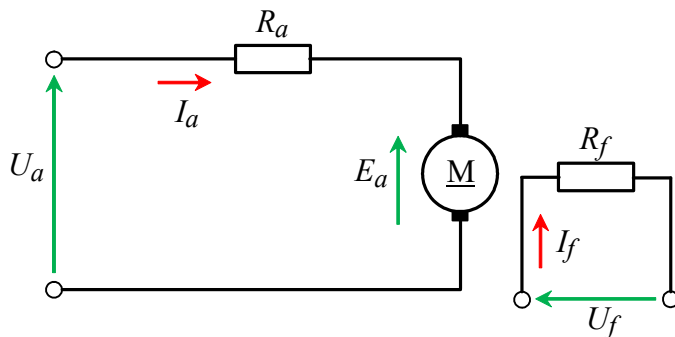


97. Zadatak: Motor za jednosmernu struju sa nezavisnom pobudom ima nominalne podatke $U_{an} = 400 \text{ V}$, $I_{an} = 120 \text{ A}$, $n_n = 1300 \text{ o/min}$, $I_{fn} = 2 \text{ A}$, $R_a = 0,16 \Omega$. Gubici u gvožđu, gubici na trenje i ventilaciju, kao i pad napona na četkicama, se zanemaruju.

- Odrediti momenat u nominalnom režimu i brzinu obrtanja u praznom hodu.
- Kolika će biti brzina obrtanja ako se motor optereti radnom mašinom konstantnog momenta $M_m = 150 \text{ Nm}$? Šta treba učiniti da bi se tada rotor obrtao sa $n_2 = 1000 \text{ o/min}$?
- Šta treba učiniti da bi se postigla brzina obrtanja $n_3 = 2000 \text{ o/min}$?

Prikaz šeme motora jednosmerne struje dat je na slici 97.1, a ekvivalentna šema ovog motora u stacionarnom stanju prikazana je na slici 97.1a.



Slika 97.1a. Ekvivalentna šema motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom u stacionarnom stanju.

- Iz jednačine naponske ravnoteže armature:

$$U_{an} = R_a I_{an} + \omega \psi_{fn} = R_a I_{an} + E, \quad (97.1)$$

može se odrediti nominalni fluksni obuhvat, a potom i nominalni momenat motora:

$$\psi_{fn} = \frac{U_{an} - R_a I_{an}}{\omega_n} = \frac{400 - 0,16 \cdot 120}{2\pi \cdot 1300 / 60} = 2,7972 \text{ Wb}, \quad (97.2)$$

$$M_n = \psi_{fn} \cdot I_{an} = 2,7972 \cdot 120 = 335,7 \text{ Nm}. \quad (97.3)$$

Za brzine manje od nominalne vrednosti, $n = n_n$ fluks se drži na nominalnoj vrednosti, ψ_{fn} .

Sve oznake sa indeksom "a" se odnose na namotaj rotora, koji se uobičajeno naziva armaturom ili induktom. Indeks "f" potiče od engleske reči *field* što znači polje (ovde u smislu magnetne pobude). Tako da se pobudni namotaj uobičajeno označava indeksom "f".

Brzina praznog hoda je brzina koju motor ima kada je neopterećen mehaničkim momentom, odakle se izvodi zaključak da je u praznom hodu, ako se zanemare mehanički gubici struja armature jednaka nuli. Iz jednačine (97.1) lako se može doći do brzine praznog hoda:

$$\omega_0 = \frac{U_{an}}{\psi_{fn}} = \frac{400}{2,7972} = 143 \text{ rad/s} \Rightarrow n_0 = \frac{60\omega_0}{2\pi} = 1365,55 \text{ o/min}.$$

Gore uvedena konstatacija da je struja praznog hoda motora jednaka nuli posledica je primenjenog matematičkog modela mašine jednosmerne struje koji zanemaruje gubitke u gvožđu i gubitke na trenje i ventilaciju. Opravdano zanemarenje ovih gubitaka daje jednostavan matematički model. Ovi gubici nisu uvaženi ni u ekvivalentnoj šemi.

U stvarnosti, zbog navedenih gubitaka, struja praznog hoda motora postoji i iznosi upravo onoliko koliko treba da pokrije te gubitke. Ova struja iznosi nekoliko procenata nominalne struje.

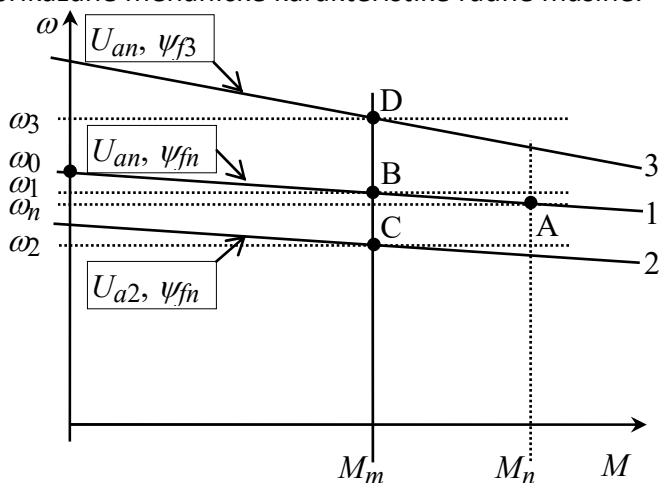
b) U stacionarnom (ustaljenom) režimu momenat konverzije koji motor razvija mora biti jednak mehaničkom momentu. Za dato mehaničko opterećenje tražena brzina obrtanja se može odrediti iz mehaničke karakteristike motora. Ako se iz jednačine naponske ravnoteže armature (97.1) izrazi struja i smeni u jednačinu za momenat motora (97.3), dobija se dobro znana mehanička karakteristika motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom:

$$\omega_1 = \frac{U_{an}}{\psi_{fn}} - \frac{R_a}{\psi_{fn}^2} M_m = \frac{400}{2,7972} - \frac{0,16}{2,7972^2} \cdot 150 = 139,93 \text{ rad/s} \Rightarrow n_1 = \frac{60\omega_1}{2\pi} = 1336,3 \text{ o/min}.$$

Dalje, kako je nova zadata brzina obrtanja $n_2 = 1000 \text{ o/min}$ manja od nominalne vrednosti, to je potrebno smanjiti napon napajanja armature na iznos:

$$U_{a2} = R_a I_{a2} + \omega_2 \psi_{fn} = R_a \frac{M_m}{\psi_{fn}} + \frac{2\pi \cdot n_2}{60} \psi_{fn} = 0,16 \cdot \frac{150}{2,7972} + \frac{2\pi \cdot 1000}{60} \cdot 2,7972 = 301,5 \text{ V}.$$

Na slici 97.1. su prikazane mehaničke karakteristike radne mašine.



