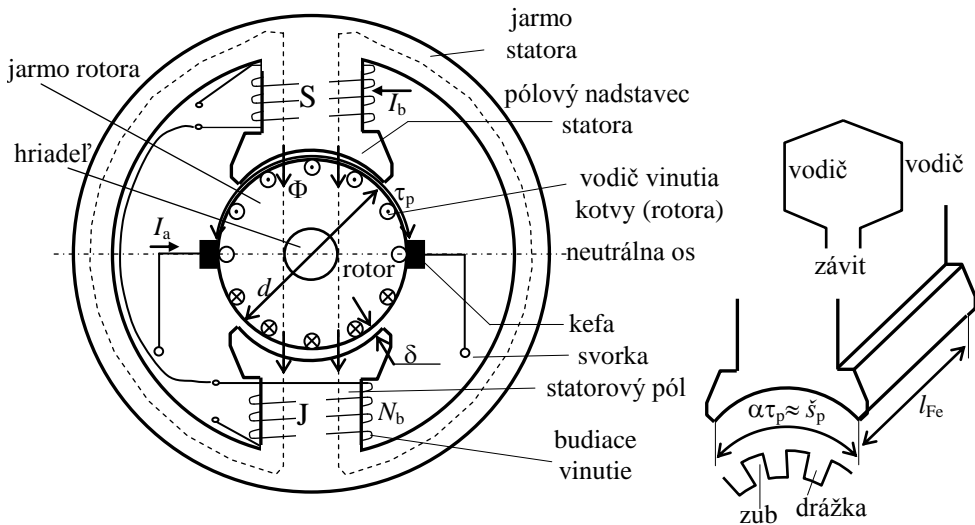


2. JEDNOSMERNÉ STROJE

2.1 Všeobecne

Jednosmerné stroje môžu pracovať ako motory (spotrebiče elektrickej energie) alebo ako dynamá (zdroje elektrickej energie). Hlavný význam majú jednosmerné motory, ktoré sa používajú vtedy, keď sa vyžaduje regulácia rýchlosti v širokom rozsahu. Dynamá ako zdroje jednosmerného prúdu sa používajú menej, lebo v súčasnosti sa nahrádzajú striedavými zdrojmi s usmerňovačmi. Napriek tomu je potrebné poznať vlastnosti dynam, pretože jednosmerné motory pri brzdení pracujú ako dynamá.



Obr.2.1 Hlavné časti dvojpólového jednosmerného stroja

Na obr. 2.1 je magnetický obvod jednoduchého dvojpólového stroja. Skladá sa zo statora a rotora. Medzi nimi je vzduchová medzera δ , aby rotor mohol voľne rotovať v dutine statora. Stator sa skladá z jarma statora a pólov s pólými nadstavcami. Rotor sa skladá z kotvy a komutátora. Kotva je tá časť stroja, v ktorej sa indukuje napätie. Skladá sa z dynamových plechov tvaru medzikružia, ktoré sú po vonkajšom obvode drážkované a sú naskladané do tvaru valca, nasadeného na hriadeľ. Väčšie stroje majú aj ventilačné kanály. V drážkach rotora je uložené vinutie kotvy, v ktorom sa indukuje elektrické napätie. Indukované napätie v závitoch, ktorý sa pohybuje po obvode kotvy v magnetickom poli je striedavé, aj keď nie sínusové. Usmernenie tohto napätia zabezpečuje komutátor.

Magnetický obvod stroja je magnetizovaný budiacim vinutím, ktoré je navinuté na statorových budiacich póloch. Počet pólov sa označuje $2p$. Budiacim vinutím s počtom závitov N_b preteká jednosmerný prúd I_b a vytvára budiace magnetické napätie U_{mag} , ktoré magnetickým obvodom pretláča magnetický tok Φ . Cievky budiaceho vinutia sú zapojené

do série tak, že striedavo vybudia severný a južný pól. Preto môžeme hovoriť o počte pólových dvojíc, resp. počte pólových párov p . Magnetický tok sa uzatvára pozdĺž pólov a pomocou pólových nadstavcov sa rovnomerne rozdeľuje ponad oblúk povrchu rotora tak, aby magnetické siločiarly do rotora vstupovali kolmo. Magnetický tok po prestupe cez vzduchovú medzeru vstupuje do zubov rotora, ktoré sú vytvorené na povrchu rotora medzi drážkami. Pokračuje pozdĺž jarma rotora a opäť cez zuby, vzduchovú medzeru, pólový nadstavec a pól opačnej polarity do jarma statora, kde sa dvoma paralelnými cestami pozdĺž jarma statora vracia k pôvodnému pólu.

Vinutie na rotore jednosmerného stroja sa nazýva vinutie kotvy. Skladá sa z veľkého počtu cievok s presne definovaným počtom závitov. Každý závit sa skladá z dvoch vodičov. Počet všetkých vodičov na kotve označujeme z . Toto vinutie je uzatvorené tak, že každá cievka je pomocou zastávky pripojená na lamelu komutátora, jedna strana cievky je uložená v jednej drážke rotora, a druhou stranou sa vracia takou drážkou, ktorá je posunutá o pólový rozstup, opäť končí na lamele komutátora, vzdialenej o presne definovaný komutátorový krok od lamely, na ktorej cievka začínala. Po priložení kief, ktoré sú statické a pod ktorými sa otáča komutátor, sa prúd v cievkach kotvy delí do paralelných vetiev. Počet paralelných vetiev označujeme $2a$. Ak je vinutie vlnové (sériové), $2a=2$ ($a=1$), ak je slučkové (paralelné) $2a=2p$ ($a=p$). Podrobnejšie sa vinutím zaoberá kap. 3, aj keď len v tej najjednoduchšej forme. Vinutia môžu byť naozaj rôzne a ich výklad veľmi komplikovaný [118]

Lamely komutátora sú od seba izolované a otáčajú sa so závitmi, ktoré sú na ne pripojené. Poloha kief je upravená tak, že kefa sa dotýka lamely tak dlho, kým je napr. kladná, t. j. kým s ňou spojené vodiče sa pohybujú pod jedným pólom, napr. severným. Keď sú vodiče medzi pólmi, v tzv. neutrálnej osi, kde je v ideálnom prípade nulové magnetické pole, neindukuje sa v nich žiadne napätie. Kefy prechádzajú z jednej lamely na druhú a závit je nimi spojený nakrátko. Prúd v závite mení svoj smer. Závit (cievka) komutuje. V ďalšom okamihu sa zmení polarita lamely, pretože sa spolu s cievkou, ktorá je na ňu pripojená dostáva do pôsobnosti opačného pólu, ale kefa (kladná) sa už dotýka ďalšej lamely, ktorá je opäť kladná. Smer prúdu v závite sa zmenil, ale polarita kief ostala nezmenená.

