

5. ENOSMERNI KOMUTATORSKI STROJI

Označevanje priključkov, vezalna shema in smer vrtenja:

Pri priključevanju stroja na omrežje in pri vezanju posameznih navitij med seboj moramo natančno vedeti, za katera navitja ali priključke gre. To je zlasti pomembno pri enosmernih komutatorskih strojih. Zato mora biti vsak priključek jasno in nedvoumno označen tako, da ga ne moremo zamenjati z drugim. Oznake priključkov povedo tudi smer, v katero se bo stroj vrtel.

Po priporočilih Mednarodne elektrotehnične zveze (IEC) se označevanje priključkov enosmernega komutatorskega stroja razlikuje od prejšnjega načina označevanja. Veliko strojev, ki so še v rabi, je označenih po starem načinu označevanja, zato bomo poleg označevanja po IEC podali pregled drugih načinov označevanja.

Splošna načela po katerih označujemo priključne sponke navitij so:

- Posamezna navitja so označena s po eno **veliko črko**.
- Prilkjuček ali priključna sponka na začetku, koncu ali na vmesnih odcepih navitja je označena s številčno pripono, ki označuje:
 - (črka)**1** – priključek na začetku navitja,
 - (črka)**2** – priključek na koncu navitja,
 - (črka)**3** – odcep navitja.
- Istovrstna navitja v skupini označujemo z isto črko in jih označimo s številčno predpono k črki:
 - 1**(črka) – prvo navitje,
 - 2**(črka) – drugo navitje.
- Navitja za enosmerni tok označujemo s črkami na začetku abecede, za izmenični tok pa s črkami s konca abecede.

Priklučka rotorskega komutatorskega navitja (indukta) s ščetkami sta označena s črko **A** (oz. A1 in A2).

Navitje komutacijskih polov je označeno s črko **B** (oz. B1 in B2); kompenzacijsko navitje označimo s črko **C** (oz. C1 in C2).

Vzbujalna navitja so označena:

- serijsko s črko **D**,
- paralelno s črko **E**,
- tuje s črko **F**.

Posebne izvedbe komutatorskih strojev na prečno polje imajo še vzdolžno pomožno navitje označeno s črko **H** in prečno pomožno navitje označeno s črko **J**.

Razpredelnica označb po IEC (nove oznake) in VDE-JUS (stare oznake):

NAVITJE	IEC		VDE (JUS)	
	OZNAKA NAVITJA	PRIKLJUČNI SPONKI	OZNAKA NAVITJA	PRIKLJUČNI SPONKI
Induktovo navitje (rotor)	A	A1 A2	-	A B
Komutacijsko navitje	B	B1 B2	-	G H
Kompenzacijsko navitje	C	C1 C2	-	-
Serijsko vzbujalno navitje	D	D1 D2	-	E F
Paralelno vzbujalno navitje	E	E1 E2	-	C D
Tuje vzbujalno navitje	F	F1 F2	-	J K
Pomož. vzbujalno nav. v vzdolžni osi	H	H1 H2	-	-
Pomož. vzbujalno nav. v prečni osi	J	J1 J2	-	-

Smer vrtenja

Smer vrtenja električnega stroja opazujemo na gredi stroja. Gred se vrti v desno, če se vrti v smeri urinega kazalca pri pogledu na stroj s strani, kjer gleda gred iz stroja, oziroma s strani stroja, ki je nasprotna kolektorju s ščetkami.

Pri vseh enosmernih komutatorskih strojih je smer vrtenja določena z medsebojnimi povezavami vzbujalnih navitij na statorju in povezavo induktovega komutatorskega navitja na rotorju.

Desno smer vrtenja motorja dobimo, če teče tok od priključkne sponke z manjšo številčno pripono skozi navitje k sponki z večjo številčno pripono. Pri generatorjih dobimo desno smer vrtenja, če je samo v komutatorskem navitju smer toka od sponk z večjo številčno pripono k sponкам z manjšo številčno pripono, v vzbujalnih navitjih pa ostane kot pri motorju. Smer vrtenja obrnemo, če zamenjamo priključke komutatorskega (induktovega) navitja.

Vzbujanje enosmernih komutatorskih strojev

Enosmerne komutatorske stroje ločimo po načinu vzbujanja na stroje s:

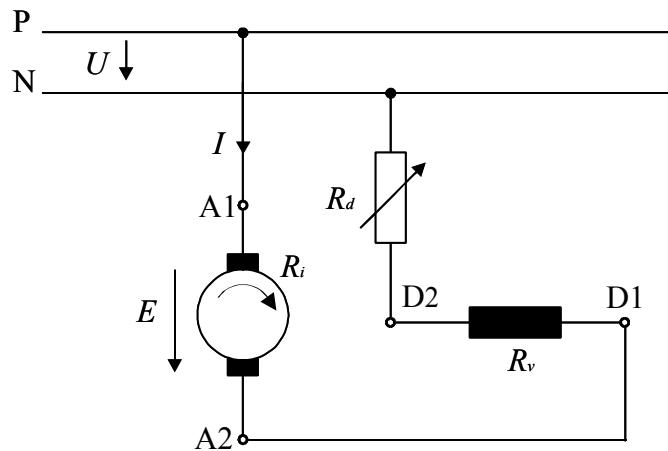
- serijskim,
- paralelnim in
- tujim

vzbujanjem.

Enosmerni komutatorski motor

Vezalna shema in osnovne enačbe:

Serijski motor – nezasičen:



Predpostavljamo, da v delovnem območju motor obratuje v linearjem delu magnetilne karakteristike, kar pomeni, da je med magnetnim pretokom Φ_{gl} in vzbujalnim tokom I_v (ki je istočasno tok v induktu – rotorskem navitju) sorazmernost:

$$\Phi_{gl} = k_\Phi \cdot I_v = k_\Phi \cdot I, \quad (1)$$

$$I_v = I_i = I.$$

Inducirana napetost:

$$E = k_e \cdot n \cdot \Phi_{gl}, \quad (2)$$

k_e ... strojna konstanta inducirane napetosti (E [V], n [min^{-1}]),

$$k_e = \frac{p}{a} \cdot \frac{z}{60},$$

p ... število polovih parov,
 z ... število vodnikov v induktu,
 a ... število paralelnih vej.

Ker velja enačba (1), bo:

$$E = k_e \cdot k_\Phi \cdot n \cdot I. \quad (2a)$$

Vrtilni moment motorja je:

$$M_m = k_m \cdot \Phi_{gl} \cdot I = k_m \cdot k_\Phi \cdot I^2, \quad (3)$$

k_m ... strojna konstanta vrtilnega momenta (M [Nm], I [A]),

$$k_m = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{z}{a}.$$

Enačba napetostnega ravnotežja:

$$U = E + I \cdot R_c + \Delta U_{sc}, \quad (4)$$

R_c ... celotna upornost tokokroga,

$$R_c = R_i + R_v + R_d,$$

R_i ... upornost rotorskega navitja (indukta),

R_v ... upornost vzbujalnega navitja,

R_d ... dodatna upornost.

