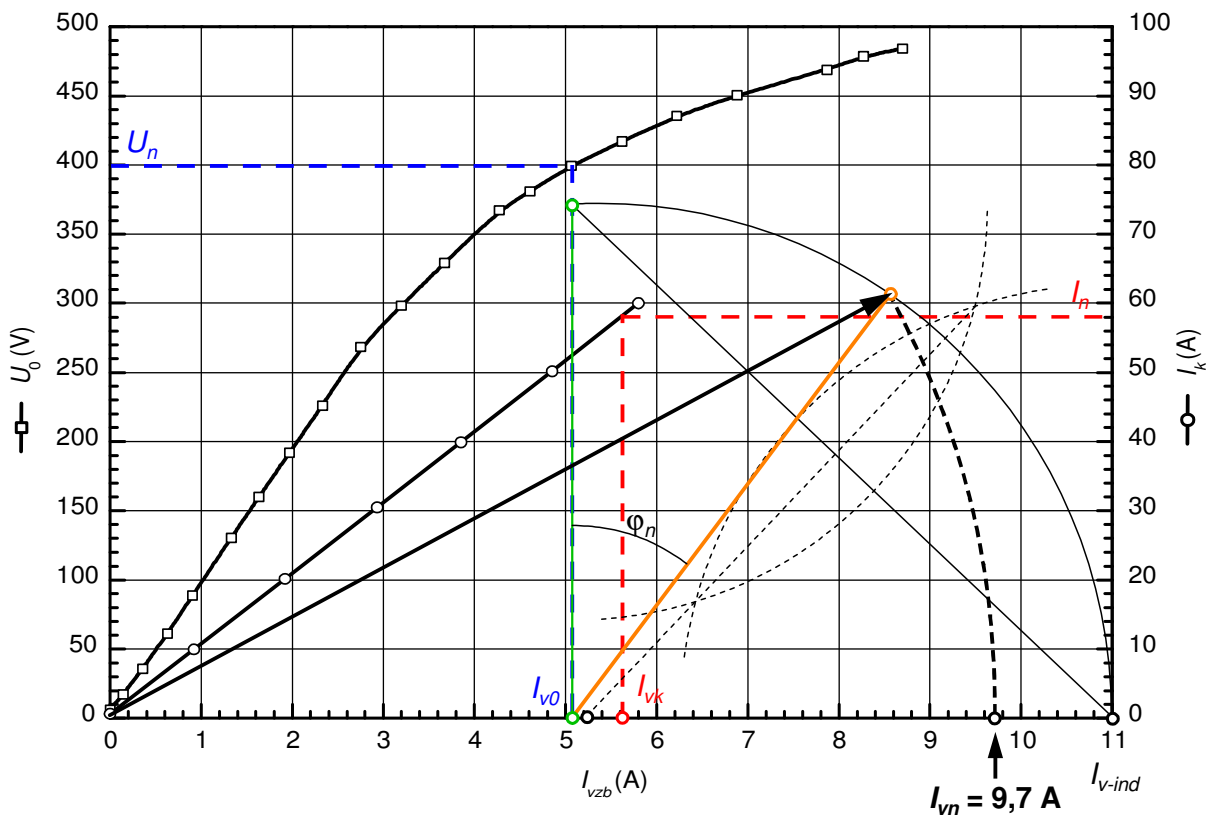
Iz podanih merilnih rezultatov lahko narišemo švedski diagram in poiščemo vzbujanje pri nazivnem toku:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 57,7 \text{ A}, \tag{1}$$

in nazivnem $\cos\varphi$ oz. faznem kotu:

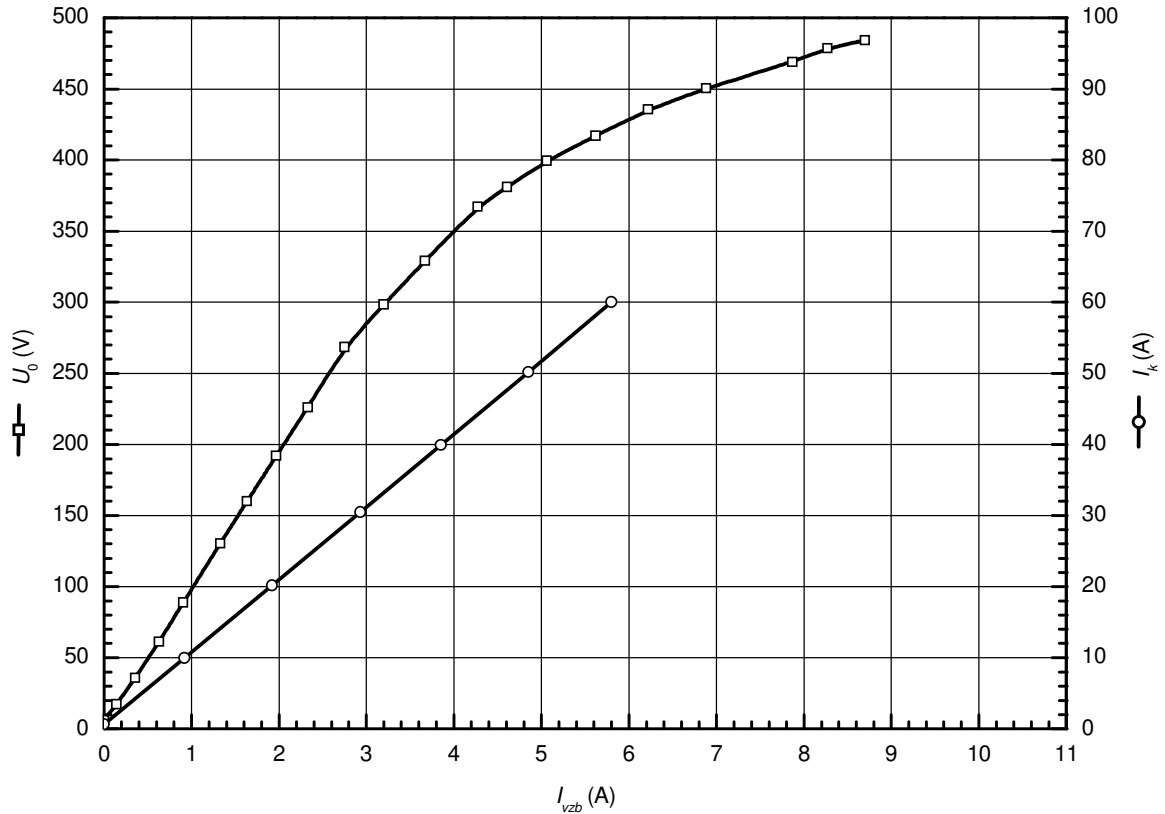
$$\varphi_n = \arccos(\cos \varphi_n) = \arccos(0,8) = 36,9^\circ. \tag{2}$$

Iz diagrama dobimo, da je znaša nazivni vzbujalni tok $I_{vn} = 9,7 \text{ A}$.



8.4 Na trifaznem sinhronskem generatorju z nazivnimi podatki $U_n = 400$ V, $S_n = 40$ kVA, $n_n = 1500$ vrt/min, sta bili izmerjeni karakteristiki prostega teka in kratkega stika (glej diagram) ter vzbujalni tok $I_v = 11$ A v delovni točki $U = U_n$, $I = I_n$, $\cos\varphi_L = 0$.

Z uporabo švedskega diagrama določite nazivni $\cos\varphi$ generatorja, če znaša nazivni vzbujalni tok $I_{vn} = 10$ A? Padec napetosti na upornosti navitja zanemarite.