Komutácia je časová zmena smeru prúdu v tej cievke, ktorá je v neutrálnej polohe a kefy ju na krátky čas spájajú nakrátko. Komutátor je sústava lamiel a kief, ktorého úlohou je usmerňovať striedavé napätie na jednosmerné v jednosmerných strojoch. Všeobecne je to mechanický menič frekvencie, ktorý mení frekvenciu indukovaného napätia kotvy, ktorá je úmerná otáčkam a počtu pólových dvojíc

$$f = pn/60 \quad [\text{Hz, min}^{-1}]$$

na frekvenciu na svorkách stroja. V prípade jednosmerných strojov je na svorkách $f=0$, v prípade striedavých strojov (pozri univerzálny motorček) je to frekvencia napájacej siete.

Usmerné napätie jedného závitú silne pulzuje, mení sa od nuly po maximálnu hodnotu. Hladší priebeh sa docieli použitím viacerých cievok, rovnomerne rozložených po obvode rotora a vhodne pospájaných podľa druhu vinutia. Komutátor má potom toľko lamiel, koľko je cievok. Ťažná sila stroja pulzuje podobne ako indukované napätie. Čím viac cievok má kotva, tým je priebeh ťažnej sily a momentu plynulejší.

Minimálny počet lamiel nutný na funkciu motora je 3. Pri rovnakej polarite pólov a rovnakom smere prúdu v kotve je smer otáčania motora a generátora opačný.

Na obvode komutátora je zberacie ústrojenstvo, ktoré tvoria zberacie kolíky, na ktorých sú nasadené kefové držiaky s uhlíkovými kefami. Na jednom kolíku sú kefy tej istej polarite. Kiež býva toľko, koľko je pólov a majú po obvode striedavú polaritu. Všetky kladné sú navzájom spojené a vyvedené na kladnú svorku, všetky záporné tiež a vyvedené na zápornú svorku stroja. Kefové držiaky sú upevnené na nosnom kruhu, ktorý umožňuje natočenie do najvhodnejšej polohy.

Okrem hlavných (budiacich) pólov majú jednosmerné stroje úzke pomocné (komutačné) póly, umiestnené medzi hlavnými pólmi. Ich úlohou je zlepšovať komutáciu a tým aj prevádzkové vlastnosti strojov. Tú istú úlohu má aj kompenzačné vinutie, uložené v drážkach pólových nadstavcov.

Podľa toho, ako je jednosmerný stroj budený, rozlišujeme dva základné druhy strojov a to s cudzím budením a s vlastným budením. Stroj s vlastným budením používa ako zdroj budiaceho napätia vlastnú kotvu, ak je budiace vinutie pripojené paralelne ku kotve. Taký stroj sa nazýva derivačný, ak je budiace vinutie zapojené do série, potom je to stroj sériový. Ak je časť budenia zapojená do série a časť paralelne, nazývame to kombinované alebo sériovo-paralelné budenie a stroj sa nazýva kompaundný. Všetky typy strojov môžu pracovať v generátorickom a aj v motorickom režime a ich charakteristiky a vlastnosti sú dané práve vzájomným zapojením budiaceho vinutia a vinutia kotvy. Aj keď v súčasnosti sa používajú najmä stroje s cudzím budením, z pedagogického hľadiska sme medzi príklady zaradili aj výpočty ostatných druhov strojov.

2.2 Indukované napätie a elektromagnetický moment jednosmerného stroja

2.2.1 Indukované napätie jednosmerného stroja

Keď sa rotor otáča v homogénnom magnetickom poli, ktoré je tvorené prechodom prúdu v budiacom vinutí hlavných pólov, indukuje sa v cievkach rotora indukované napätie U_i . Pólové nadstavce hlavných pólov majú taký tvar, aby magnetické siločiar prestupovali vzduchovú medzeru a vstupovali do rotora kolmo podľa možnosti na celom pólovom rozstupe. Tým je konštrukciou zabezpečená kolmosť týchto troch veličín: magnetických siločiar, dĺžky vodiča a rýchlosti pohybu vodiča. Magnetické pole vyjadríme pomocou magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere B_δ , z dĺžky vodiča uvažujeme len tú časť, ktorá je v drážke, preto ju vyjadríme pomocou aktívnej dĺžky rotorového zväzku l_{Fe} a rýchlosť pohybu vyjadríme pomocou obvodovej rýchlosti vodiča v . Potom indukované napätie v jednom vodiči možno vypočítať ich jednoduchým súčinom:

$$U_i = B_\delta l_{Fe} v \quad (2.1)$$

Ak je daný magnetický tok budiacich pólov Φ , a plocha ktorou magnetický tok prestupuje do rotora S je daná pomocou pólového rozstupu, čiže tej časti obvodu kotvy, ktorá pripadá na jeden pól

$$\tau_p = \frac{\pi d}{2p} \quad (2.2)$$

a dĺžky vodiča v drážke rotora l_{Fe} , magnetickú indukciu vo vzduchovej medzere určíme zo vzťahu

$$B_\delta = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\alpha \tau_p l_{Fe}} \quad (2.3)$$

kde α je činiteľ pólového krytia, ktorý vyjadruje, aká časť z pólového rozstupu kotvy je krytá šírkou pólového nadstavca \check{s}_p a je vystavená pôsobeniu magnetického toku:

$$\alpha = \frac{\check{s}_p}{\tau_p} \quad (2.4)$$

Obvodovú rýchlosť otáčania v vyjadríme pomocou počtu otáčok n , ktoré sú pre elektrické stroje veľmi dôležitým údajom a sú uvedené aj na štítku stroja:

$$v = \frac{\pi dn}{60} \quad (2.5)$$

pričom n sú otáčky za minútu.