Slika 97.2. Mehaničke karakteristike radne mašine i motora.

Karakteristika 1 odgovara nominalnom naponu i fluksu. Radna tačka A je nominalna radna tačka, a tačka B odgovara opterećenju momentom M_m . Karakteristika 2 odgovara sniženom naponu U_{a2} i nominalnom fluksu.

c) Zadata brzina obrtanja $n_3 = 2000 \text{ o/min}$ ($\omega_3 = 209,4395 \text{ rad/s}$) je veća od nominalne vrednosti, što se postiže uz nominalan napon armature i smanjen pobudni fluks. Sada mašina radi u režimu slabljenja polja. Struja motora određena je momentom opterećenja i smanjenim fluksom. Sada jednačina naponske ravnoteže armature glasi:

$$U_{an} = R_a I_{a3} + \omega_3 \psi_f = R_a \frac{M_m}{\psi_f} + \omega_3 \psi_f, \quad (97.4)$$

i u njoj je jedina nepoznata veličina fluks. Iz (97.4) se dobja kvadratna jednačina po pobudnom fluksu:

$$\omega_3 \psi_f^2 - U_{an} \psi_f + R_a M_m = 0, \quad (97.5)$$

čijim se rešavanjem dobija potrebni smanjeni fluks u motoru:

$$\psi_{f3,4} = \frac{U_{an} \pm \sqrt{U_{an}^2 - 4 R_a M_m \omega_3}}{2 \omega_3} = \frac{400 \pm \sqrt{400^2 - 4 \cdot 0,16 \cdot 150 \cdot 209,4395}}{2 \cdot 209,4395}. \quad (97.6)$$

Prvom rešenju $\psi_{f3} = 1,848$ Wb odgovara struja armature koja je prihvatljiva jer je manja od nominalne vrednosti:

$$I_{a3} = \frac{M_m}{\psi_{f3}} = \frac{150}{1,848} = 81,2 \text{ A}. \quad (97.7)$$

Drugo rešenje je jako mali fluks $\psi_{f4} = 0,062$ Wb, kome odgovara neprihvatljivo velika struja armature u odnosu na nominalnu vrednost:

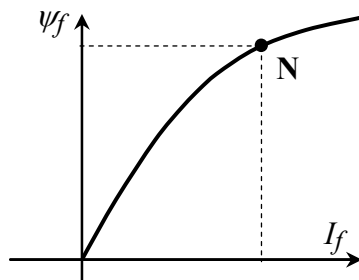
$$I_{a4} = \frac{M_m}{\psi_{f4}} = \frac{150}{0,062} = 2419,4 \text{ A}. \quad (97.8)$$

Mehanička karakteristika motora za nominalni napon armature i smanjeni fluks ψ_{f3} prikazana je na slici 97.2 kao karakteristika 3, radna tačka je D.

Veza između pobudne struje i pobudnog fluksa ψ_f je nelinearna i određena je krivom magnećenja magnetnog kola datog motora. Ta veza je data krivom magnećenja, prikazanom na slici 97.3. Naravno, fluks ψ_f i pobudna struja su vezani dobro znanom relacijom:

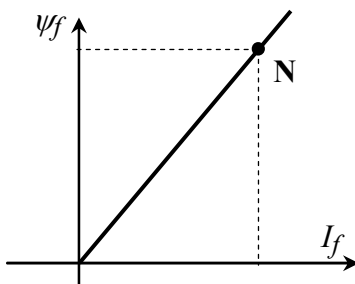
$$\psi_f = L_f(i_f) \cdot i_f,$$

gde je L_f induktivnost namotaja pobude. Ovo međusobna induktivnost zavisi od toga gde se nalazi radna tačka na krivoj magnećenja. Na linearnom delu karakteristike magnećenja međusobna induktivnost je nezavisna od pobudne struje dok se na nelinearnom delu karakteristike menja sa promenom struje pobude.



Slika 97.3. Kriva magnećenja magnetnog kola datog motora.

Ako se zanemari zasićenje magnetnog kola, pobudni fluks se može predstaviti kao linearna funkcija pobudne struje, tj. pretpostavlja se da se radna tačka na krivoj magnećenja nalazi na linearnom delu krive magnećenja, slika 97.4.



Slika 97.4. Aproksimirana kriva magnećenja magnetnog kola.

Za magnetno kolo sa slike 97.4. važi da je $L_f = \text{const}$, odnosno da je $\psi_f = L_f \cdot i_f$. Ova aproksimacija krive magnećenja linearnom karakteristikom je opravdana, zbog toga što se nominalna radna tačka **N** inače nalazi na kolenu karakteristike date na slici 97.3. Tokom rada motora ne dozvoljava se povećanje fluksa iznad nominalne vrednosti, već samo njegovo smanjenje u cilju povećanja brzine obrtanja iznad nominalne vrednosti.

Kako je poznata nominalna vrednost struje pobude, i ako se pretpostavi da je magnetno kolo linearno tj. da je fluks linearno zavisao od struje pobude,

$$\frac{\psi_{f3}}{\psi_{fn}} = \frac{I_{f3}}{I_{fn}}, \quad (97.9)$$

tada se može odrediti vrednost pobudne struje koja odgovara fizički prihvatljivom fluksu $\psi_{f3} = 1,848 \text{ Wb}$:

$$I_{f3} = \frac{\psi_{f3}}{\psi_{fn}} I_{fn} = \frac{1,848}{2,7972} \cdot 2 = 1,32 \text{ A}, \quad (97.10)$$

Da bi se postigla zadata brzina od $n_3 = 2000 \text{ o/min}$, potrebno je smanjiti struju pobude na 1,32 A, pri nominalnom naponu napajanja.