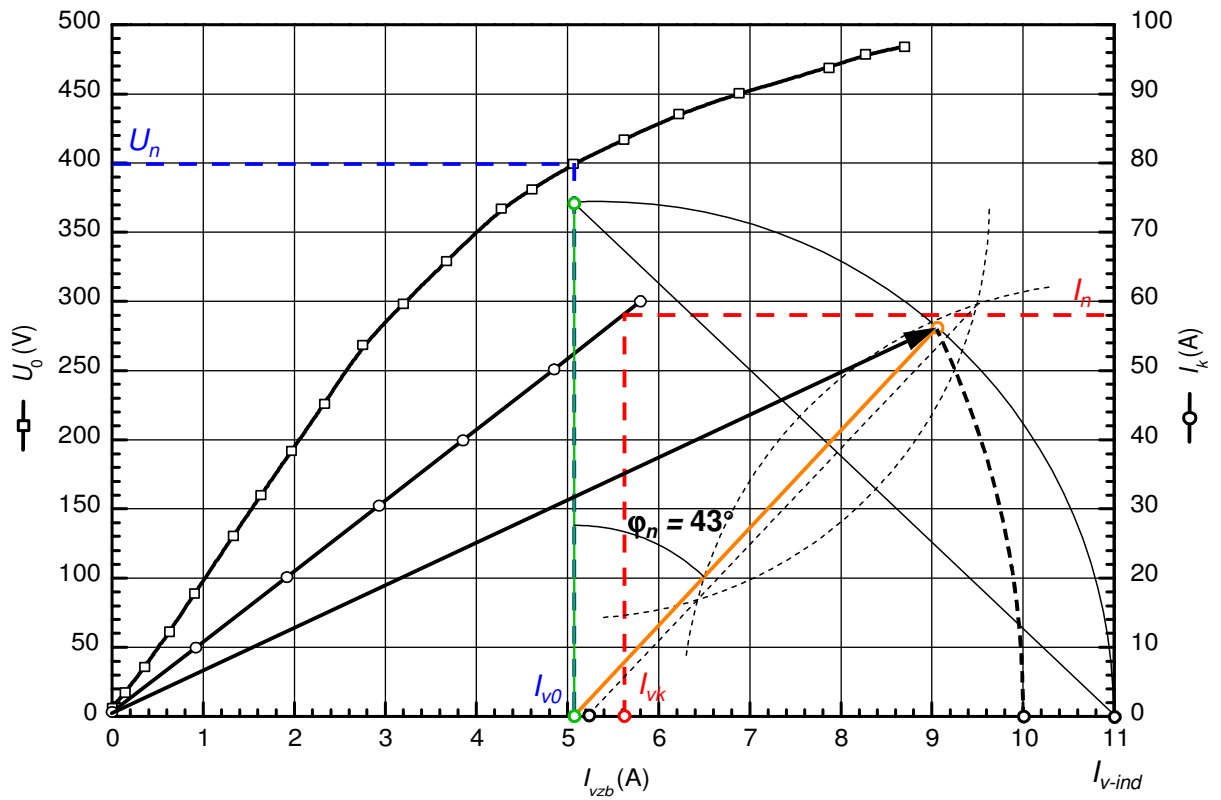
REŠITEV:

Iz podanih merilnih rezultatov lahko narišemo švedski diagram pri čemer poiščemo nazivni $\cos\varphi_n$ na podlagi znanega vzbujalnega toka pri nazivno obremenjenem generatorju:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 57,7 \text{ A.} \quad (1)$$