Motorsko enačbo ($n = f(I)$) izpeljemo iz enačb (2a) in (4):

$$n = \frac{U - I \cdot R_c - \Delta U_{sc}}{k_e \cdot k_\Phi \cdot I} = \frac{U}{k_e \cdot k_\Phi \cdot I} - \frac{I \cdot R_c + \Delta U_{sc}}{k_e \cdot k_\Phi \cdot I}. \quad (5)$$

Motorska enačba v obliki $n = f(M_m)$:

$$n = \frac{\frac{U}{k_e \cdot k_\Phi \cdot \sqrt{\frac{M_m}{k_m \cdot k_\Phi}}} - \frac{\sqrt{\frac{M_m}{k_m \cdot k_\Phi}} \cdot R_c + \Delta U_{sc}}{k_e \cdot k_\Phi \cdot \sqrt{\frac{M_m}{k_m \cdot k_\Phi}}}}{\frac{U}{k_e \cdot k_\Phi \cdot \sqrt{\frac{M_m}{k_m \cdot k_\Phi}}} - \frac{\sqrt{\frac{M_m}{k_m \cdot k_\Phi}}}{k_e \cdot k_\Phi \cdot \sqrt{\frac{M_m}{k_m \cdot k_\Phi}}}},$$

če je $\Delta U_{sc} \equiv 0$:

$$n = \frac{\frac{U}{k_e \cdot k_\Phi \cdot \sqrt{M_m}} - \frac{R_c}{k_e \cdot k_\Phi}}{\frac{U}{k_e \cdot k_\Phi \cdot \sqrt{k_m \cdot k_\Phi}} - \frac{\sqrt{M_m}}{k_e \cdot k_\Phi}}. \quad (5a)$$

Popolnoma zasičen serijski motor:

Magnetni pretok je konstanten:

$$\Phi_{gl} = \Phi_z = \text{konst.} \neq f(I).$$

Stroj se obnaša kot motor s tujim, od obremenitve neodvisnim vzbujanjem. V tem primeru imajo enačbe od (2) do (5) obliko:

$$E = k_e \cdot n \cdot \Phi_z,$$

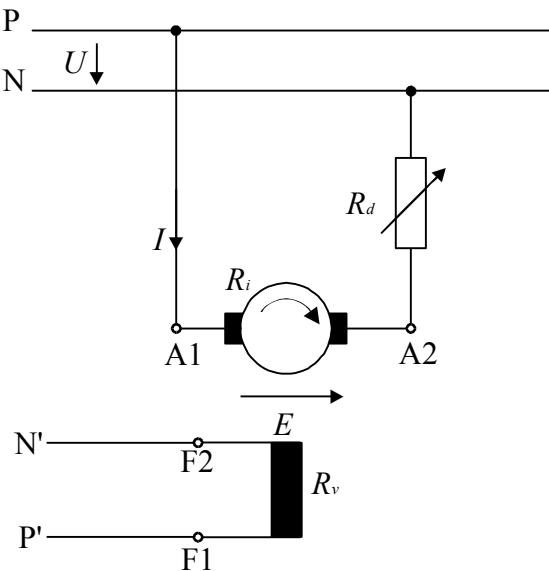
$$M_m = k_m \cdot \Phi_z \cdot I,$$

$$U = E + I \cdot R_c + \Delta U_{\text{šč}},$$

$$n = \frac{U - I \cdot R_c - \Delta U_{\text{šč}}}{k_e \cdot \Phi_z} = \frac{U - I \cdot R_c - \Delta U_{\text{šč}}}{c_e},$$

c_e [V/min⁻¹] ... faktor inducirane napetosti pri konstantnem magnetnem pretoku.

Motor s tujim vzbujanjem:

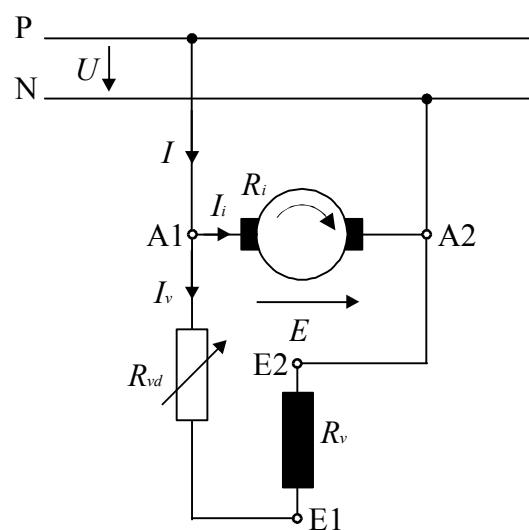


$$E = k_e \cdot n \cdot \Phi_{gl} = c_e \cdot n, \quad \Phi_{gl} = \text{konst.},$$

$$U = E + I_i \cdot R_{ic} + \Delta U_{\text{šč}}, \quad R_{ic} = R_i + R_d,$$

$$n = \frac{U - I_i \cdot R_{ic} - \Delta U_{\text{šč}}}{c_e}.$$

Motor s paralelnim vzbujanjem:



$$E = k_e \cdot n \cdot \Phi_{gl},$$

$$M_m = k_m \cdot \Phi_{gl} \cdot I_i,$$

$$U = E + I_i \cdot R_i + \Delta U_{sc},$$

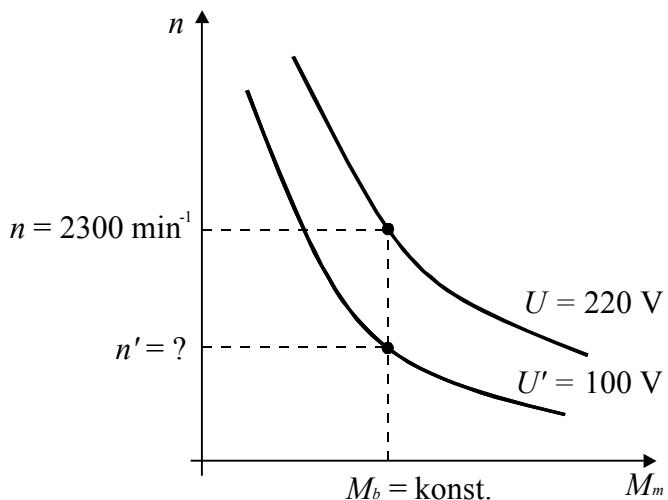
$$n = \frac{U - I_i \cdot R_i - \Delta U_{sc}}{k_e \cdot \Phi_{gl}}.$$

Tok iz omrežja:

$$I = I_i + I_v.$$

NALOGA 5.1:

Enosmerni serijski motor je priključen na napetost 220 V in obremenjen s konstantnim bremenskim momentom tako, da ima 2300 min^{-1} . Karakteristika praznega teka pri $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ je do napetosti $E = 200 \text{ V}$ praktično linearна. Kakšno število vrtljajev ima motor, če ga pri istem bremenskem momentu priključimo na omrežje $U' = 110 \text{ V}$ in če predpostavimo, da je reakcija indukta zanemarljiva, padec napetosti v induktu in na serijskem vzbujальнem navitju ter ščetkah skupaj pri prvotnem bremenu pa je 10 V?



$$E = k_e \cdot n \cdot \Phi_{gl} = 220 - 10 = 210 \text{ V} \quad (= U - I_i \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{sc}).$$

Stroj je magnetno nezasičen, zato je:

$$M_m = k_m \cdot \Phi_{gl} \cdot I = k_m \cdot k_\Phi \cdot I^2.$$

Ker je bremenski moment konstanten

$$M_b = M_b',$$

je tudi vrtilni moment motorja konstanten

$$M_m = M_m' ,$$

zato je tok $I' = I$!

$$\frac{M_m'}{M_m} = \frac{M_b'}{M_b} = \left(\frac{I'}{I}\right)^2 = \text{konst.}$$

Sledi, da so tudi napetostni padci konstantni:

$$E' = k_e \cdot n' \cdot \Phi_{gl}' = U' - I' \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\dot{s}c} ,$$

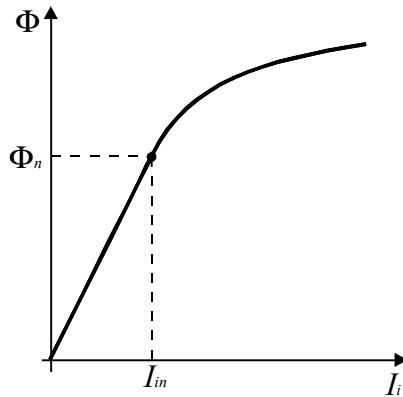
$$\frac{E'}{E} = \frac{k_e \cdot n' \cdot \Phi_{gl}'}{k_e \cdot n \cdot \Phi_{gl}} = \frac{k_e \cdot k_\Phi \cdot n' \cdot I'}{k_e \cdot k_\Phi \cdot n \cdot I} = \frac{n'}{n} ,$$

$$\frac{E'}{E} = \frac{U' - I' \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\dot{s}c}}{U - I \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\dot{s}c}} = \frac{110 - 10}{220 - 10} = \frac{n'}{n} ,$$

$$n' = n \cdot \frac{E'}{E} = 2300 \cdot \frac{100}{210} = \underline{\underline{1095 \text{ min}^{-1}}} .$$