99. Zadatak: Motor jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom ima sledeće nominalne podatke: $P_n = 4,2 \text{ kW}$, $U_{an} = 110 \text{ V}$, $n_n = 750 \text{ o/min}$, $\eta_n = 0,78$, $R_a = 0,15 \Omega$, $R_f = 64 \Omega$, $U_f = 110 \text{ V}$.

- a) Odrediti momenat koji motor razvija na vratilu pri nominalnom opterećenju.
b) Koliki je polazni momenat kada se u kolo rotora doda otpornik od $R_d = 1,2 \Omega$?

- a) Nominalna struja motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom iznosi:

$$I_{an} = \frac{P_{eln}}{U_{an}} = \frac{P_n}{\eta_n \cdot U_{an}} = \frac{4200}{0,78 \cdot 110} = 48,95 \text{ A}.$$

Iz jednačine naponske ravnoteže armature:

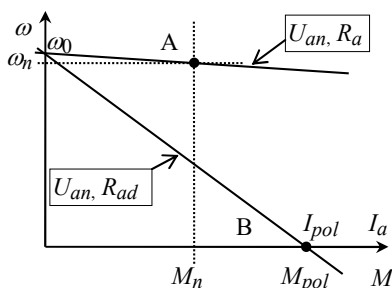
$$U_{an} = R_a I_{an} + \omega \psi_{fn}, \quad (99.1)$$

može se odrediti nominalni fluksni obuhvat, a potom i nominalni momenat motora:

$$\psi_{fn} = \frac{U_{an} - R_a I_{an}}{\omega_n} = \frac{110 - 0,15 \cdot 48,95}{2\pi \cdot 750/60} = 1,3077 \text{ Wb}, \quad (99.2)$$

$$M_n = \psi_{fn} \cdot I_{an} = 1,3077 \cdot 48,95 = 64,015 \text{ Nm}. \quad (99.3)$$

- b) Mehaničke karakteristike motora bez i sa dodatnim otpornikom u cilju ograničenja struje polaska, prikazane su na slici 99.1.



Slika 99.1. Mehaničke karakteristike motora.

Uključenjem dodatnog otpornika karakteristika motora postaje meka, smanjuje se struja polaska motora – struja armature u trenutku pokretanja, $\omega = 0$. Iz jednačine naponske ravnoteže kola armature sa uključenim dodatnim otpornikom, je očigledno da je struja polaska:

$$I_{pol} = \frac{U_{an} - \omega \psi_{fn}}{R_a + R_d} = \frac{U_{an}}{R_a + R_d} = \frac{110}{0,15 + 1,2} = 81,48 \text{ A}, \quad (99.4)$$

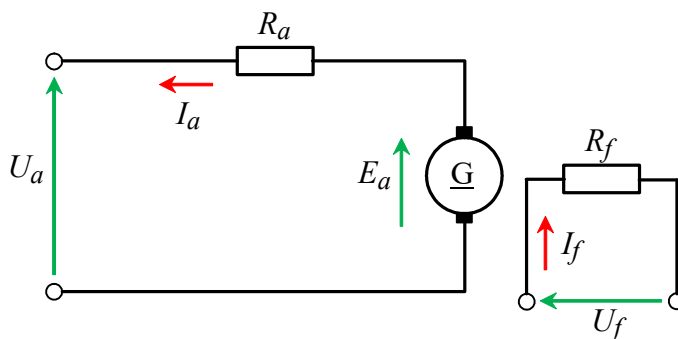
pa je polazni momenat:

$$M_{pol} = \psi_{fn} \cdot I_{pol} = 1,3077 \cdot 81,48 = 106,55 \text{ Nm}. \quad (99.5)$$

103. Zadatak: Dat je generator jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom, o kome znamo sledeće podatke: otpornost namotaja indukta 0,1 Ω , otpor namotaja pobude 100 Ω . Pri brzini obrtanja od 425 o/min generator daje snagu od 100 kW u mrežu napona 440 V, a ukupan pad napona na četkicama je 2 V. U toku rada prekine se pogonski remen (kaiš) i generator nastavi da radi kao motor uzimajući iz mreže snagu od 10 kW. Odrediti:

- Vrednost struje, indukovane elektromotorne sile i fluksa u generatorskom režimu rada.
- Struju i brzinu kojom će se mašina obrtati u motorskom režimu rada.

Ekvivalentna šema generatora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom prikazana je na slici 103.1.



Slika 103.1. Ekvivalentna šema generatora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom

- Iz jednačine naponske ravnoteže za kolo indukta (armature) generatora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom mogu se odrediti indukovana elektromotorna sila i fluks:

$$I_{ag} = \frac{P_{el}}{U_{an}} = \frac{100000}{440} = 227,27 \text{ A},$$

$$E_g = U_{an} + R_a I_{ag} + \Delta U_{\check{c}} = U_{an} + R_a \frac{P_{el}}{U_{an}} + \Delta U_{\check{c}} = 440 + 0,1 \cdot \frac{100000}{440} + 2 = 464,7 \text{ V},$$

$$\psi_f = \frac{E_g}{\omega_g} = \frac{E_g}{2\pi n_g / 60} = \frac{464,7}{2\pi \cdot 425 / 60} = 10,442 \text{ Wb}.$$