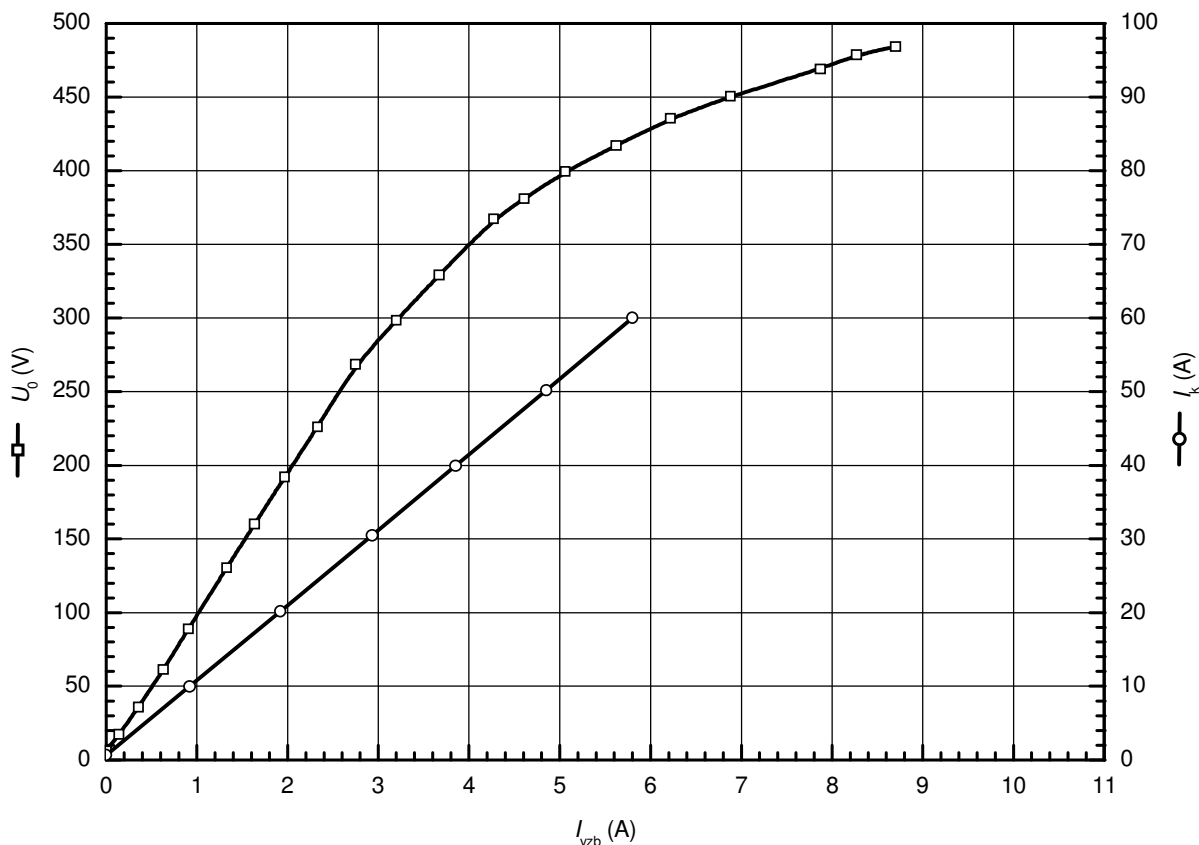
Iz diagrama odčitamo vrednost nazivnega faznega kota $\varphi_n = 43^\circ$, tako da je:

$$\cos \varphi_n = \cos(43^\circ) = \mathbf{0,73} . \quad (2)$$



8.5 Na trifaznem sinhronskem generatorju z nazivnimi podatki $U_n = 380$ V, $S_n = 33$ kVA, $\cos\varphi_n = 0,8$ (L), $n_n = 1500$ vrt/min, $I_{vzb-n} = 9$ A, sta bili izmerjeni karakteristiki prostega teka in kratkega stika (glej diagram).

Kolikšen je vzbujalni tok, ko generator obratuje na nazivnem omrežju, z nazivno močjo in $\cos\varphi = 0,8$, a s kapacitivnim karakterjem?



REŠITEV:

Potrebni vzbujalni tok pri obremenitvi z nazivno močjo, a s kapacitivnim karakterjem bremena, poiščemo s pomočjo švedskega diagrama. Iz podanih nazivnih podatkov najprej izračunajmo nazivni tok generatorja:

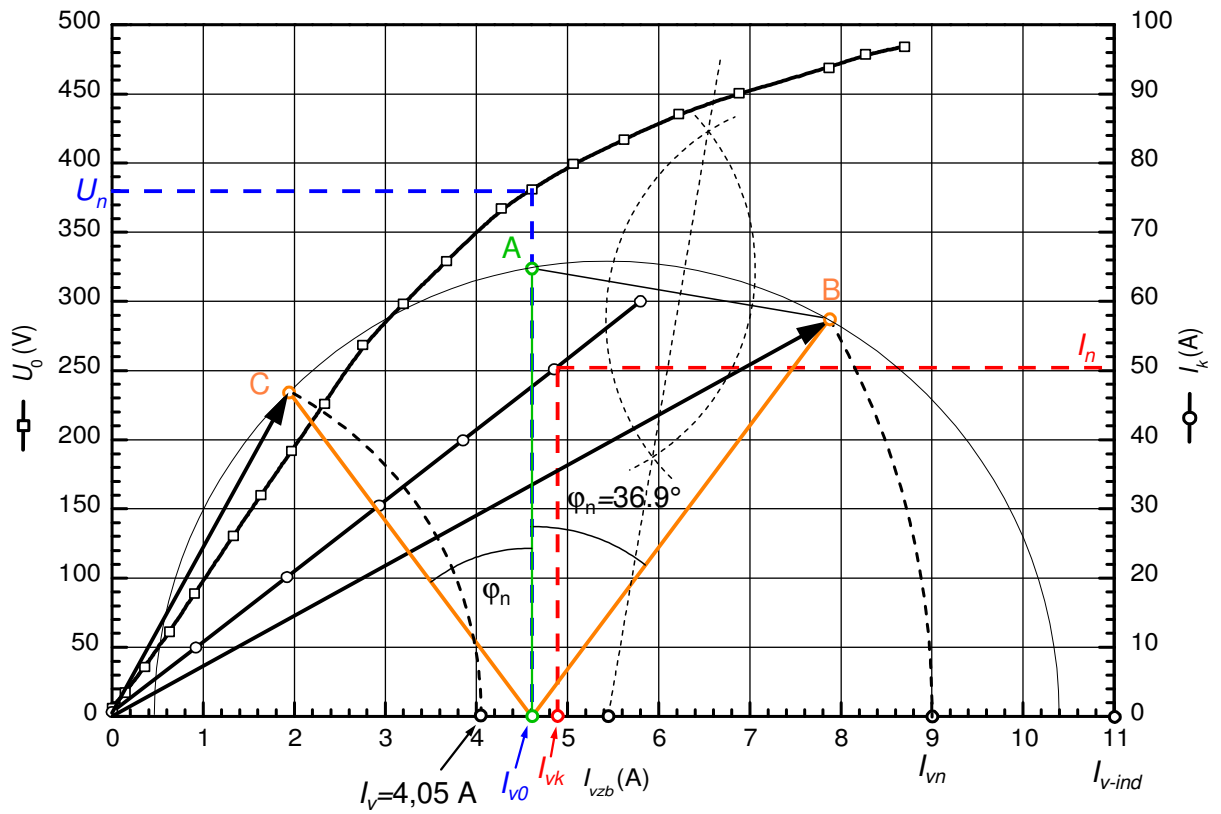
$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{33000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 50,14 \text{ A}, \quad (1)$$

ter v diagram vrišemo točko A, ki jo določata vzbujalni tok prostega teka (I_{v0}) in kratkega stika (I_{vk}). Izračunamo nazivni fazni kot:

$$\varphi_n = \arccos(0,8) = 36,87^\circ \quad (2)$$

in s pomočjo podatka o nazivnem vzbujalnem toku (I_{vn}) dobimo nazivno obratovalno točko B. Točki A in B ležita na krožnici, po kateri potuje kazalec vzbujalnega toka in omogoča, da določimo vzbujalni tok za poljuben $\cos\varphi$. Krožnica ima središče na osi x (I_{vzb}), najenostavneje pa ga poiščemo tako, da narišemo normalo na središče tetive med točkama A in B. Presečišče normale in osi x je središče krožnice. Sedaj le vrišemo obratovalno točko pri kapacitivnem $\cos\varphi = 0,8$ in odčitamo velikost potrebnega vzbujalnega toka, ki je v našem primeru približno:

$$I_v = 4,05 \text{ A}. \quad (3)$$

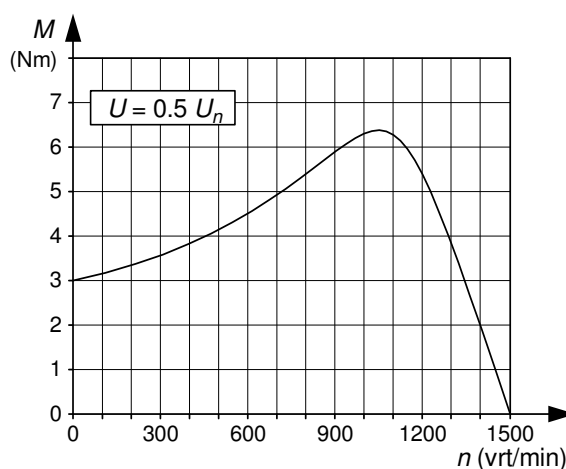


9 Navorna karakteristika asinhronskega motorja

9.1 Pri polovični nazivni napetosti je bila izmerjena prikazana navorna karakteristika trifaznega asinhronskega motorja. Nazivni podatki motorja so: $U_n = 400$ V, $f_n = 50$ Hz, $I_n = 3,1$ A, $\cos\varphi_n = 0,8$, $P_n = 1,2$ kW, $n_n = 1400$ vrt/min. Motor, ki je sicer namenjen pogonu ventilatorja, želimo uporabiti za pogon bremena s konstantnim navorom.