Všetky vodiče kotvy, ktoré patria do jednej paralelnej vetvy možno vyjadriť ako $z/2a$ a tú časť z nich, ktoré sú pokryté pólom:

$$\alpha \frac{z}{2a}$$

Po dosadení týchto vzťahov do (2.1) dostaneme:

$$U_i = \frac{\Phi}{\alpha \frac{\pi d}{2p} l_{Fe}} l_{Fe} \frac{\pi dn}{60} \alpha \frac{z}{2a} = \frac{p}{a} \frac{z}{60} \Phi n = C_U \Phi n \quad (2.6)$$

Vidíme, že indukované napätie závisí od konštrukcie stroja, danej počtom pólových dvojíc, paralelných vetiev, a počtu vodičov, čo je zahrnuté do napäťovej konštanty stroja C_U , magnetického toku a otáčok stroja. V teórii a praxi elektrických pohonov sa však pre účely regulácie používa uhlová rýchlosť. Mechanická uhlová rýchlosť Ω je viazaná priamo na otáčky stroja, resp. „točenie sa rotora“:

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} [s^{-1}, \text{min}^{-1}] \quad (2.7)$$

a elektrická uhlová rýchlosť, týkajúca sa časovej zmeny elektrických veličín, závisí od počtu pólových dvojíc a je p -krát väčšia:

$$\omega = p\Omega \quad (2.8)$$

Potom vzťah pre indukované napätie možno upraviť takto:

$$U_i = \frac{p}{a} \frac{z}{2\pi} \Phi \Omega = C \Phi \Omega \quad (2.9)$$

kde konštantu stroja sme označili C , bez indexu, lebo ako uvidíme neskôr, tá istá konštanta vystupuje aj vo vzťahu pre moment stroja.

Vzťah (2.9) možno ďalej upraviť tak, že ho vyjadríme pomocou elektrickej uhlovej rýchlosti a spriahnutého magnetického toku ψ . Spriahnutý magnetický tok dostaneme úpravou, v ktorej počet závitov N vyjadríme ako polovičný počet vodičov z , keďže vždy dva vodiče tvoria závit:

$$\psi = \frac{z}{a2\pi} \Phi = \frac{N}{a\pi} \Phi = \frac{N}{2a} \frac{2}{\pi} \Phi \quad (2.10)$$

V tomto vzťahu sa uvažuje efektívny počet závitov jednej paralelnej vetvy $N/2a$, redukovaný koeficientom vinutia jednosmerných strojov $2/\pi$. Potom vzťah pre indukované napätie dostaneme v úplne všeobecnom tvare:

$$U_i = p\Omega \frac{z}{a2\pi} \Phi = \omega \psi \quad (2.11)$$

S týmto vzťahom pre indukované napätie sa stretne vo všeobecnej teórii elektrických strojov, kde takto vyjadríme aj okamžitú hodnotu indukovaného napätia jednosmerných aj striedavých strojov, v generátorickej aj motorickej prevádzke.

Je výhodné určiť koeficientom magnetického toku k_ϕ , ktorý vyjadruje vzťah medzi indukovaným napätím, budiacim prúdom a uhlovou rýchlosťou:

$$U_i = C \Phi \Omega = C C_\phi I_b \Omega = k_\phi \Omega \quad (2.12)$$

Potom

$$k_\phi = \frac{U_i}{\Omega} \quad (2.13)$$

Na obr. 2.2 sú náhradné schémy jednosmerného stroja pre motorickú a generátorickú prevádzku. Náhradnú schému kotvy kreslíme pomocou napäťového zdroja, t. j. kotvu jednosmerného stroja považujeme za zdroj, ktorého vnútorný odpor a indukčnosť sú zapojené s ním do série. Na ilustráciu sa tu uvádza jednosmerný stroj s cudzím budením, ostatné spôsoby zapojenia budú uvedené neskôr, v príslušných riešených príkladoch. Uvedieme jednoduché pravidlo na určenie smeru točenia vo vzťahu k U_i a Φ : Ak šípku U_i točením stotožníme so smerom Φ kratšou cestou, dostaneme smer točenia Ω . Toto platí pre motor aj generátor.

Ako vidno z obr. 2.2, pre jednosmerný motor platí, že ak na svorky privedieme napätie U , šípka smeru prúdu je opačná ako šípka smeru napätia, lebo svorkové napätie je zdrojom a indukované napätie na kotve spotrebičom. Preto indukované napätie na kotve a prúd kotvy majú ten istý smer, rovnako ako aj úbytok napätia na odpore kotvy ΔU_a . Potom svorkové napätie U , dodávané z vonkajšieho zdroja energie je vždy väčšie ako indukované napätie U_i motora, pretože motor je spotrebič, takže platí

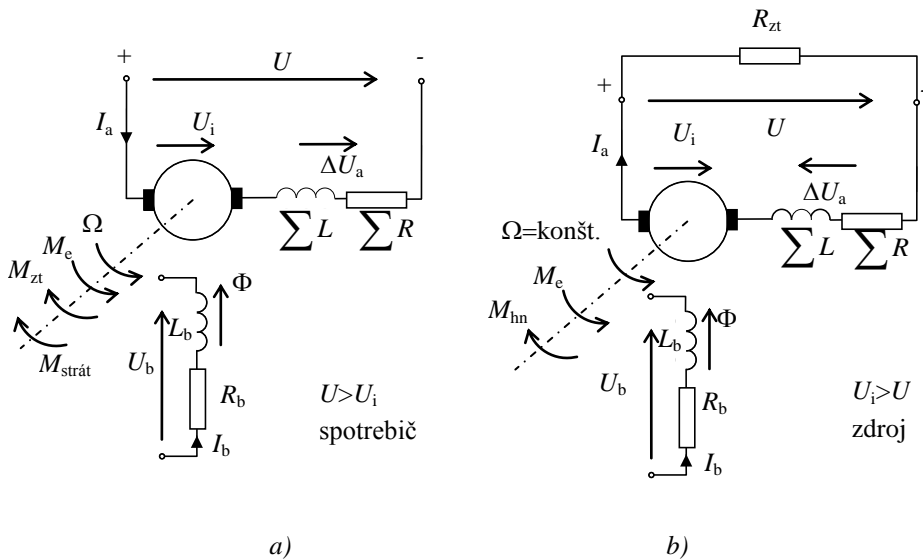
$$U = U_i + \Delta U_a \quad (2.14)$$

kde ΔU_a je úbytok napätí na odporoch v obvode kotvy

$$\Sigma R = R_a + R_s + R_{PP} + R_{bs} + R_{KV} \quad (2.15)$$

$$\Delta U_a = I_a \Sigma R \quad (2.16)$$

ktorý zahŕňa R_a – odpor vinutia kotvy, R_{PP} – odpor vinutia pomocných pólov, R_s – spúšťači odpor, ak je do obvodu zapojený, R_{bs} – odpor budiaceho vinutia zapojeného do série s vinutím kotvy (na obr. 2.2 také vinutie nie je, lebo prichádza do úvahy len ak by to bol sériový motor, alebo kompaundný motor), R_{KV} – odpor kompenzačného vinutia). Úbytok napätia vzniká aj na keľách a to tak, že prechodový odpor sa prispôsobí pretekajúmu prúdu a spôsobí úbytok napätia vždy 2 V.