NALOGA 5.2:

Enosmerni komutatorski motor z zaporednim (serijskim) vzbujanjem, nazivne moči $P_n = 1 \text{ kW}$, $U_n = 220 \text{ V}$, $n_n = 800 \text{ min}^{-1}$, $\Delta U_{\dot{s}c} = 2 \text{ V}$, ima pri nazivni obremenitvi 9 V padca napetosti na induktovem (rotorskem) in vzbujalnem navitju. Določite vrtilno hitrost motorja pri obremenitvi z $M_b = 0.81 \cdot M_n$ na enosmerjem omrežju $U' = 230 \text{ V}$. Reakcijo indukta zanemarite! Predpostavite, da motor pri nazivni obremenitvi dela še v linearinem delu KPT!



$$M_m = k_m \cdot \Phi_{gl} \cdot I_i = k_m \cdot k_\Phi \cdot I^2 \quad \dots \text{v nezasičenem delu magnetilne krivulje},$$

$$\Delta U_{\dot{s}c} = 2 \text{ V}, \quad I_{in} \cdot (R_i + R_v) = 9 \text{ V} \quad \dots \text{padec napetosti}.$$

Vrtilni moment motorja:

$$\frac{M_m'}{M_{mn}} = \frac{M_b'}{M_{bn}} = \frac{0.81 \cdot M_{mn}}{M_{mn}} = 0.81 ,$$

$$\frac{M_m'}{M_{mn}} = \frac{k_m \cdot k_\Phi \cdot I_i'^2}{k_m \cdot k_\Phi \cdot I_{in}^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{I_i'}{I_{in}} = \sqrt{\frac{M_m'}{M_{mn}}} = \sqrt{0.81} = 0.9.$$

Napetosti:

$$E' = k_e \cdot n' \cdot \Phi_{gl}' = k_e \cdot k_\Phi \cdot n' \cdot I_i',$$

$$E_n = k_e \cdot n_n \cdot \Phi_{gl} = k_e \cdot k_\Phi \cdot n_n \cdot I_{in},$$

$$\frac{E'}{E_n} = \frac{n' \cdot I_i'}{n_n \cdot I_{in}} = \frac{n'}{n_n} \cdot \sqrt{\frac{M_m'}{M_{mn}}} = \frac{n'}{n_n} \cdot 0.9 \quad \Rightarrow \quad n' = \frac{1}{0.9} \cdot n_n \cdot \frac{E'}{E_n},$$

$$\frac{E'}{E_n} = \frac{U' - I_i' \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\dot{s}\dot{c}}}{U - I_{in} \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\dot{s}\dot{c}}} = \frac{U' - \sqrt{\frac{M_m'}{M_{mn}}} \cdot I_{in} \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\dot{s}\dot{c}}}{U - I_{in} \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\dot{s}\dot{c}}},$$

$$\frac{E'}{E_n} = \frac{230 - 0.9 \cdot 9 - 2}{220 - 9 - 2} = \underline{\underline{1.052 \text{ V}}},$$

$$n' = \sqrt{\frac{M_{mn}}{M_m'}} \cdot n_n \cdot \frac{E'}{E_n},$$

$$n' = \frac{1}{0.9} \cdot 800 \cdot 1.052 = \underline{\underline{935 \text{ min}^{-1}}}.$$

NALOGA 5.3:

Enosmerni serijsko vzbujani komutatorski motor nazivne moči P_n , nazivne napetosti U_n , nazivne vrtilne hitrosti n_n , ima $\Delta U_{\dot{s}\dot{c}}$ padca napetosti na ščetkah ter $I_i \cdot (R_i + R_v)$ padca napetosti na rotorskem (induktovem) in vzbujальнem navitju skupaj. Motor je v popolnoma:

- a) magnetn nezasičenem stanju,
- b) magnetno zasičenem stanju.

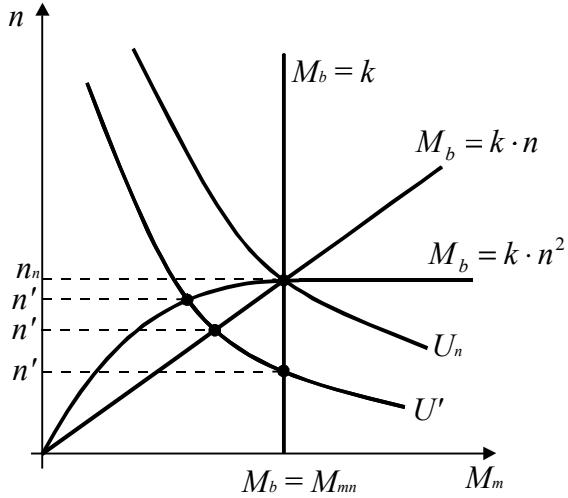
Obremenimo ga z momentom bremena, ki ima:

- 1) kvadratično odvisnost bremenskega momenta $M_b = k \cdot n^2$,
- 2) linearno odvisnost bremenskega momenta $M_b = k \cdot n$,
- 3) konstanten bremenski moment $M_b = k$.

Določite vrtilno hitrost pri obratovanju motorja z različnimi bremenii pri znižani napetosti U' !

a) Nezasičen stroj: $\Rightarrow \Phi_{gl} = k_\Phi \cdot I$,

$$\frac{M_m'}{M_{mn}} = \frac{k_m \cdot \Phi_{gl}'}{k_m \cdot \Phi_{gl}} \cdot \frac{I'}{I_n} = \frac{k_m \cdot k_\Phi}{k_m \cdot k_\Phi} \cdot \left(\frac{I'}{I_n} \right)^2 = \left(\frac{I'}{I_n} \right)^2.$$



1) $M_b = k \cdot n^2$:

$$\frac{M_b'}{M_{bn}} = \frac{k \cdot n'^2}{k \cdot n_n^2},$$

$$\frac{M_b'}{M_{bn}} = \frac{M_m'}{M_{mn}},$$

zato je:

$$\left(\frac{n'}{n_n} \right)^2 = \left(\frac{I'}{I_n} \right)^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{n'}{n_n} = \frac{I'}{I_n},$$

$$\frac{E'}{E_n} = \frac{U' - I \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\text{šč}}}{U_n - I_n \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\text{šč}}} = \frac{n'}{n_n} \cdot \frac{I'}{I_n},$$

$$\frac{E'}{E_n} = \left(\frac{n'}{n_n} \right)^2.$$

2) $M_b = k \cdot n$:

$$\frac{M_b'}{M_{bn}} = \frac{k \cdot n'}{k \cdot n_n} = \frac{M_m'}{M_{mn}},$$

$$\frac{n'}{n_n} = \left(\frac{I'}{I_n} \right)^2,$$

$$\frac{E'}{E_n} = \frac{n'}{n_n} \cdot \sqrt{\frac{n'}{n_n}}.$$

3) $M_b = k :$

$$\frac{M_b'}{M_{bn}} = 1 = \frac{M_m'}{M_{mn}},$$

$$\frac{n'}{n_n} = 1,$$

$$\frac{E'}{E_n} = \frac{n'}{n_n}.$$

b) Zasičen stroj: $\Rightarrow \Phi_{gl}' = \Phi_{gl}$ = konstanten magnetni pretok!

$$\frac{E'}{E} = \frac{k_e \cdot n' \cdot \Phi_{gl}'}{k_e \cdot n \cdot \Phi_{gl}} = \frac{n'}{n}.$$

Moment motorja:

$$\frac{M_m'}{M_{mn}} = \frac{k_m \cdot \Phi_{gl}'}{k_m \cdot \Phi_{gl}} \cdot \frac{I'}{I_n} = \frac{I'}{I_n}.$$

Bremenski moment:

1) $M_b = k \cdot n^2 :$

$$\frac{M_b'}{M_{bn}} = \frac{k \cdot n'^2}{k \cdot n_n^2},$$

$$\frac{M_b'}{M_{bn}} = \frac{M_m'}{M_{mn}},$$

zato je:

$$\left(\frac{n'}{n_n} \right)^2 = \frac{I'}{I_n},$$

$$I' = \frac{M_m'}{M_{mn}} \cdot I_n = \frac{M_b'}{M_{bn}} \cdot I_n = \left(\frac{n'}{n_n} \right)^2 \cdot I_n,$$

$$\frac{E'}{E_n} = \frac{n'}{n_n} = \frac{U' - I' \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{sc}}{U_n - I_n \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{sc}},$$

$$\frac{n'}{n_n} = \frac{U' - \left(\frac{n'}{n_n}\right)^2 \cdot I_n \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\text{sc}}}{U_n - I_n \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\text{sc}}}.$$

2) $M_b = k \cdot n$:

$$I' = \frac{M_m'}{M_{mn}} \cdot I_n = \frac{M_b'}{M_{bn}} \cdot I_n = \frac{n'}{n_n} \cdot I_n,$$

$$\frac{n'}{n_n} = \frac{U' - \frac{n'}{n_n} \cdot I_n \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\text{sc}}}{U_n - I_n \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\text{sc}}}.$$

3) $M_b = k$:

$$I' = \frac{M_m'}{M_{mn}} \cdot I_n = \frac{M_b'}{M_{bn}} \cdot I_n = I_n,$$

$$\frac{n'}{n_n} = \frac{U' - I_n \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\text{sc}}}{U_n - I_n \cdot (R_i + R_v) - \Delta U_{\text{sc}}}.$$

NALOGA 5.4:

Enosmerni komutatorski motor s tujim vzbujanjem nazivne moči $P_n = 5 \text{ kW}$, $U_n = 220 \text{ V}$, $n_n = 1150 \text{ min}^{-1}$, 28.4 A , $R_i = 0.528 \Omega$, priklopimo na omrežje nazivne napetosti. Določite vrtilno hitrost idealnega praznega teka, če se magnetni tok oz. magnetni pretok zmanjša na polovico nazivnega. V induktov tokokrog vključimo dodatni upor $R_d = 3 \Omega$. Določite vrtilno hitrost motorja pri obremenitvi s polovičnim nazivnim momentom ($U' = U_n$, $\Phi' = \frac{1}{2} \cdot \Phi_n$, $M_b' = \frac{1}{2} \cdot M_{mn}$)! Reakcijo indukta in ΔU_{sc} zanemarimo!

a) Enačba napetostnega ravnotežja:

$$U = E + I_i \cdot R_i.$$

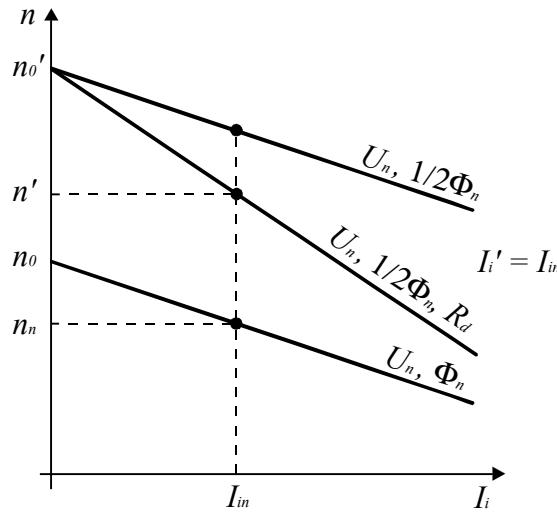
Inducirana napetost idealnega praznega teka:

$$E_0 = k_e \cdot n_0 \cdot \Phi_{gl} = c_e \cdot n_0.$$

Faktor inducirane napetosti:

$$c_e = \frac{E_n}{n_n} = \frac{U_n - I_{in} \cdot R_i}{n_n} = \frac{220 - 28.4 \cdot 0.528}{1150} = 0.1783 \frac{\text{V}}{\text{min}^{-1}},$$

$$E_0 = E_0' = U = 220 \text{ V},$$



Vrtilna hitrost idealnega praznega teka pri nazivni napetosti in nazivnem magnetnem pretoku

$$n_0 = \frac{U_n}{c_e} = \frac{220}{0.1783} = 1234 \text{ min}^{-1},$$

$$\frac{E_0'}{E_0} = \frac{k_e \cdot n_0 \cdot \Phi_{gl}'}{k_e \cdot n_0 \cdot \Phi_{gln}},$$

Če je magnetni pretok $\Phi_{gl}' = 1/2 \cdot \Phi_{gln}$, bo vrtilna hitrost praznega teka:

$$n_0' = n_0 \cdot \frac{E_0'}{E_0} \cdot \frac{\Phi_{gln}}{\Phi_{gl}} = 1234 \cdot \frac{1}{1/2} = \underline{\underline{2468 \text{ min}^{-1}}}.$$

b) $U = U_n$

$$n' = \frac{U_n - I_i' \cdot (R_i + R_d)}{k_e \cdot \Phi_{gl}'},$$

$$n_n = \frac{U_n - I_{in} \cdot R_i}{k_e \cdot \Phi_{gln}},$$

$$\frac{n'}{n_n} = \frac{U_n - I_i' \cdot (R_i + R_d)}{U_n - I_{in} \cdot R_i} \cdot \frac{\Phi_{gln}}{1/2 \cdot \Phi_{gl}},$$

$$\frac{M_b'}{M_{bn}} = \frac{M_m'}{M_{mn}} = \frac{k_m \cdot \Phi_{gl}' \cdot I_i'}{k_m \cdot \Phi_{gln} \cdot I_{in}} = \frac{1}{2},$$

Ker je $\Phi_{gl}' = 1/2 \cdot \Phi_{gln}$ sledi $I_i' = I_{in}$!

$$n' = 2 \cdot n_n \cdot \frac{U_n - I_{in} \cdot (R_i + R_d)}{U_n - I_{in} \cdot R_i} = 2 \cdot 1150 \cdot \frac{220 - 28.4 \cdot (0.528 + 3)}{220 - 28.4 \cdot 0.528} = \underline{\underline{1344 \text{ min}^{-1}}}.$$

NALOGA 5.5:

Tuje vzbujani komutatorski motor z nazivnimi podatki: $P_n = 200 \text{ kW}$, 440 V , 1000 min^{-1} , ima upornost rotorja R_r , pomožnih polov R_{pp} in kompenzacijnska navitja R_{komp} skupaj $R_c = 0.048 \Omega$. Padec napetosti na ščetkah $\Delta U_{sc} = 2 \text{ V}$. Kakšno hitrost mora imeti stroj, če želimo, da obratuje kot generator in da ima 440 V na sponkah pri nazivnem bremenskem toku? Izkoristek motorja znaša $\eta_n = 0.91$.