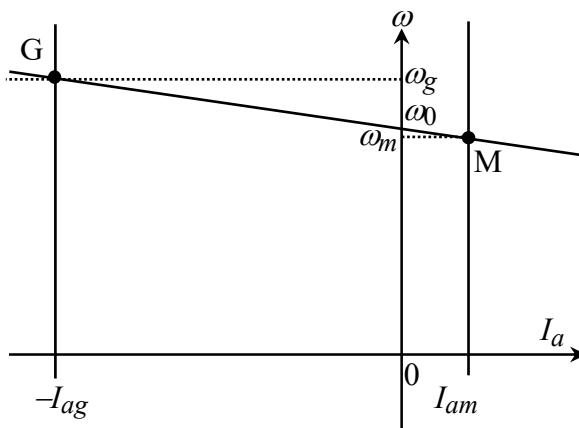
- Kada je došlo do pucanja remena, kojim je pogonska mašina pogonila generator, ova mašina je nastavila da funkcioniše kao motor u praznom hodu uzimajući snagu od $P_{mot} = 10 \text{ kW}$ za pokrivanje gubitaka u gvožđu i mehaničkih gubitaka. Kako se pobudna struja nije promenila to je fluks ostao nepromenjen. Na ekvivalentnoj šemi na slici 103.1. prelaskom u motorski režim rada promenio se smer struje. Iz jednačine naponske ravnoteže za kolo indukta motora jednosmerne struje sa nezavisnom pobudom može se odrediti brzina obrtanja:

$$\omega_m = \frac{U_{an} - R_a \frac{P_{mot}}{U_{an}} - \Delta U_{\check}}{\psi_f} = \frac{440 - 0,1 \frac{10000}{440} - 2}{10,442} = 41,73 \text{ rad/s} \Rightarrow n_m = \frac{60 \omega_m}{2\pi} = 398,48 \text{ o/min} .$$

Nakon pucanja remena motor iz mreže povlači struju:

$$I_{am} = \frac{P_{mot}}{U_{an}} = \frac{10000}{440} = 22,73 \text{ A} .$$

Na slici 103.1 prikazana je mehanička karakteristika sa naznačenim radnim tačkama u generatorskom i motorskom režimu rada.



Slika 103.1. Mehaničke karakteristike motora.

Sa slike 103.1. se može primetiti da je u generatorskom režimu rada brzina generatora veća od brzine praznog hoda $\omega_g > \omega_0$.

105. Zadatak: Motor jednosmerne struje sa paralelnom pobudom ima nominalne podatke: $U_n = 440 \text{ V}$, $I_n = 120 \text{ A}$, $n_n = 970 \text{ o/min}$, $R_a = 0,2 \Omega$, $R_f = 200 \Omega$. Pad napona na četkicama, mehanički gubici i gubici u gvožđu mogu se zanemariti.

- Odrediti nominalni momenat motora.
- Motor se optereti tako da iz mreže uzima struju $I_1 = 40 \text{ A}$. Koliki su momenat opterećenja i brzina obrtanja?
- Pri momentu opterećenja kao pod b) napon opadne na vrednost $U_2 = 400 \text{ V}$. Šta se dešava sa motorom?
- Pri nominalnom naponu napajanja i istom opterećenju u kolo pobude se uključi dodatni otpornik $R_d = 75 \Omega$. Šta će se desiti?

Nacrtati odgovarajuće mehaničke karakteristike i radne tačke u $M - n$ ravni.

- Nominalna struja armature motora sa paralelnom pobudom i brzina iznose:

$$I_{an} = I_n - I_f = I_n - \frac{U_n}{R_f} = 120 - \frac{440}{200} = 117,8 \text{ A},$$

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 970}{60} = 101,58 \text{ rad/s}.$$

Iz jednačine naponske ravnoteže armature može se odrediti nominalni fluks motora, a potom i nominalni momenat motora:

$$\psi_{fn} = \frac{U_n - R_a I_{an}}{\omega_n} = \frac{440 - 0,2 \cdot 117,8}{101,58} = 4,1 \text{ Wb}, \quad (105.1)$$

$$M_n = \psi_{fn} \cdot I_{an} = 4,1 \cdot 117,8 = 483 \text{ Nm}. \quad (105.2)$$

- Za zadatu struju motora sa paralelnom pobudom lako se može odrediti struja armature, a potom i momenat opterećenja:

$$I_{a1} = I_1 - \frac{U_n}{R_p} = 40 - \frac{440}{200} = 37,8 \text{ A}, \quad (105.3)$$

$$M_1 = \psi_{fn} \cdot I_{a1} = 4,1 \cdot 37,8 = 155 \text{ Nm}. \quad (105.4)$$

Brzina obrtanja se može odrediti iz jednačine naponske ravnoteže armature:

$$\omega_1 = \frac{U_n - R_a I_{a1}}{\psi_{fn}} = \frac{440 - 0,2 \cdot 37,8}{4,1} = 105,47 \text{ rad/s} \Rightarrow n_1 = \frac{60\omega_1}{2\pi} = 1007,2 \text{ o/min}.$$

- Zbog promene napona, promenila se pobudna struja, a time i pobudni fluks (smatra se da je promena linearna):

$$\psi_{f2} = \psi_{fn} \frac{U_2}{U_n} = 4,1 \cdot \frac{400}{440} = 3,727 \text{ Wb}.$$

Kako je momenat opterećenja ostao nepromenjen, to je struja armature:

$$I_{a2} = \frac{M_1}{\psi_{f2}} = \frac{155}{3,727} = 41,6 \text{ A}.$$

Brzina obrtanja se može odrediti iz jednačine naponske ravnoteže armature:

$$\omega_2 = \frac{U_2 - R_a I_{a2}}{\psi_{f2}} = \frac{400 - 0,2 \cdot 41,6}{3,727} = 105,09 \text{ rad/s} \Rightarrow n_2 = \frac{60 \omega_1}{2\pi} = 1003,6 \text{ o/min}.$$

Kod mašina sa paralelnom pobudom, pri konstantnom momentu opterećenja, brzina obrtanja se neznatno menja sa promenom napona napajanja. U ovom primeru napon napajanja se smanjio za 10 %, a brzina obrtanja za manje od 1%. Brzina praznog hoda:

$$\omega_0 = \frac{U_a}{\psi_f},$$

određena je naponom napajanja i pobudnim fluksom. Ako magnetno kolo nije zasićeno pobudni fluks linearno zavisi od struje pobude, a ona od napona pobude. Dakle, pobudni fluks je direktno proporcionalan sa naponom napajanja.

$$\omega_0 = \frac{U_a}{\psi_f} \sim \frac{U_a}{I_f} \sim \frac{U_a}{U_a / R_f} \approx \text{const.}$$