Obr. 2.2 Náhradná schéma jednosmerného stroja s cudzím budením a) v motorickej, b) v generátorickej prevádzke v ustálenom stave.

Ak dosadíme (2.16) do (2.14), dostaneme vzťah, z ktorého je možné vyjadriť veľkosť prúdu v kotve motora:

$$I_a = \frac{U - U_i}{\Sigma R} \quad (2.17)$$

Pre jednosmerné dynamo, ktoré je zdrojom elektrickej energie a kryje úbytky napätia na svojich vnútorných odporoch, platí, že smer prúdu je opačný ako indukované napätie U_i , lebo U_i je zdrojom, a na záťaži, čiže na svorkách je smer prúdu aj napätia totožný, lebo na svorkách je spotrebič elektrickej energie. Z toho vyplýva, že indukované napätie je väčšie ako svorkové:

$$U = U_i - \Delta U_a \quad (2.18)$$

Všetky tieto vzťahy platia pre ustálený stav, kedy môžeme zanedbať časovú zmenu jednotlivých veličín, včítane časovej zmeny prúdov di/dt . Tá by na indukčnostiach L jednotlivých vinutí (kotvy, pomocných pólov a kompenzačného vinutia) spôsobila ďalší úbytok napätia $\Sigma L(di/dt)$, ktoré teraz zanedbávame.

2.2.2 Elektromagnetický moment jednosmerného stroja

Elektromagnetický moment jednosmerného stroja odvodíme na základe sily, ktorá pôsobí v magnetickom poli na vodič, pretekaný prúdom. Ak sú všetky tri veličiny na seba kolmé, čo zabezpečí konštrukcia jednosmerného stroja a pôsobenie komutátora, na vodič pôsobí sila:

$$F = B_\delta I_{Fe} I_v \quad (2.19)$$

Na tvorbe elektromagnetického momentu

$$M_e = F \frac{d}{2} \quad (2.20)$$

sa podieľajú všetky vodiče kotvy, ktoré sú v magnetickom poli, t. j. αz . Prúd vo vodiči I_v závisí od prúdu kotvy I_a , ktorý by sme namerali pred kefami komutátora, resp. na svorkách stroja a počtu paralelných vetiev $2a$ (pozri kap.3):

$$I_v = \frac{I_a}{2a} \quad (2.21)$$

Potom

$$M_e = \frac{\Phi}{\alpha \frac{\pi d}{2p} I_{Fe}} I_{Fe} \alpha z \frac{I_a}{2a} \frac{d}{2} = \frac{p}{a} \frac{z}{2\pi} \Phi I_a = C \Phi I_a \quad (2.22)$$

pričom C je konštanta stroja, daná jeho konštrukciou, rovnako ako vo vzťahu pre indukované napätie $U_i = C \Phi \Omega$.

Potom možno podobne ako v prípade indukovaného napätia písať:

$$M_e = C C_\phi I_b I_a = k_\phi I_a \quad (2.23)$$

a z pomeru

$$k_{\phi} = \frac{U_i}{\Omega} = \frac{M_e}{I_a} \quad (2.24)$$

Zo vzťahu (2.24) vidíme, že rovnocennou jednotkou pre k_{ϕ} je Vs, alebo Nm/A. Aby sme dokázali, že to platí, dosadíme do vzťahu (2.24) všetky veličiny v základných jednotkách, takže

$$k_{\phi} = \frac{U_i}{\Omega} = \frac{M_e}{I_a} \left[\frac{\text{V}}{\text{s}^{-1}} = \frac{\text{Nm}}{\text{A}} = \frac{\text{VAs m}}{\text{Am}} = \text{Vs} \right]$$

2.3 Zmena rýchlosti jednosmerných motorov

Zo vzťahu pre indukované napätie možno odvodiť vzťah pre uhlovú rýchlosť jednosmerného motora, resp. pre jeho otáčky, v závislosti od prúdu kotvy,

$$\Omega = \frac{U_i}{C\Phi} = \frac{U - I_a \Sigma R}{C\Phi} = \frac{U}{C\Phi} - \frac{\Sigma R}{C\Phi} I_a \quad (2.25)$$

$$n = \frac{U}{C_U \Phi} - \frac{\Sigma R}{C_U \Phi} I_a \quad (2.26)$$

alebo elektromagnetického momentu takto:

Z rovnice (2.22):

$$I_a = \frac{M_e}{C\Phi}$$

a po dosadení do (2.23):

$$\Omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{\Sigma R}{(C\Phi)^2} M_e \quad (2.27)$$

Rovnice (2.25), (2.26) a aj (2.27) sú matematicky rovnicami priamky $y = q - kx$, ktorá vytína na osi y hodnotu q a so zväčšovaním x postupne klesá so sklonom k . Pri aplikácii do rovníc (2.25) a (2.26) vidíme, že na zvislej osi je uhlová rýchlosť Ω , resp. otáčky n a pri nulovej hodnote prúdu, t. j. v stave naprázdno dostaneme uhlovú rýchlosť naprázdno

$$\Omega_0 = \frac{U}{C\Phi}, \quad (2.28)$$

resp. otáčky naprázdno

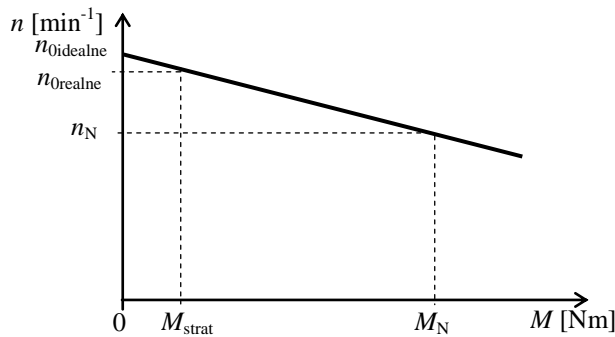
$$n_0 = \frac{U}{C_U \Phi} \quad (2.29)$$

ktoré zodpovedajú hodnote q , ktorú priamka vytína na zvislej osi. Sklon priamky je daný výrazom

$$\frac{\Sigma R}{C\Phi}, \text{ resp. } \frac{\Sigma R}{C_U\Phi}. \quad (2.30)$$

Ako sa zmenia charakteristiky so zmenou jednotlivých parametrov uvidíme v nasledujúcich kapitolách.