Nazivni rotorski tok motorja (tok, ki ga motor jemlje iz omrežja pri nazivni obremenitvi; tok tujega vzbujanja zanemarimo)

$$I_{nM} = \frac{P_n}{U_n \cdot \eta_n} = \frac{200 \cdot 10^3}{440 \cdot 0.91} = \underline{\underline{500 \text{ A}}} = I_i.$$

Inducirana napetost v rotorskem navitju pri motorskem režimu obratovanja (pri nazivni obremenitvi):

$$E_M = U - I_i \cdot R_c - \Delta U_{sc} = 440 - 500 \cdot 0.048 - 2 = \underline{\underline{414 \text{ V}}}.$$

Če želimo, da bo imel stroj v generatorskem režimu obratovanja pri nazivni obremenitvi napetost na sponkah 440 V , mora biti njegova inducirana napetost E_G po velikosti enaka:

$$E_G = U + I_i \cdot R_c + \Delta U_{sc} = 440 + 500 \cdot 0.048 + 2 = \underline{\underline{466 \text{ V}}}.$$

Višjo inducirano napetost tuje vzbujanega generatorja pri enakem vzbujальнem toku dosežemo s povečanjem vrtilne hitrosti:

$$E = k \cdot n \cdot \Phi ; \quad \Phi = \text{konst.}, \text{ zato sledi:}$$

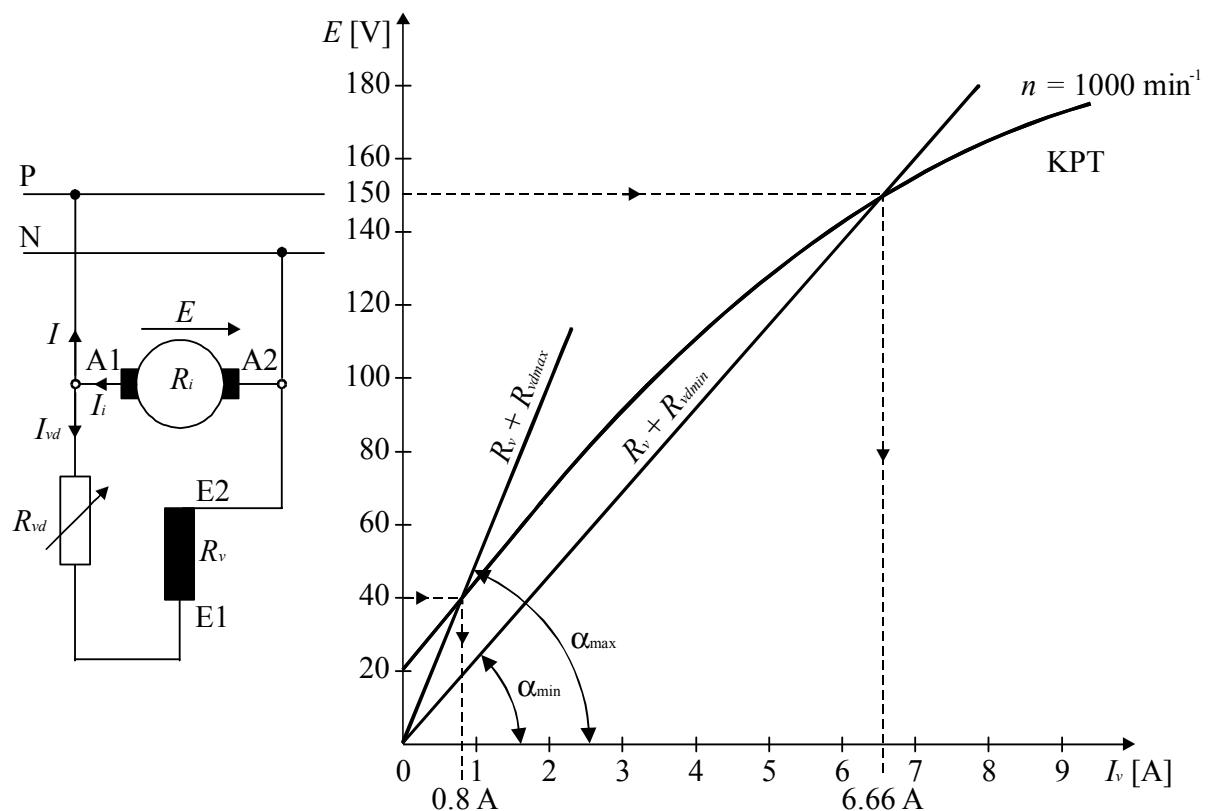
$$\frac{E_M}{E_G} = \frac{n_M}{n_G} \quad n_G = n_M \cdot \frac{E_G}{E_M} = 1000 \cdot \frac{466}{414} = \underline{\underline{1126 \text{ min}^{-1}}}.$$

NALOGA 5.6:

Enosmerni generator s paralelnim vzbujanjem ima naslednjo karakteristiko praznega teka pri $n = 1000 \text{ min}^{-1}$:

$E \text{ [V]}$	20	45	72	99	119	133	144	152	158	162
$I_v \text{ [A]}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Upornost vzbujальнega navitja je $R_v = 18.5 \Omega$. Določite minimalno in maksimalno vrednost dodatnega upora R_{vd} , ki ga moramo vključiti v vzbujальнi tokokrog tako, da se lahko napetost praznega teka spreminja od 40 do 150 V!



Paralelni generator se pri določenem številu vrtljajev sam vzbudi na napetost praznega teka. Velikost te inducirane napetosti je odvisna od vrtilne hitrosti n in od magnetnega pretoka Φ_{gl} . Magnetni pretok je odvisen od toka v vzbujальнem navitju, ki ga nastavljamo z dodatnim spremenljivim uporom R_{vd} (skica). Nalogo rešimo grafično: izrišemo karakteristiko praznega teka generatorja za podano vrtilno hitrost. Pri zahtevanih točkah (40 in 150 V) vrišemo v KPT uporovne premice in določimo potreben vzbujalni tok.

Za 150 V je v vzbujальнem tokokrogu celotna upornost:

$$R_{vcel} = \frac{E}{I_{v150}} = \frac{150}{6.66} = 22.5 \Omega ; \quad R_{vd\min} = R_{vcel} - R_v = \underline{\underline{4 \Omega}} .$$

Za 40 V pa je v vzbujальнem tokokrogu celotna upornost:

$$R_{vcel} = \frac{E}{I_{v40}} = \frac{150}{0.8} = 50 \Omega ; \quad R_{vd\min} = R_{vcel} - R_v = \underline{\underline{31.5 \Omega}} .$$

NALOGA 5.7:

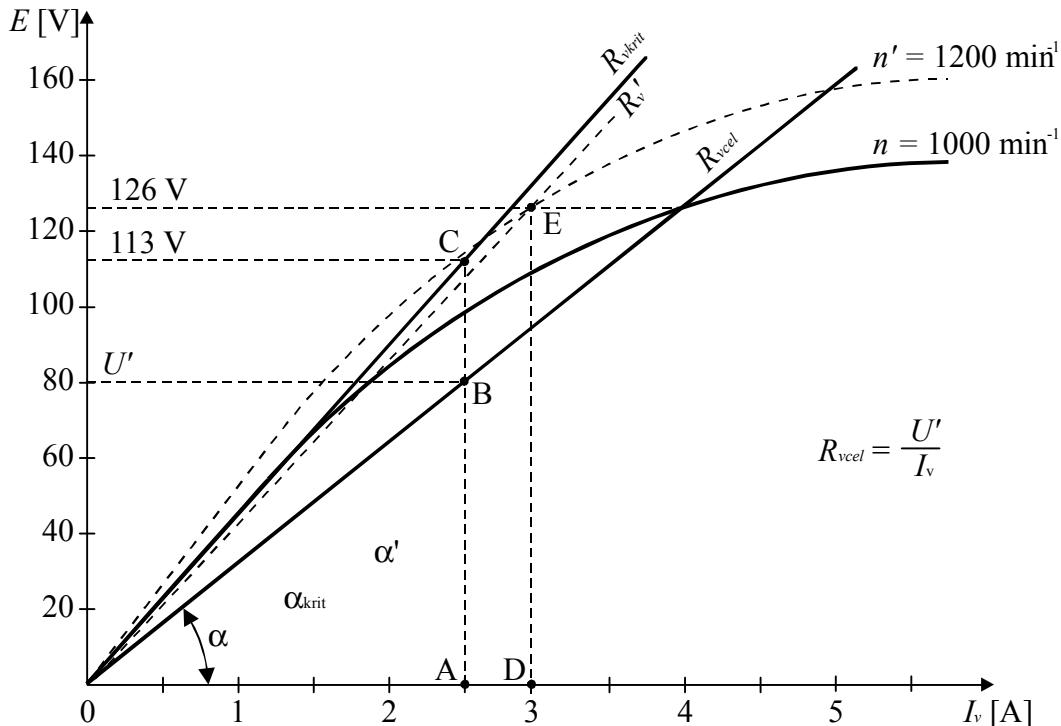
Enosmerni generator s paralelnim vzbujanjem ima pri vrtilni hitrosti $n_0 = 1000 \text{ min}^{-1}$ naslednjo karakteristiko praznega teka:

$E [\text{V}]$	20	41	62	81	100	110	120	140
$I_v [\text{A}]$	0.5	1	1.5	2	2.6	3.1	3.7	5.7

- a) Do katere napetosti se bo generator vzbudil v praznem teku, če znaša celotna upornost v vzbujальнem tokokrogu $R_{vcel} = R_v + R_{vd} = 32 \Omega$?
- b) Koliko znaša kritična upornost pri $n_0 = 1000 \text{ min}^{-1}$?
- c) Kolikšno upornost je še potrebno dodati v vzbujальнi tokokrog, če želimo, da se pri povečanju hitorstvi vrtenja na $n = 1200 \text{ min}^{-1}$ inducira napetost kot v primeru a)?
- a) Narišemo karakteristiko praznega teka. Legi uporovne premice dobimo tako, da pri poljubnem vzbujальнem toku izračunamo potrebno napetost, ki požene ta tok skozi upornost R_{vcel} – npr:

$$U' = R_{vcel} \cdot I = 32 \cdot 2.5 = 80 \text{ V}.$$

Iz presečišča KPT in uporovne premice odčitamo $E_0 = 126 \text{ V}$.



- b) Pri kritični upornosti vzbujальнega tokokroga je uporovna premica tangenta na karakteristiko praznega teka iz izhodišča koordinatnega sistema.

$$R_{vkr} = \frac{\overline{AC}}{\overline{OA}} = \frac{E(\overline{AC})}{I_v(\overline{OA})} = \frac{113}{2.5} = 45.2 \Omega.$$

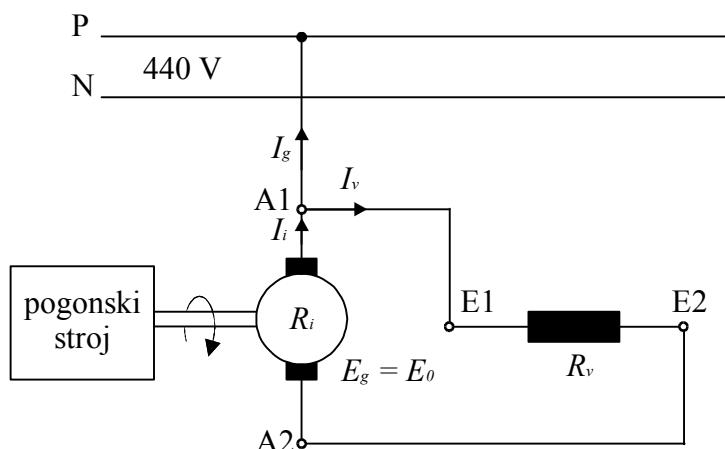
c) KPT preračunamo na novo vrtilno hitrost $n = 1200 \text{ min}^{-1}$; izrišemo novo karakteristiko praznega teka ter po že znanem postopku določimo R_v' oziroma R_d :

$$R_v' = \tan \alpha' = \frac{\overline{DE}}{\overline{OD}} = \frac{126}{3} = 42 \Omega,$$

$$R_d = R_v' - R_{vcel} = 42 - 32 = 10 \Omega.$$

NALOGA 5.8:

Enosmerni generator s paralelnim vzbujanjem ima podatke: $P_g = 100 \text{ kW}$, $U_n = 440 \text{ V}$, $n_n = 452 \text{ min}^{-1}$, upornost vzbujjalnega navitja $R_v = 100 \Omega$, upornost indukta (rotorskega navitja) $R_i = 0.1 \Omega$ in je priključen na enosmerno omrežje. Pri okvari pogonskega stroja generator začne obratovati kot motor in jemlje iz omrežja moč $P_{mot} = 10 \text{ kW}$. S kakšno hitrostjo se bo vrtel?



Nazivni tok generatorja:

$$I_g = \frac{P_g}{U_n} = \frac{100 \cdot 10^3}{440} = 227 \text{ A}.$$

Vzbujalni tok:

$$I_v = \frac{U_n}{R_v} = \frac{440}{100} = 4.4 \text{ A}.$$

Tok indukta pri nazivni obremenitvi:

$$I_i = I_{gn} + I_v = 227 + 4.4 = 231.4 \text{ A}.$$

Inducirana napetost generatorja pri nazivni obremenitvi (brez upoštevanja padca napetosti na ščetkah):

$$E_0 = U_n + I_i \cdot R_i = 440 + 231.4 \cdot 0.1 = 463.1 \text{ V}.$$

Ob izpadu pogonskega stroja preide pri nespremenjeni omrežni napetosti preide enosmerni komutatorski stroj iz generatorskega v motorski režim obratovanja in iz omrežja vleče tok:

$$I_{mot} = \frac{P_{mot}}{U_n} = \frac{10 \cdot 10^3}{440} = 22.7 \text{ A}.$$

Tok v induktu motorja pri novih obratovalnih pogojih:

$$I_i = I_{mot} - I_v = 22.7 - 4.4 = 18.3 \text{ A}.$$

V motorju se inducira napetost:

$$E_0' = U_n - I_i \cdot R_i = 440 - 18.3 \cdot 0.1 = 438.2 \text{ V}.$$

Vrtilno hitrost izračunamo iz induciranih napetosti v generatorskem in motorskem režimu obratovanja:

$$E_0 = k \cdot \Phi \cdot n = k \cdot n \quad (\text{napetost omrežja } U_n = \text{konst.}, \text{ zato je tudi } I_v = \text{konst. in } \Phi = \text{konst.})$$

$$E_0' = k \cdot n'.$$

vrtilna hitrost motorja n' bo:

$$n' = n \cdot \frac{E_0'}{E_0} = 425 \cdot \frac{438.2}{463.1} = 402 \text{ min}^{-1}.$$

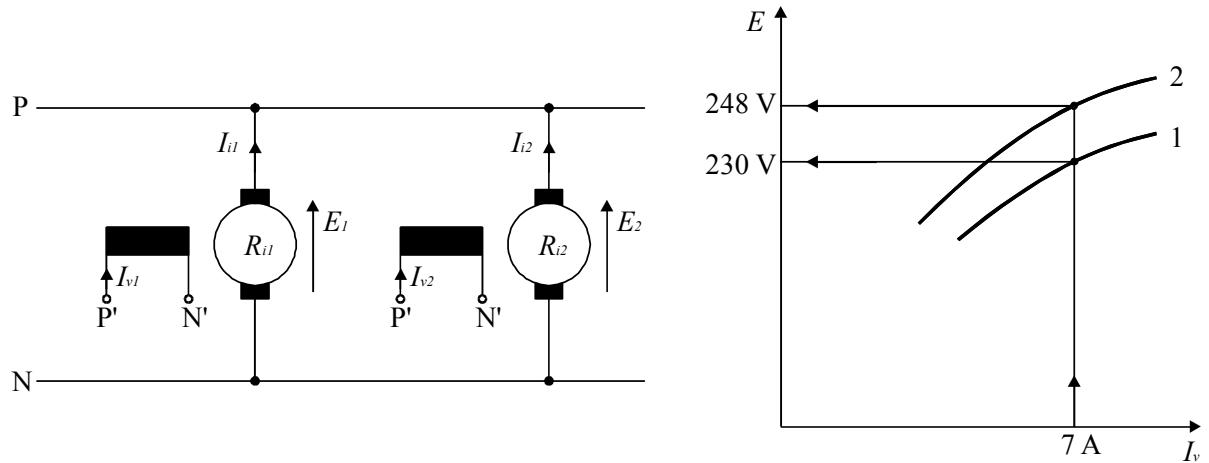
NALOGA 5.9:

Dva enosmerna generatorja s tujim vzbujanjem imata enake podatke $P_n = 100 \text{ kW}$, 230 V , 1000 min^{-1} , celotno upornost induktovega tokokroga $R_{ic} = 0.035 \Omega$. Oba generatorja obratujeta paralelno na enosmerno omrežje. Razlikujeta se le po poteku karakteristik praznega teka:

$E_1 \text{ [V]}$	158	190	214	230	244
$E_2 \text{ [V]}$	175	207	232	248	255
$I_v \text{ [A]}$	4	5	6	7	8

Vzbujalni tok je nastavljen pri obeh generatorjih na $I_v = 7 \text{ A}$, generatorja pa sta obremenjena s tokom $I = 800 \text{ A}$.