Brzina praznog hoda, ω_0 , nezavisna je od promene napona napajanja. Pad brzine:

$$\Delta\omega = \frac{R_a}{\psi_f^2} M_m,$$

zavisi od momenta opterećenja, ali je njegova promena sa momentom opterećenja mala, jer je mehanička karakteristika tvrda.

d) Ako se pri nominalnom naponu napajanja poveća otpornost u kolu pobude doći će do smanjenje pobudne struje, a time i pobudnog fluksa:

$$\psi_{f3} = \psi_{fn} \frac{I_{f3}}{I_{fn}} = \psi_{fn} \frac{R_f}{R_f + R_d} = 4,1 \cdot \frac{200}{200 + 75} = 2,982 \text{ Wb}.$$

Kako je momenat opterećenja ostao nepromenjen, a fluks se smanjio to se struja armature povećala:

$$I_{a3} = \frac{M_1}{\psi_{f3}} = \frac{155}{2,982} = 52 \text{ A}.$$

Smanjenje fluksa praćeno je povećanjem brzine. Brzina obrtanja se može dobiti ponovo iz jednačine naponske ravnoteže armature:

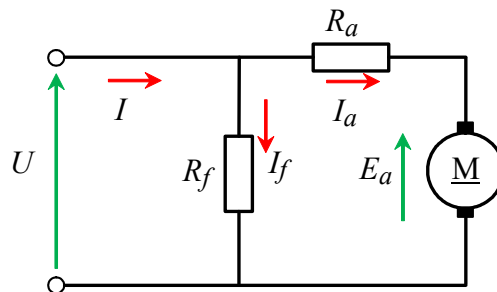
$$\omega_3 = \frac{U_n - R_a I_{a3}}{\psi_{f3}} = \frac{440 - 0,2 \cdot 52}{2,982} = 144,06 \text{ rad/s} \Rightarrow n_3 = \frac{60 \omega_3}{2\pi} = 1375,7 \text{ o/min} \cdot (105,6)$$

111. Zadatak: Na raspolaganju je jednosmerni motor sa paralelnom pobudom sa podacima: $P_n = 26 \text{ kW}$, $U_n = 110 \text{ V}$, $I_n = 274 \text{ A}$, $n_n = 970 \text{ o/min}$, $P_{Cuan} = 2 \text{ kW}$, $P_{Cufn} = 1,5 \text{ kW}$.

- Motor pokreće radnu mašinu sa momentom $M_{RM} = 0,5 M_n$. Koliko će iznositi struja, brzina obrtanja i stepen korisnog dejstva?
- Motor treba da radi kao generator sa izlaznim naponom $U = 110 \text{ V}$ i nominalnom strujom armature. Odrediti potrebnu brzinu obrtanja, korisnu snagu koju će odavati u mrežu, mehaničku snagu i stepen korisnog dejstva.

Napomena: Zanimariti pad napona na četkicama.

Ekvivalentna šema motora jednosmerne struje sa paralelnom pobudom prikazana je na slici 111.1.



Slika 111.1. Ekvivalentna šema motora jednosmerne struje sa paralelnom pobudom.

- Do nominalne struje pobude može se doći iz snage gubitaka u pobudnom namotaju:

$$P_{Cufn} = R_f I_{fn}^2 = U_n I_{fn} \Rightarrow I_{fn} = \frac{P_{Cufn}}{U_n} = \frac{1500}{110} = 13,64 \text{ A}.$$

Nominalna struja armature je:

$$I_{an} = I_n - I_{fn} = 274 - 13,636 = 260,36 \text{ A}.$$

Otpornost armaturnog namotaja iznosi:

$$R_a = \frac{P_{Cuan}}{I_{an}^2} = \frac{2000}{260,36^2} = 0,0295 \Omega.$$

Nominalna elektromotorna sila i fluks motora iznose:

$$E_n = U_n - R_a I_{an} = 110 - 0,0295 \cdot 260,36 = 102,32 \text{ V},$$

$$\psi_{fn} = \frac{E_n}{\omega_n} = \frac{102,32}{2\pi \cdot 970/60} = 1,007 \text{ Wb}.$$

a) Kada je motor opterećen polovinom nominalnog momenta, struja armature će iznositi $I_{a1} = 0,5I_{an} = 130,18 \text{ A}$, dok je struja motora:

$$I = I_{a1} + I_{fn} = 130,18 + 13,636 = 143,8 \text{ A}.$$

Brzina obrtanja motora je:

$$\omega_1 = \frac{U_n - R_a I_{a1}}{\psi_{fn}} = \frac{110 - 0,0295 \cdot 130,18}{1,007} = 105,023 \text{ rad/s} \Rightarrow n_1 = \frac{60\omega_1}{2\pi} = 1002,9 \text{ o/min}.$$

Ukupna snaga gubitaka pri nominalnom opterećenju omogućuje da se odrede u zbiru gubici u gvožđu i gubici na trenje i ventilaciju:

$$P_{gn} = U_n I_n - P_n,$$

$$P_{gn} = P_{Fe} + P_{tv} + R_f I_{fn}^2 + R_a I_{an}^2 = P_{Fe} + P_{tv} + P_{Cufn} + P_{Cuan},$$

$$P_{Fe} + P_{tv} = U_n I_n - P_n - P_{Cufn} - P_{Cuan},$$

$$P_{Fe} + P_{tv} = 110 \cdot 274 - 26000 - 1500 - 2000 = 640 \text{ W}.$$

Ukupna snaga gubitaka pri opterećenju polovinom nominalnog momenta je:

$$P_g = P_{Fe} + P_{tv} + R_f I_{fn}^2 + R_a (0,5I_{an})^2 = P_{Fe} + P_{tv} + P_{Cufn} + 0,25P_{Cuan},$$

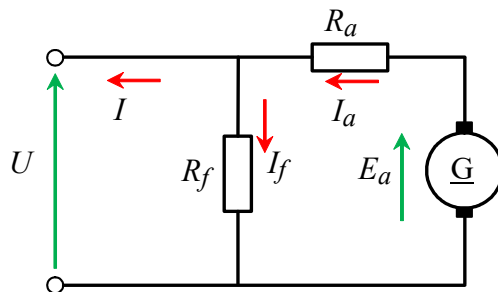
$$P_g = 640 + 1500 + 500 = 2640 \text{ W}.$$