Definovali sme stav naprázdno motora, v ktorom na hriadeľ rotora nie je pripojená záťaž a kotvou nepreteká prúd. Motor sa točí otáčkami naprázdno. To je ideálny stav naprázdno. Skutočný stav naprázdno motora vyzerá tak, že ak aj na hriadeľi nie je žiadna užitočná záťaž, na krytie strát a vytvorenie magnetického toku berie motor zo zdroja príkon naprázdno P_0 , pri danom napätí U v podobe prúdu naprázdno I_0 , pozri kap. 2.5. Preto aj samotné straty motora predstavujú určitú záťaž, ktorú reprezentujeme momentom strát M_{strat} , a preto skutočné otáčky naprázdno budú nižšie ako ideálne otáčky naprázdno



Obr. 2.3 Elektromechanická charakteristika jednosmerného motora s cudzím budením, resp. derivačného motora s označením ideálneho a skutočného stavu naprázdno a stavu pri menovitom zaťažení

Keď sa motor na hriadeľi zaťažuje, otáčky sa znižujú, až do nuly, t. j. rotor sa netočí. Takýto stav voláme stav nakrátko. Pri nulových otáčkach je indukované napätie podľa vzťahov (2.6) a (2.9) nulové, a preto prúd podľa (2.17) by bol daný celým svorkovým napätím a bol by obmedzený len malým odporom v obvode kotvy podľa vzťahu:

$$I_k = \frac{U}{\Sigma R} \quad (2.31)$$

V jednosmerných motoroch je tento prúd veľmi veľký, je to až 20-násobok I_N , takže by mohol poškodiť vinutie a ním vyvinutý moment sa ani nedá využiť, takže treba tento prúd obmedziť na primeraný záberový prúd, ktorý je obvykle daný ako 1,5 až 2,5-násobok I_N . Vzťah (2.31) ukazuje možnosti, ako to možno urobiť: 1. znížením svorkového napätia,

ak máme jednosmerný zdroj premenlivého napätia a 2. do série zapojeným odporom do obvodu kotvy.

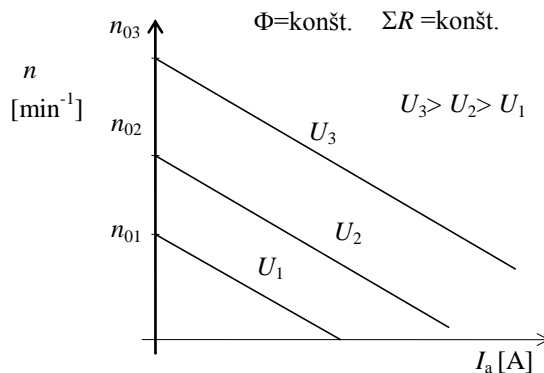
Zo vzťahov (2.27) až (2.30) vidno, že uhlovú rýchlosť môžeme regulovať tromi spôsobmi: 1. svorkovým napätím, 2. odporom v obvode kotvy pridaním regulačného odporu do série s kotvou a 3. magnetickým tokom, čiže budením motora. Ak sa mení jedna z týchto troch veličín, ostatné dve majú ostať konštantné, aby sme mohli sledovať zmenu tvaru charakteristiky. Takúto možnosť poskytuje len jednosmerný motor s cudzím budením, preto v ďalšom sa budeme zaoberať týmto motorom (obr. 2.2a).

2.3.1 Zmena rýchlosti zmenou svorkového napätia

Rýchlosť ustáleného stavu jednosmerného motora možno meniť priamo zmenou svorkového napätia. Rovnice (2.25) a (2.26) ukazujú, ako sa zmení charakteristika $\Omega = f(I_a)$, ak sa zmení svorkové napätie U a budenie Φ aj odpor kotvy ΣR ostanú konštantné. Zmenou svorkového napätia sa zmení hodnota otáčok naprázdno, ale sklon charakteristik sa nezmení, ako to vidno z rovníc (2.25 - 2.27). Čiže charakteristiky budú rovnobežné a zvyšovaním napätia sa bude zvyšovať aj hodnota otáčok naprázdno.

Okrem toho z obr. 2.4, na osi prúdu vidno, že znižovaním napätia sa znižuje hodnota záberového prúdu, t. j. prúdu pri zábere, kedy rotor stojí a na kotvu sa priloží napätie. Podľa vzťahu (2.31) možno presne vypočítať svorkové napätie, ktoré obmedzí záberový prúd na predpísanú dovolenú hodnotu.

Tento spôsob zmeny otáčok možno použiť v motoroch s cudzím budením a v sériových motoroch. Nemožno ho použiť v motoroch, kde súčasne so zmenou svorkového napätia sa mení aj budenie, čo by nastalo napr. v derivačných motoroch. Na tento spôsob zmeny otáčok je potrebný jednosmerný zdroj premenlivého napätia, čo môžu poskytnúť polovodičové meniče.



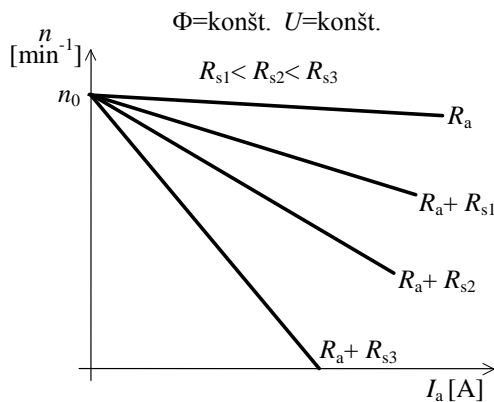
Obr. 2.4 Zmena otáčok jednosmerného motora zmenou svorkového napätia

2.3.2 Zmena rýchlosti zmenou odporu v obvode kotvy

Tento spôsob zmeny otáčok možno použiť vo všetkých jednosmerných motoroch, aj keď je pravda, že je to stratová regulácia, lebo na prídavných odporoch, ktoré zapájame do

série s obvodom kotvy sa tvoria prídavné straty. Preto tam, kde možno použiť reguláciu svorkovým napätím a máme k dispozícii príslušný zdroj napätia, odporovú reguláciu nepoužívame (napr. v motore s cudzím buđením).