- Kako se porazdeli obremenitev na obo generatorja?
- Kolikšna je napetost na zbiralnih sponkah?



- a) Oba generatorja obratujeta s tokom $I = I_{i1} + I_{i2} = 800 \text{ A}$. V prvem generatorju se inducira napetost E_1 :

$$E_1 = U + I_{i1} \cdot R_{i1}$$

in je pri vzbujальнem toku 7 A $E_1 = 230 \text{ V}$.

V drugem generatorju se inducira napetost E_2 :

$$E_2 = U + I_{i2} \cdot R_{i2}$$

in je pri $I_v = 7 \text{ A}$ $E_2 = 248 \text{ V}$.

Razlika obeh induciranih napetosti $E_1 - E_2$:

$$E_1 - E_2 = U + I_{i1} \cdot R_{i1} - (U + I_{i2} \cdot R_{i2}) = I_{i1} \cdot R_{i1} - I_{i2} \cdot R_{i2},$$

$$I_{i2} = I - I_{i1},$$

$$E_1 - E_2 = I_{i1} \cdot R_{i1} - I \cdot R_{i2} + I_{i1} \cdot R_{i2} = I_{i1} \cdot (R_{i1} + R_{i2}) - I \cdot R_{i2}.$$

R_i upornost indukta (rotorja)

I_i tok indukta (rotorja)

Indukt prvega generatorja bo obremenjen s tokom I_{i1} :

$$I_{i1} = \frac{I \cdot R_{i1}}{R_{i1} + R_{i2}} + \frac{E_1 - E_2}{R_{i1} + R_{i2}} = \frac{800 \cdot 0.035}{0.035 + 0.035} + \frac{230 - 248}{0.035 + 0.035} = \underline{\underline{143 \text{ A}}},$$

indukt drugega pa s tokom I_{i2} :

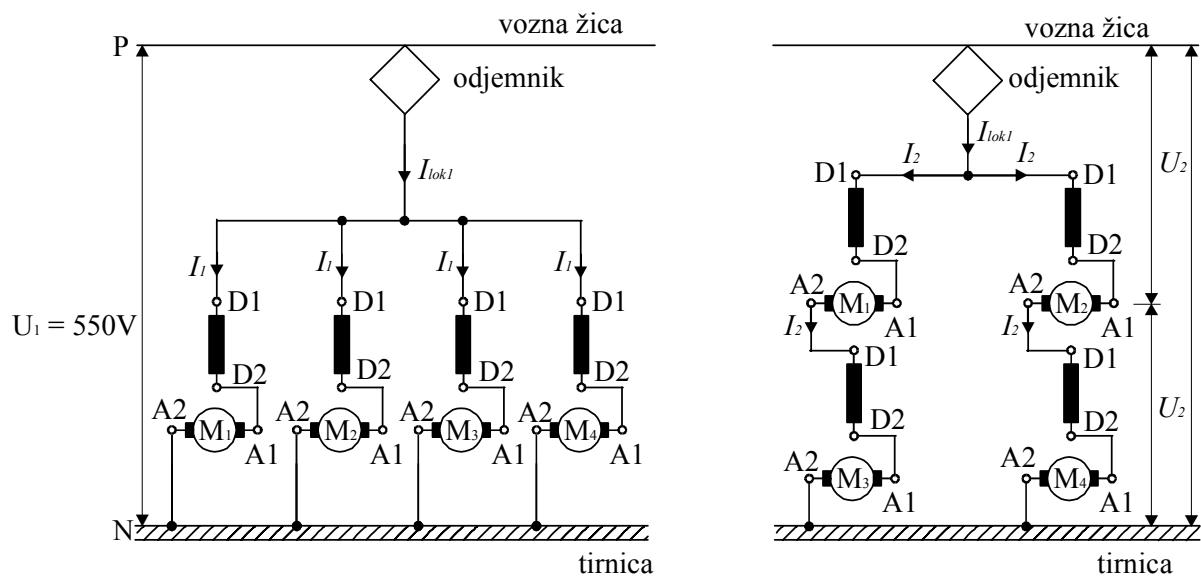
$$I_{i2} = I - I_{i1} = 800 - 143 = \underline{\underline{675 \text{ A}}}.$$

- b) Napetost na zbiralkah bo:

$$U = E_1 - I_{i1} \cdot R_{i1} = E_2 - I_{i2} \cdot R_{i2} = 230 - 143 \cdot 0.035 = 248 - 675 \cdot 0.035 = \underline{\underline{225 \text{ V}}}.$$

NALOGA 5.10:

Električna lokomotiva ima štiri paralelno priključene enosmerne motorje s serijskim vzbujalnim navitjem in jemlje iz omrežja na ravni progi tok 100 A pri napetosti 550 V na vozni žici in vozi s hitrostjo 45 km/h. Upornost rotorskega in vzbujalnega navitja enega motorja znaša skupaj $R_c = 0.8 \Omega$, padec napetosti na ščetkah enega motorja pa 2 V. Na vzponu se bremenski moment poveča štirikrat, zato vežemo po dva motorja v serijo in obe grupe paralelno. Kakšna bo v tem primeru hitrost lokomotive, če predpostavimo, da je magnetni pretok proporcionalen vzbujальнemu toku (nenasičeni motorji)?



Tok enega motorja, če lokomotiva vozi po ravni progi in jemlje iz enosmernega omrežja tok 100 A:

$$I_1 = \frac{I_{lok}}{4} = 25 \text{ A}.$$

Inducirana napetost enega motorja pri obremenitvi s tokom 25 A:

$$E_1 = U - I_1 \cdot R_c - \Delta U_{šč} = 550 - 25 \cdot 0.8 - 2 = 520 \text{ V}.$$

Vrtilni moment, ki ga razvija motor, je proporcionalen kvadratu toka:

$$M_1 = k \cdot \Phi \cdot I_1^2 = k' \cdot I_1^2.$$

Pri spremenjenih obratovalnih pogojih – štirikratnemu povečanju bremenskega momenta in po spremenjeni vezavi motorja bo moment:

$$M_2 = 4 \cdot M_1 = k' \cdot I_1^2.$$

Sledi:

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2; \quad I_2 = I_1 \cdot \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = I_1 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot M_1}{M_1}} = 2I_1 = 50 \text{ A}.$$

Napetost enega motorja pri spremenjeni vezavi:

$$U_2 = \frac{U_1}{2} = \frac{550}{2} = 275 \text{ V}.$$

Inducirana napetost E_2 :

$$E_2 = U_2 - I_2 \cdot R_c - \Delta U_{\text{šč}} = 275 - 50 \cdot 0.8 - 2 = \underline{\underline{233 \text{ V}}},$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{k \cdot \Phi \cdot n_2}{k \cdot \Phi \cdot n_1} = \frac{k' \cdot I_2 \cdot n_2}{k' \cdot I_1 \cdot n_1}.$$

Iz tega razmerja izračunamo novo vrtilno hitrost posameznega motorja - v istem razmerju se spremeni tudi hitrost gibanja lokomotive pri vožnji v klanec:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2 \cdot I_1}{E_1 \cdot I_2} = \frac{v_2}{v_1}, \quad v_2 = v_1 \cdot \frac{E_2 \cdot I_1}{E_1 \cdot I_2} = 45 \cdot \frac{233 \cdot 25}{258 \cdot 50} = \underline{\underline{9.9 \text{ km/h}}}.$$