Ulazna električna snaga i koeficijent korisnog dejstva pri opterećenju sa pola nominalnog momenta iznose:

$$P_{el} = U_n I_1 = 110 \cdot 143,8 = 15818 \text{ W},$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}} = \frac{P_{el} - P_g}{P_{el}} = \frac{15818 - 2640}{15818} = 83,3 \%.$$

b) Da bi ovaj motor sa paralelnom pobudom prešao u generatorski režim rada potrebna je pogonska mašina umesto radne mašine. Kako generator radi na mrežu nominalnog napona kao i motor, to će pobudna struja odnosno fluks u generatorskom režimu rada biti isti kao i u motorskom režimu rada. Struja pobude i fluks ostaju nepromenjeni, što za posledicu ima da su gubici u pobudnom namotaju i u gvožđu ostali isti kao u motorskom režimu rada. Struja armature u generatorskom režimu rada mora biti ista kao u motorskom režimu. Ekvivalentna šema generatora jednosmerne struje sa paralelnom pobudom prikazana je na slici 111.2.



Slika 111.2. Ekvivalentna šema generatora jednosmerne struje sa paralelnom pobudom.

Da bi se motor našao u generatorskom režimu rada sa nominalnom strujom armature, brzina obrtanja rotora se dobija iz jednačine naponske ravnoteže:

$$\omega_g = \frac{U_n + R_a I_{an}}{\psi_{fn}} = \frac{110 + 0,0295 \cdot 260,36}{1,007} = 116,86 \text{ rad/s} \Rightarrow n_g = \frac{60 \omega_g}{2\pi} = 1115,9 \text{ o/min.}$$

Elektromotorna sila generatora je:

$$E_g = \omega_n \psi_{fn} = \frac{2\pi \cdot 1115,9}{60} \cdot 1,007 = 117,67 \text{ V.}$$

Brzina obrtanja generatora nije puno veća od brzine obrtanja motora, pa je opravdano pretpostaviti da su gubici na trenje i ventilaciju u generatorskom režimu rada isti kao u motorskom. Uzevši u obzir sve rečeno o gubicima u generatorskom i motorskom režimu rada pri nominalnom opterećenju, zaključuje se da su gubici ostali nepromenjeni:

$$P_{gn} = P_{Fe} + P_{tv} + P_{Cufn} + P_{Cuan} = 640 + 1500 + 2000 = 4140 \text{ W.}$$

Struja i predana električna snaga generatora su:

$$I_g = I_{an} - I_{fn} = 260,36 - 13,636 = 246,72 \text{ A,}$$

$$P_{generatora} = U_n I_g = 110 \cdot 246,72 = 27,14 \text{ kW.}$$

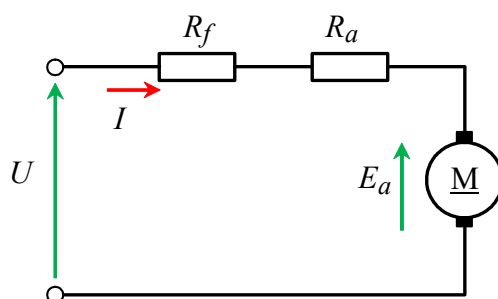
Koeficijent korisnog dejstva generatora je:

$$\eta = \frac{P_{generatora}}{P_{generatora} + P_{gn}} = \frac{27140}{27140 + 4140} = 86,7 \text{ \% .}$$

113. Zadatak: Motor za jednosmernu struju sa rednom pobudom ima nominalne podatke: 440 V, 260 A, 250 o/min, otpornost namotaja armature 0,1 Ω i otpornost namotaja pobude 0,06 Ω . Gubici u gvožđu i mehanički gubici se mogu zanemariti.

- Izvesti izraz i skicirati izgled mehaničke karakteristike motora.
- Ako se vratilo motora optereti radnom mašinom momenta $M_{RM} = 1500 \text{ Nm}$, odrediti snagu koju motor vuče iz mreže i brzinu obrtanja rotora.
- Šta treba uraditi da bi se rotor obrtao brzinom $n_n = 250 \text{ o/min}$ ako je motor opterećen momentom kao pod b).

Ekvivalentna šema motora jednosmerne struje sa rednom pobudom prikazana je na slici 113.1.



Slika 113.1. Ekvivalentna šema motora jednosmerne struje sa rednom pobudom.

- Kako su pobudni namotaj i armatura vezani na red, to je $I_a = I_f = I$. Ako se zanemari zasićenje magnetnog kola, tada je veza između fluksa i struje linearna:

$$\psi_f = M_{af} \cdot I_f = M_{af} \cdot I.$$

gde je M_{af} međusobna induktivnost.

Ako se iz jednačine naponske ravnoteže izrazi struja:

$$U = R_u I + \psi_f \omega = R_u I + M_{af} I \omega, \quad (113.1)$$

$$I = \frac{U}{R_u + \omega M_{af}},$$

gde je $R_u = R_a + R_f$ i smeni u jednačinu za momenat konverzije:

$$M_c = \psi_f \cdot I = M_{af} \cdot I^2, \quad (113.2)$$

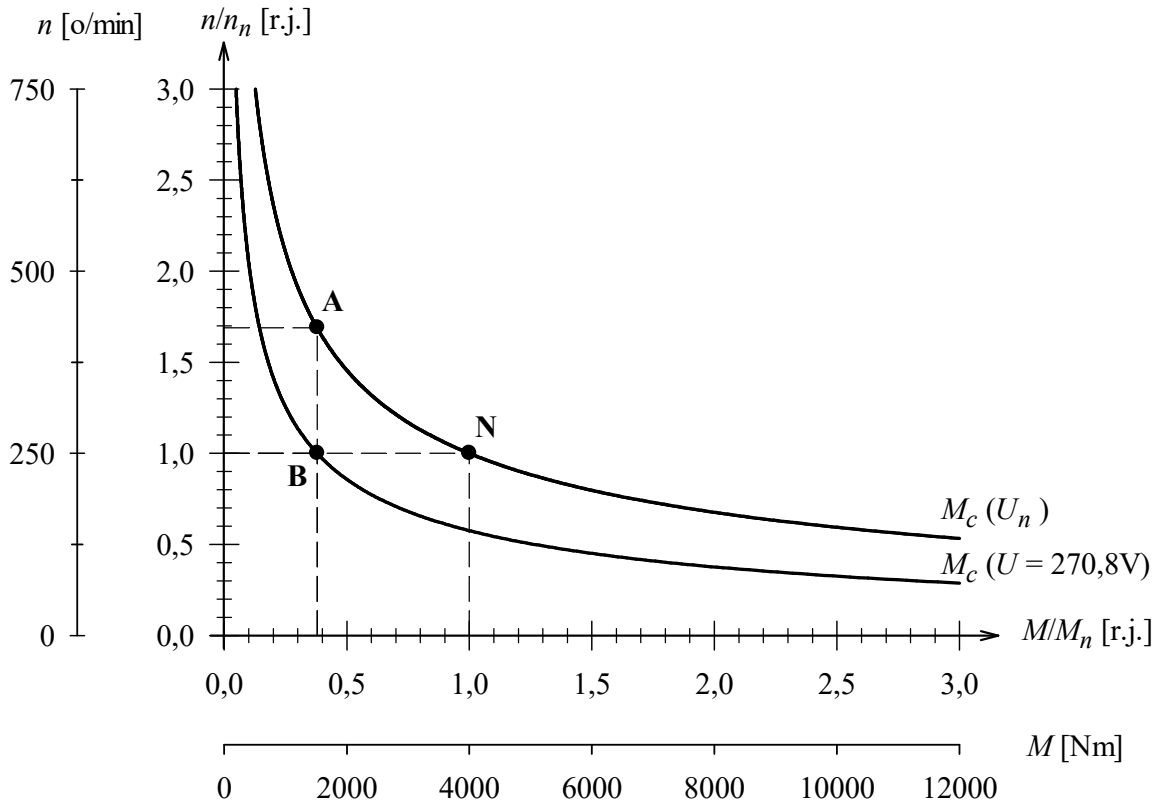
dobija se mehanička karakteristika motora jednosmerne struje sa rednom pobudom:

$$M_c = M_{af} \frac{U^2}{(\omega M_{af} + R_u)^2}, \quad (113.3)$$

ili inverzno:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{M_{af} \cdot M_c}} - \frac{R_u}{M_{af}}. \quad (113.4)$$

Mehanička karakteristika motora jednosmerne struje sa rednom pobudom prikazana je na slici 113.2.



Slika 113.2. Mehanička karakteristika motora jednosmerne struje sa rednom pobudom.

b) Iz jednačine naponske ravnoteže (113.1) u nominalnom režimu može se odrediti međusobna induktivnost:

$$M_{af} = \frac{1}{\omega_n} \left(\frac{U_n}{I_n} - R_u \right) = \frac{60}{2\pi \cdot 250} \left(\frac{440}{260} - 0,16 \right) = 0,05853 \text{ H}. \quad (113.5)$$

Brzina obrtanja se može odrediti pomoću mehaničke karakteristike date jednačinom (113.4):

$$\omega = \frac{U_n}{\sqrt{M_{af} \cdot M_c}} - \frac{R_u}{M_{af}} = \frac{440}{\sqrt{0,05853 \cdot 1500}} - \frac{0,16}{0,05853} = 44,225 \text{ rad/s} \Rightarrow n = \frac{60\omega}{2\pi} = 422,3 \text{ o/min}$$

tako da je relativna vrednost brzine obrtanja motora

$$n^* = \frac{n}{n_n} = \frac{422,3}{250} = 1,69 \text{ r.j.}$$

Nominalan momenat motora iznosi:

$$M_n = M_{af} \frac{U_n^2}{(\omega_n \cdot M_{af} + R_u)^2} = 0,05853 \cdot \frac{440}{\left(\frac{2\pi \cdot 250}{60} \cdot 0,05853 + 0,16 \right)^2} = 3956,61 \text{ Nm} ,$$

tako da je relativna vrednost momenta opterećenja motora:

$$m_c^* = \frac{M_{RM}}{M_n} = \frac{1500}{3956,61} = 0,38 \text{ r.j.}$$

Na mehaničkoj karakteristici motora na slici 113.2 naznačena je ova radna tačka **A** kao i nominalna radna tačka **N**.

Struja motora se može odrediti iz jednačine (113.2):

$$I_1 = \sqrt{\frac{M_{RM}}{M_{af}}} = \sqrt{\frac{1500}{0,05853}} = 160 \text{ A} . \quad (113.6)$$

Električna snage je:

$$P_{el} = U_n \cdot I_1 = 440 \cdot 160 = 70,4 \text{ kW} .$$

c) Pri datom opterećenju brzina obrtanja je veća od nominalne. Da bi se brzina smanjila na nominalnu vrednost pri datom momentu opterećenja potrebno je smanjiti napon. Potreban napon napajanja se može odrediti pomoću jednačine naponske ravnoteže:

$$U_2 = (R_u + M_{af}\omega_n) \cdot I_1 = \left(0,16 + 0,05853 \cdot \frac{2\pi \cdot 250}{60} \right) \cdot 160 = 270,8 \text{ V} . \quad (113.7)$$

Treba primetiti da je struja motora određena opterećenjem i ona se nije promenila u odnosu na deo zadatka pod b). Jednačinom (113.2) data je zavisnost momenta konverzije od kvadrata struje motora.

Na slici 113.2 naznačena je mehanička karakteristika motora koja odgovara ovom sniženom naponu, kao i radna tačka **B** koja se postiže pri datom momentu radne mašine i sniženom naponu napajanja.

114. Zadatak: Za motor jednosmerne struje sa rednom pobudom poznati su sledeći podaci $R_a = 0,02 \Omega$, $R_f = 0,08 \Omega$. Motor razvija pri nominalnoj struji od 40 A i brzini 1000 o/min momenat od $M_n = 160 \text{ Nm}$. Nominalni napon napajanja je 420 V.