Podľa vzťahov (2.25 a 2.26), ak svorkové napätie a budenie stroja ostanú konštantné, zmenou odporu v obvode kotvy sa zmení sklon charakteristiky a hodnota rýchlosti naprázdno sa nebude meniť. Táto metóda sa s výhodou používa v derivačných motoroch, ak máme len jeden zdroj konštantného napätia. Ako to vidno na obr. 2.5, zvyšovaním odporu sa sklon charakteristiky zväčšuje a tým sa dostaneme k menším hodnotám záberového prúdu. Zo vzťahu (2.31) vyplýva, že na obmedzenie prúdu pri zábere možno presne vypočítať odpor, ktorý treba do obvodu kotvy zaradiť a postupne ho vyrad'ovať (R_s vo vzťahu (2.15)), aby sa motor plynule rozbíhal, čo uvidíme v riešených príkladoch.

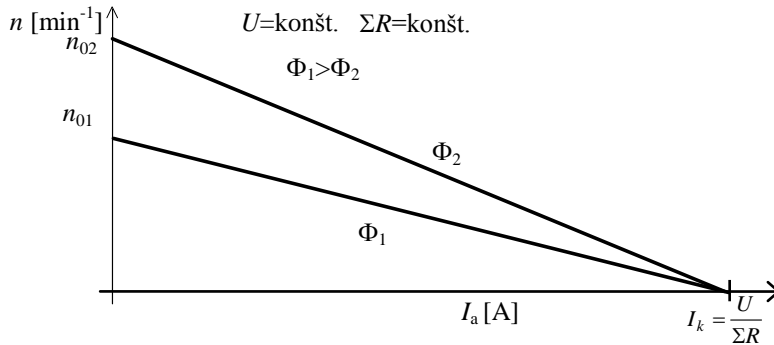


Obr. 2.5 Zmena otáčok jednosmerného motora zmenou odporu v obvode kotvy

2.3.3 Zmena rýchlosti zmenou budenia

Aby sa motor hneď po pripojení na sieť rozbíhal s maximálnym momentom z najnižšej rýchlosti, musí byť plne nabitý (menovitým budiacim prúdom), t. j. jeho budiace vinutie musí byť pripojené na svoj zdroj elektrickej energie skôr alebo súčasne s kotvou. Z toho tiež vyplýva, že zmenu rýchlosti magnetickým tokom, čiže buđením, možno uskutočniť už len znižovaním budenia, preto sa táto regulácia volá „zoslabeným buđením“.

Ako vyplýva zo vzťahov (2.25 a 2.26), zmenou budenia sa mení aj hodnota rýchlosti naprázdno, aj sklon charakteristiky. Keďže ide len o znižovanie budenia, otáčky naprázdno sa budú len zvyšovať a sklon sa bude tiež zvyšovať, to znamená charakteristika bude prudšie klesať k vodorovnej osi. Ako vidno na obr. 2.6, ak pri menovitom (plnom) buzení je pri menovitej záťaži menovitý prúd, znížením budenia sa pri vyšších otáčkach zvýši aj prúd nad menovitú hodnotu, ak záťaž ostane menovitá. Trvalé zvýšenie prúdu nad menovitú hodnotu je neprípustné, preto pri zoslabenom buzení treba znížiť záťaž, aby prúd ostal na menovitej hodnote.



Obr. 2.6 Zmena otáčok jednosmerného motora zoslabovaním budenia

2.4 Magnetické napätie jednosmerného stroja

2.4.1 Budiace magnetické napätie

Pri výpočte magnetického obvodu vychádzame z 1. Maxwellovej rovnice

$$\int Hdl = N_b I_b = U_{\text{magb}} \quad (2.32)$$

kde N_b je počet závitov cievky, ktorá budí uvažované magnetické pole a I_b je jej prúd. Ich súčin je budiace magnetické napätie stroja U_{magb} , ktoré v stroji vytvorí magnetický tok.

Pri vyšetovaní magnetického poľa jednosmerného stroja možno výhodne použiť súmernosť stroja a rozdeliť celý magnetický obvod na n úsekov, v ktorých možno veľkosť intenzity magnetického poľa považovať za konštantnú. Tým prejde integrácia na súčet n k -tých úsekov:

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{k=1}^n \Delta U_{\text{magk}} = N_b I_b = U_{\text{magb}} \quad (2.33)$$

Celkové budiace magnetické napätie sa rozdelí na jednotlivé úseky ΔU_{magk} pozdĺž magnetického obvodu. Napr. na obr. 2.7 je štvrtina magnetického obvodu 4-pólového jednosmerného stroja, v ktorom sa magnetický tok uzatvára cez budiaci pól a pólový nadstavec (index p), vzduchovú medzeru (index „ δ “), zuby rotora (index „ zr “), jarmo rotora (index „ yr “), opäť zuby rotora, vzduchovú medzeru, budiaci pól a jarmo statora (index „ ys “). Na všetkých týchto úsekoch sa vytvorí úbytok magnetického napätia a možno písať 2. Kirchhoffov zákon pre magnetický obvod:

Pre jednu pólóvu dvojicu pre uzavretú magnetickú siločiaru platí:

$$\begin{aligned} 2U_{\text{magb}} &= 2\Delta U_{\text{magp}} + 2\Delta U_{\text{mag}\delta} + 2\Delta U_{\text{magzr}} + \Delta U_{\text{magyr}} + \Delta U_{\text{mags}} \\ 2U_{\text{magb}} &= 2H_p l_p + 2H_\delta \delta + 2H_{zr} l_{zr} + H_{yr} l_{yr} + H_{ys} l_{ys} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Pre jeden pól (pre polovicu uzavretej siločiarly):

$$\begin{aligned} U_{\text{magb}} &= \Delta U_{\text{magp}} + \Delta U_{\text{mag}\delta} + \Delta U_{\text{magzr}} + \Delta U_{\text{magyr}}/2 + \Delta U_{\text{magys}}/2 \\ U_{\text{magb}} &= H_{\text{p}}l_{\text{p}} + H_{\delta}\delta + H_{\text{zr}}l_{\text{zr}} + H_{\text{yr}}l_{\text{yr}}/2 + H_{\text{ys}}l_{\text{ys}}/2 \end{aligned} \quad (2.35)$$

Pritom vo vzťahu $N_{\text{b}}I_{\text{b}} = U_{\text{magb}}$ je N_{b} počet závitov na jednom budiacom póle.