Kolikšen je največji bremenski navor, da lahko motor z bremenom direktno zaganjamo in kolikšno moč motor oddaja, ko obratuje s takšnim bremenom?

Kolikšen je največji navor bremena, da lahko obremenjen motor vklopimo z zvezda/trikot stikalom? Kolikšno moč motor oddaja, ko obratuje s takšnim bremenom (po končanem zagonu)?

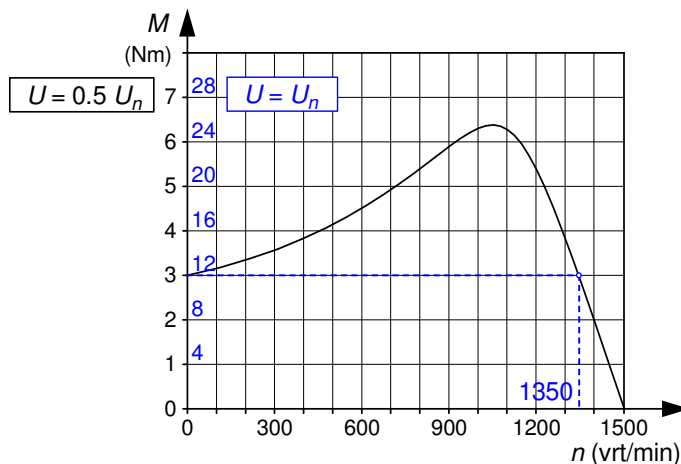


REŠITEV:

Ker je bila navorna karakteristika izmerjena pri polovični nazivni napetosti in je navor sorazmeren kvadratu napajalne napetosti:

$$\frac{M}{M'} = \left(\frac{U_n}{U'}\right)^2 = \left(\frac{400}{200}\right)^2 = 4, \quad (1)$$

je navor pri nazivni napetosti 4-krat večji. Na diagramu enostavno le spremenimo skalo (modre oznake):

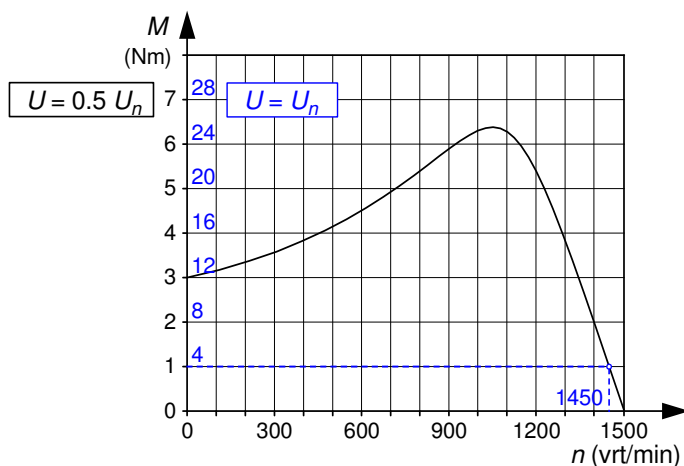


Če želimo breme s konstantnim navorom direktno zaganjati, mora biti navor bremena manjši od zagonskega navora motorja, to je navora pri $n = 0$. Teoretično je torej največji navor bremena ravno enak zagonskemu, ki pri nazivni napetosti znaša $M_z = M_b = 12 \text{ Nm}$.

Mehansko moč, ki jo oddaja motor pri obratovanju s takšnim bremenom izračunamo s pomočjo navora (M_b) in vrtilne hitrosti, ki jo odčitamo iz navorne karakteristike ($n = 1350 \text{ min}^{-1}$):

$$P_m = M_b \cdot \omega = M_b \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n = 12 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 1350 = \mathbf{1696 \text{ W}} . \quad (2)$$

Če bi želeli motor vklopiti z zvezda/trikot stikalom je potrebno upoštevati, da so navitja motorja ob zagonu najprej priključena v zvezdo in je zato na njih fazna napetost, torej za $\sqrt{3}$ manjša od tiste, ko so navitja vezana v trikot. Navor je, zaradi kvadratične odvisnosti od napajalne napetosti, pri tem 3-krat manjši, zato mora biti manjši tudi navor bremena, ki je namesto 12 Nm le 4 Nm. Če v diagramu spremenimo skalo le za nazivno napetost, ko so navitja vezana v trikot (modre oznake), lahko odčitamo vrtilno hitrost motorja, ko obratuje s takim bremenom (po zagonu).