- Ako se momenat opterećenja smanji na 80 Nm, odrediti novu brzinu i struju motora pri istom naponu napajanja motora.
- Koliki napon napajanja je potreban da bi se radna mašina sa linearnom zavisnošću momenta od brzine obrtanja obrtala sa $n_2 = 900 \text{ o/min}$? Radna mašina pri $n_3 = 1000 \text{ o/min}$ zahteva momenat od $M_{m3} = 120 \text{ Nm}$.

Međusobna induktivnost se može odrediti na osnovu poznatog nominalnog momenta i struje motora:

$$M_c = \psi_f \cdot I = M_{af} \cdot I^2 \Rightarrow M_{af} = \frac{M_n}{I_n^2} = \frac{160}{40^2} = 0,1 \text{ H.} \quad (114.1)$$

- Zadatim momentu opterećenja prema (114.1) odgovara struja od:

$$I_1 = \sqrt{\frac{M_m}{M_{af}}} = \sqrt{\frac{80}{0,1}} = 28,28 \text{ A.} \quad (114.2)$$

Brzina obrtanja se može odrediti iz jednačine naponske ravnoteže:

$$U_n = R_u I_1 + \psi_f \omega_1 = (R_u + M_{af} \omega_1) \cdot I_1. \quad (114.3)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{M_{af}} \left(\frac{U_n}{I_1} - R_u \right) = \frac{1}{0,1} \left(\frac{420}{28,28} - 0,028 \right) = 148,23 \text{ rad/s} \Rightarrow n_1 = \frac{60 \omega_1}{2\pi} = 1415,15 \text{ o/min},$$

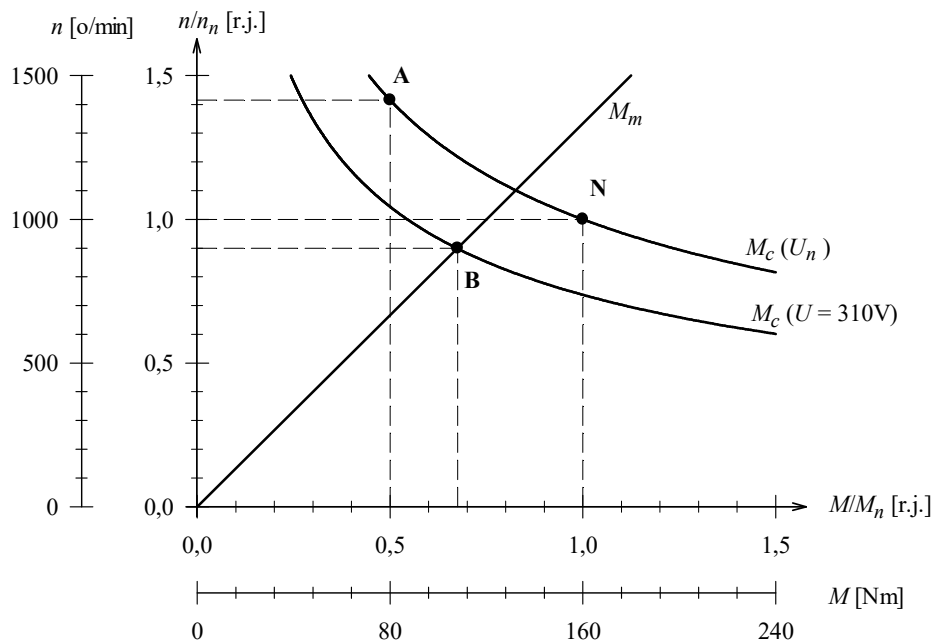
tako da je relativna vrednost brzine obrtanja motora pri momentu opterećenju od pola nominalnog momenta:

$$n^* = \frac{n}{n_n} = \frac{1415,15}{1000} = 1,415 \text{ r.j.}$$

Mehanička karakteristika ovog motora $M_c(\omega)$ pri nominalnom naponu napajanja je data na slici 114.1. Nominalna radna tačka je označena sa **N**. Radna tačka koja odgovara momentu opterećenja od 80 Nm označena je sa **A**.

- Prema uslovima iz postavke zadatka mehanički momenat radne mašine se menja linearno sa brzinom i pri brzini od 1000 o/min iznosi 120 Nm. Ova mehanička karakteristika radne mašine je takođe prikazana na slici 114.1.

Treba primetiti da mehanička karakteristika radne mašine ne prolazi kroz nominalnu radnu tačku motora. Ovo je posledica činjenice da se radna mašina projektuje za neki koristan rad, a elektromotor služi za obezbeđenje tog mehaničkog rada. Kao pogonski motor se bira standardni motor čiji nominalni momenat je isti ili veći od zahtevanog momenta radne mašine. Vrlo retki slučajevi su da je motor opterećen radnom mašinom tako da radi u nominalnom režimu.



Slika 114.1 Mehanička karakteristika motora jednosmerne struje sa rednom pobudom i karakteristika radne mašine M_m .

Mehanički momenat pri brzini od $n_2 = 0,9 \cdot n_n = 900$ o/min iznosi:

$$M_{m2} = M_{m3} \cdot \frac{n_2}{n_3} = 120 \cdot \frac{900}{1000} = 108 \text{ Nm}, \quad (114.4)$$

tako da je relativna vrednost momenta opterećenja motora:

$$m_c^* = \frac{M_{m2}}{M_n} = \frac{108}{160} = 0,675 \text{ r.j.}$$

Ovom momentu opterećenja odgovara struja motora:

$$I_2 = \sqrt{\frac{M_{m2}}{M_{af}}} = \sqrt{\frac{108}{0,1}} = 32,86 \text{ A}. \quad (114.5)$$

Potreban napon napajanja se može odrediti pomoću jednačine naponske ravnoteže:

$$U_2 = (R_u + M_{af} \omega_2) \cdot I_2 = \left(0,028 + 0,1 \cdot \frac{2\pi \cdot 900}{60} \right) \cdot 32,86 = 310,6 \text{ V}. \quad (114.6)$$

Mehanička karakteristika motora pri ovom naponu napajanja je takođe prikazana na slici 114.1, a stacionarna radna tačka je u preseku sa mehaničkom karakteristikom motora i označena je sa **B**.