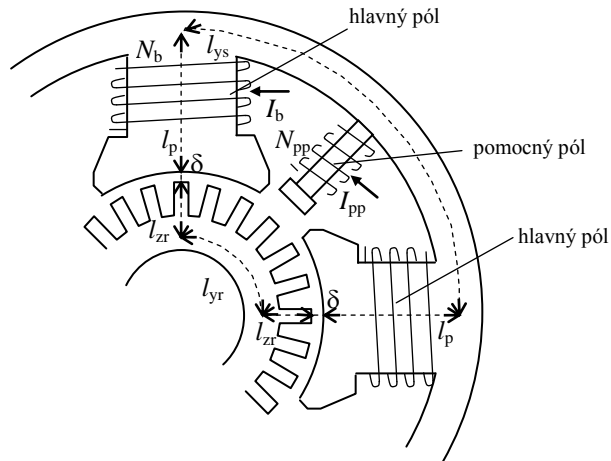
Pri návrhu stroja, kde sú dôležité všetky rozmery stroja a uvažujú sa skutočné vlastnosti materiálov magnetického obvodu, t. j. uvažuje sa skutočná magnetická permeabilita podľa magnetizačnej krivky použitého materiálu, vtedy treba počítať s úbytkami magnetického napätia na každom úseku obvodu a počet závitov budiaceho pólu riešiť podľa predchádzajúcich vzťahov.

Pri hrubom, orientačnom výpočte, kedy môžeme považovať magnetickú permeabilitu železných častí obvodu za nekonečne veľkú v porovnaní s permeabilitou vákuua (vzduchovej medzery), úbytok magnetického napätia na železných častiach možno zanedbať a vzťah (2.35) sa redukuje na tvar:

$$U_{\text{magb}} = N_{\text{b}}I_{\text{b}} = H_{\delta}\delta \quad (2.36)$$

kde

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \quad (2.37)$$



Obr. 2.7 Pričný rez jednej štvrtiny 4-pólového jednosmerného stroja s vyznačením uzavretej siločiarly magnetického toku

2.4.2 Magnetické napätie reakcie kotvy

Reakcia kotvy je spätné pôsobenie magnetického napätia kotvy na magnetické napätie hlavných (budiacich) pólov. Na jeden pól je magnetické napätie kotvy (súčin počtu vodičov a prúdu pretekajúceho vodičom) dané nasledujúco:

$$\frac{zI_v}{2p} \quad (2.38)$$

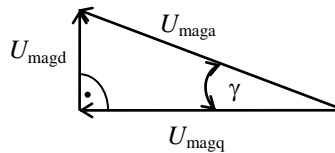
Ak tento výraz upravíme pomocou obvodu kotvy πd

$$\frac{zI_v}{2p} = \frac{zI_v}{\pi d} \frac{\pi d}{2p} = A\tau_p \quad (2.39)$$

dostaneme výraz, v ktorom vystupujú známe a veľmi dôležité veličiny jednosmerných strojov: A [A/m] je povrchové prúdové zaťaženie kotvy, alebo inak: lineárna prúdová hustota kotvy, alebo tiež: magnetické napätie kotvy na jednotku dĺžky obvodu kotvy (všetky tri výrazy sa používajú a táto hodnota sa pohybuje v medziach tisícov A/m) a pólový rozstup τ_p . Reakcia kotvy pôsobí pod pólom tak, že hlavný tok pod jednou polovicou pólu podporuje a pod druhou zoslabuje. Preto keď uvažujeme reakciu kotvy len pod jednou polovicou pólu, kde sa jej účinok prejaví, jej výraz bude:

$$U_{\text{maga}} = \frac{1}{2} A\tau_p = \frac{1}{2} \frac{zI_v}{2p} = \frac{1}{2} \frac{z}{2p} \frac{I_a}{2a} \quad (2.40)$$

V tomto vzťahu sme použili na vyjadrenie prúdu vodiča prúd kotvy podľa (2.21), ktorý je možné merať, a preto je obvykle zadaný.



Obr. 2.8 Reakcia kotvy po vychýlení osi kief o uhol γ , rozložená do pozdĺžnej (index „d“) a priečnej zložky (index „q“)

Jedným z účinkov reakcie kotvy je, že magnetický tok pod pólom je deformovaný a os magnetickej neutrály sa vysúva z geometrickej neutrály o určitý uhol γ , ktorý závisí od prúdu kotvy, čiže od zaťaženia. Preto jedným zo spôsobov, ako redukovať vplyv reakcie kotvy je vychýliť os kief z geometrickej neutrály o uhol γ , do novej magnetickej neutrály. Potom je reakcia kotvy v novej magnetickej neutrále a možno ju rozložiť do pozdĺžnej (index „d“) a priečnej zložky (index „q“), podľa obr. 2.8:

$$\frac{U_{\text{magd}}}{U_{\text{maga}}} = \frac{\gamma}{\pi/2} \Rightarrow U_{\text{magd}} = \frac{2\gamma}{\pi} U_{\text{maga}} \quad \frac{U_{\text{magq}}}{U_{\text{maga}}} = \frac{\frac{\pi}{2} - \gamma}{\pi/2} \Rightarrow U_{\text{magq}} = \left(1 - \frac{2\gamma}{\pi}\right) U_{\text{maga}} \quad (2.41)$$

kde U_{maga} vypočítame podľa vzťahu (2.40).

Ďalší spôsob, ako kompenzovať vplyv reakcie kotvy je zhotoviť pomocné (komutačné) póly, ktoré sú uložené v geometrickej neutrále, presne medzi hlavnými (budiacimi) pólmi, čím sa docieli čiastočné potlačenie reakcie kotvy v okolí geometrickej neutrály. Ich hlavnou úlohou je zlepšiť komutáciu stroja. Princíp pôsobenia pomocných (komutačných) pólů spočíva vo vytvorení určitej magnetickej indukcie v geometrickej neutrále pod pomocnými pólmi $B_{\delta_{pp}}$, ktorá pôsobí proti reakcii kotvy.