V tem primeru znaša mehanska moč:

$$P_m = M_b \cdot \omega = M_b \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n = 4 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 1450 = \mathbf{607 \text{ W}} . \quad (3)$$

9.2 Asinhronskemu motorju, s podano napisno tablico, določite naslednje nazivne količine: izkoristek, navor in slip.

Navitja motorja vežemo v zvezdo in obremenjen motor priključimo na trifazno omrežje z napetostjo 380 V. Kolikšna je pri tem moč bremena, če motor obratuje pri nazivnih vrtljajih?

Motor & Co GmbH	
Typ 160 l	
3 ~ Mot.	Nr. 12345-88
ΔY 400/690 V	29/17 A
15 kW	cos φ 0,85
1430 U/min	50 Hz
Iso.-Kl. F	IP 54
IEC34-1/VDE 0530	

REŠITEV:

Vse zahtevane nazivne količine izračunamo s pomočjo podatkov z napisne tablice.

Izkoristek stroja je definiran kot razmerje med oddano in prejeto močjo. Motor je pretvornik električne v mehansko energijo zato je oddana moč mehanska, prejeta pa električna. Ker se v elektrotehniko srečujemo z različnimi močmi (navidezna, delovna, jalova) naj poudarimo, da pri izkoristku obravnavamo vedno le delovno moč. Oddana mehanska moč je podana kot nazivna moč motorja, ki v našem primeru znaša 15 kW. Večinoma na napisnih tablicah ni oznak posamezne količine temveč le vrednost le-te, za katero količino gre pa razberemo iz enote.

Vrednosti toka, faktorja moči, vrtljajev so vedno podatni za nazivno obratovalno stanje, tako da izkoristek izračunamo:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 29 \cdot 0,85} = \mathbf{0,878} . \quad (1)$$

Na napisni tablici sta podani dve nazivni napetosti in dva nazivna toka, prva podatka sta za primer, ko so navitja vezana v trikot, druga podatka pa veljata za vezavo zvezda. Pri izračunu izkoristka je načeloma vseeno kateri par vrednosti vzamemo, saj moramo dobiti enak rezultat, odstopanje pa lahko nastopi zaradi bolj grobega zaokroževanja vrednosti, ki so zapisane na tablici. Če na primer izračunamo izkoristek s podatki za vezavo zvezda dobimo:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 17 \cdot 0,85} = \mathbf{0,868} . \quad (2)$$

Nazivni navor dobimo iz nazivne moči in nazivne vrtilne hitrosti:

$$P_n = M_n \cdot \omega_n . \quad (3)$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n \cdot 60}{2\pi \cdot n_n} = \frac{15000 \cdot 60}{2\pi \cdot 1430} = \mathbf{100,2 \text{ Nm}} . \quad (4)$$

Za izračun slipa moramo poznati sinhronsko vrtilno hitrost, ki je običajno prva možna sinhronska hitrost, ki je višja od nazivnih vrtljajev. V našem primeru je nazivna hitrost motorja 1430 vrt/min, zato znaša sinhronska hitrost 1500 vrt/min. Nazivni slip je tako:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1430}{1500} = \mathbf{0,0467} . \quad (5)$$

Če navitja vežemo v zvezdo je nazivna napetost motorja 690 V. Zaradi priključitve na napetost, ki je nižja od nazivne se bo znižal tudi navor motorja in sicer sorazmerno s kvadratom razmerja napetosti:

$$\frac{M}{M_n} = \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 = \left(\frac{380}{690} \right)^2 = 0,3033. \quad (6)$$

Navorno karakteristiko pri nižji napetosti bi torej dobili tako, da navor v vsaki točki pomnožimo s faktorjem 0,3033.

V našem primeru je pri obratovnjju motorja na znižani napetosti, vrtilna hitrost enaka nazivni, torej je v tej delovni točki le navor manjši zato je moč, ki jo motor razvija (moč bremena) enaka:

$$P = M \cdot \omega_n = \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \cdot M_n \cdot \omega_n = \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 \cdot P_n = 0,3033 \cdot 15000 = \mathbf{4549,5 \text{ W}}. \quad (7)$$