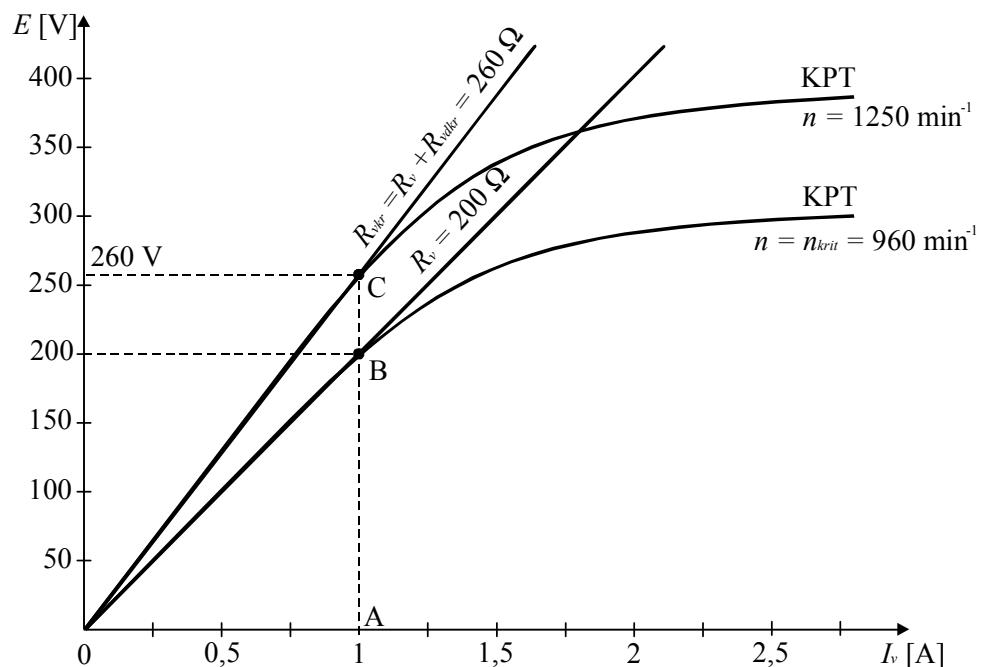
NALOGA 5.11:

Enosmerni generator s paralelnim vzbujanjem, nazivne moči $P_n = 30 \text{ kW}$, nazivne napetosti $U_n = 300 \text{ V}$, vzbujalne upornosti $R_v = 200 \Omega$, ima pri vrtilni hitrosti $n = 1250 \text{ min}^{-1}$ naslednji potek karakteristike praznega teka:

$E \text{ [V]}$	66.5	133	264	322	356	92	410
$I_v \text{ [A]}$	0.25	0.5	1	1.23	1.5	2	2.5

Izračunajte:

- a) Kritično upornost v vzbujальнem tokokrogu!
- b) Kritično vrtilno hitrost generatorja!



- a) Kritična upornost – uporovna premica nima definiranega presečišča s karakteristiko pravnega teka (tangenta na KPT):

$$R_{vkr} = R_{vdkr} + R_v = \frac{260}{1} = 260 \Omega ,$$

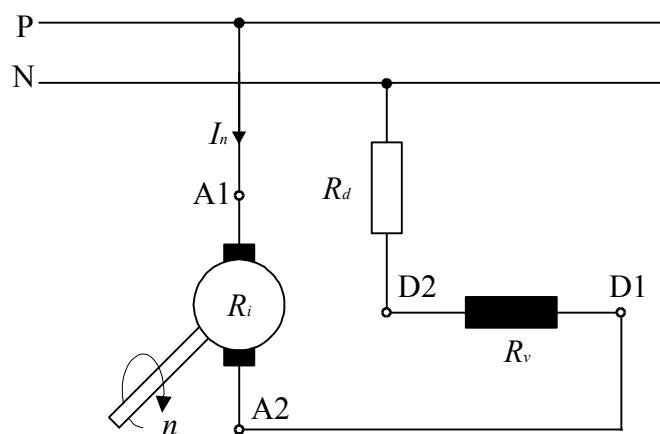
$R_{vdkr} = 60 \Omega$... kritična dodatna upornost vzbujalnega tokokroga.

- b) Kritična vrtilna hitrost – z znižanjem vrtilne hitrosti generatorja se znižuje tudi karakteristika pravnega teka, dokler pri določeni vrtilni hitosti ni definiranega presečišča med KPT in uporovno premico (samo R_v brez dodatnih upornosti).

$$\frac{n_{kr}}{n} = \frac{\overline{AC}}{\overline{AB}}, \quad n_{kr} = 0.77 \cdot 1250 = \underline{\underline{960 \text{ min}^{-1}}} .$$

NALOGA 5.12:

Enosmerni serijski motor ima naslednje podatke: $R_v + R_i = 0.325 \Omega$, $n_n = 1200 \text{ min}^{-1}$, $I_n = 46 \text{ A}$, $U_n = 220 \text{ V}$. Kakšen predpor je treba vključiti v tokokrog motorja, da se mu vrtilna hitrost zmanjša na 950 min^{-1} pri obremenitvi z nazivnim tokom?



Inducirana napetost motorja pri nazivni obremenitvi:

$$E = U_n - I_n \cdot (R_v + R_i) = 220 - 0.325 \cdot 46 = 205 \text{ V} .$$

Pri istem toku ostane tudi magnetni pretok nespremenjen in velja razmerje:

$$\frac{E}{E'} = \frac{n_n}{n'} ; \quad E' = \frac{n'}{n_n} \cdot E = \frac{950}{1200} \cdot 205 = \underline{\underline{162 \text{ V}}} .$$

Enačba napetostnega ravnotežja motorja z upoštevanjem dodatne upornosti:

$$U = E' + I_n \cdot (R_v + R_i + R_d) , \quad R_d \dots \text{dodatna upornost}$$

$$R_d = \frac{U - E' - I_n \cdot (R_v + R_i)}{I_n} = \frac{220 - 162 - 46 \cdot 0.325}{46} = \underline{\underline{0.935 \Omega}} .$$

NALOGA 5.13:

Enosmerni samovzbudni generator ima naslednje podatke: 230 V, 9.55 A, 2.2 kW, 1420 min^{-1} . Z meritvijo smo dobili upornost vzbujalnega navitja $R_v = 520 \Omega$ in naslednjo karakteristiko praznega teka pri $n = 1500 \text{ min}^{-1}$:

$E [\text{V}]$	12	86	157	186	211	231	246	257	266
$I_v [\text{A}]$	0	0.1	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5

Določite:

- a) Na kakšno napetost se ta generator sam vzbudi pri $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ in pri $n' = 1420 \text{ min}^{-1}$?
 - b) Kakšen predpor je potrebno vključiti v vzbujalni tokokrog v praznem teku pri 1500 min^{-1} , da bo imel ta generator na sponkah 230 V?
 - c) Kakšne vrtljaje dobi ta stroj v praznem teku, če ga priključimo na omrežje 230 V kot motor?
 - d) S kakšnim preduporom v vzbujalnem tokokrogu dosežemo, da ima motor v praznem teku 1800 min^{-1} , če je priključen na omrežje 220 V?
-
- a) Pri $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ se inducira napetost $E = \underline{\underline{269 \text{ V}}}$!
Pri $n' = 1420 \text{ min}^{-1}$ se inducira napetost $E' = \underline{\underline{248 \text{ V}}}$!
 - b) $I_v = 0.349 \text{ A}$ pri $E = 230 \text{ V}$,
 $R_{v0} = 659 \Omega$, $R_{vdod} = R_{vc} + R_v = \underline{\underline{139 \Omega}}$.
 - c) $\frac{n'}{1500} = \frac{230}{255}$, $n' = \underline{\underline{1355 \text{ min}^{-1}}}$.
 - d) $n_0 = 1500 \text{ min}^{-1}$: $E = 220 \text{ V}$, $E' = 183 \text{ V}$, $I_v = 0.243 \text{ A}$
 $n_0' = 1800 \text{ min}^{-1}$: $E' = ?$,

$$R_{v0}' = \frac{E}{I_v'} = \frac{220}{0.243} = 898 \Omega,$$

$$R_{vdod}' = R_{vc}' - R_v = 898 - 520 = \underline{\underline{378 \Omega}}$$