Počet závitů pomocných pólů N_{pp} určíme z požiadavky, aby vo vzduchovej medzere δ_{pp} pod pomocnými pólmi bola požadovaná indukcia $B_{\delta_{pp}}$. Čiže pomocný pól musí vytvoriť svojimi závitmi N_{pp} a prúdom kotvy I_a také magnetické napätie, aby sa jednak zrušilo magnetické napätie reakcie kotvy U_{maga} , a navyše, aby sa vytvorilo magnetické napätie $U_{\text{mag}\delta_{pp}}$ pre vytvorenie magnetickej indukcie $B_{\delta_{pp}}$. Potom pre jeden pomocný pól platí:

$$U_{\text{magpp}} = U_{\text{maga}} + U_{\text{mag}\delta_{pp}}$$

$$N_{pp}I_a = \frac{1}{2} \frac{z}{2p} \frac{I_a}{2a} + \frac{B_{\delta_{pp}}}{\mu_0} \delta_{pp} k_{C_{pp}} \quad (2.42)$$

kde sme počítali so vzduchovou medzerou δ_{pp} upravenou Carterovým činiteľom $k_{C_{pp}}$. Zo vzťahu (2.42) vypočítame žiadaný počet závitů pomocného pólu.

2.4.3 Výpočet vzduchovej medzery

Veľkosť vzduchovej medzery δ musí vyhovovať požiadavke, aby pod okrajom pólu magnetické napätie reakcie kotvy nebolo väčšie ako budiace magnetické napätie, aby sa pod týmto okrajom pólu nezmenila polarita magnetického poľa. Čiže magnetické napätie vo vzduchovej medzere od hlavných (budiacich) pólů

$$U_{\text{magb}} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta k_C = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta' \quad (2.43)$$

musí byť väčšie ako magnetické napätie reakcie kotvy:

$$U_{\text{maga}} = \frac{1}{2} \alpha A \tau_p \quad (2.44)$$

Vo vzťahu (2.43) sme uvažovali s Carterovým činiteľom, ktorý rešpektuje drážkovanie kotvy, a tak počítame s fiktívnou vzduchovou medzerou $\delta' = \delta k_C$, ktorá je väčšia ako skutočná δ . Vo vzťahu (2.44) uvažujeme s koeficientom pólového krytia α , ktorý je definovaný vzťahom (2.4), keďže magnetické napätie porovnáваме na okraji pólu a nie v geometrickej neutrále.

Takže zo vzťahů (2.43) a (2.44), ak napíšeme: $U_{\text{magb}} \geq U_{\text{maga}}$ dostávame vzťah pre výpočet veľkosti vzduchovej medzery:

$$\delta \geq C_{\delta} \tau_p A / B_{\delta} \quad (2.45)$$

kde

$$C_{\delta} = (0,4 \div 0,65)10^{-6} \quad (2.46)$$

podľa typu stroja. Ako si to čitateľ sám ľahko odvodí, konštanta C_{δ} zahŕňa α , μ_0 , k_C , preto je dané jej určité rozpätie podľa typu stroja. Ak máme k dispozícii všetky detaily konštrukcie, počítame podľa konkrétnych hodnôt koeficientov:

$$\delta \geq \frac{1}{2} \alpha \tau_p A \frac{\mu_0}{B_{\delta}} \quad (2.47)$$

2.5 Účinnosť, výkon a straty jednosmerných strojov

Účinnosť jednosmerného stroja je daná pomerom výkonu P a príkonu P_p . Ak je známy príkon, výkon P získame tým, že od príkonu odpočítame všetky straty v jednosmernom stroji ΔP , alebo ak je známy výkon, príkon dostaneme tak, že k výkonu straty pričítame:

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P_p - \Delta P}{P_p} \quad (2.48)$$

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P}{P + \Delta P}$$

Tieto vzťahy platia tak pre generátor (dynamo), čiže zdroj elektrickej energie, ako aj motor, čiže spotrebič elektrickej energie. Je však pravda, že pri výpočte treba použiť taký vzťah, aby sme doňho získali potrebné veličiny. Pretože napr. meranie momentu a otáčok na hriadelí nie je niekedy možné alebo nepresné.

Ak stroj pracuje ako dynamo, jeho príkon na hriadelí je v podobe mechanickej energie (je daný momentom na hriadelí M_{hr} a mechanicou uhlovou rýchlosťou Ω_{hr}) dodávaný pohonným strojom:

$$P_p = M_{hr} \Omega_{hr}, \quad (2.49)$$

kde mechanicá uhlová rýchlosť je daná vzťahom (2.7). Výkon je daný vo forme elektrickej energie, čiže napätia a prúdu na svorkách:

$$P = UI \quad (2.50)$$

Ak stroj pracuje ako motor, jeho príkon je vo forme elektrickej energie daný napätím a prúdom na svorkách stroja:

$$P_p = UI \quad (2.51)$$

a výkon na hriadelí vo forme momentu a mechanickej uhlovej rýchlosti:

$$P = M_{hr} \Omega_{hr} \quad (2.52)$$

Rozdiel medzi príkonom stroja a jeho výkonom sú straty, čiže tá časť energie, ktorá sa nezvratne premení na teplo:

$$\Delta P = P_p - P \quad (2.53)$$

Určovať straty meraním týmto spôsobom môže byť problematický najmä v strojoch veľkých výkonov s vysokou účinnosťou, kde chyba merania môže byť na úrovni rozdielu príkonu a výkonu. Stav pri zaťažení budeme analyzovať neskôr. Teraz sa budeme venovať stavu naprázdno. Keď jednosmerný motor pracuje bez zaťaženia v stave naprázdno, tečie zo siete prúd naprázdno I_0 , čiže pri určitom napätí jednosmernej siete U berie zo siete príkon naprázdno P_0 :

$$P_0 = UI_0 \quad (2.54)$$

ktorý kryje všetky zložky strát v stave naprázdno:

$$P_0 = \Delta P_{ja0} + \Delta P_b + \Delta P_{mec} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{ad} \quad (2.55)$$

Vysvetlíme jednotlivé zložky strát:

$$\Delta P_{ja0} = R_a I_{a0}^2 \quad (2.56)$$

sú Jouleove straty vo vinutí kotvy prechodom prúdu kotvy v stave naprázdno (nemusia sa zhodovať s celkovým prúdom naprázdno I_0 – pozri jednotlivé zapojenia jednosmerných motorov).

$$\Delta P_b = R_b I_b^2 = UI_b = \frac{U^2}{R_b} \quad (2.57)$$

sú straty v budiacom vinutí a ako vidíme v predchádzajúcom riadku, je to vlastne výkon jednosmerného vinutia a všetky tri vzťahy pre výkon možno použiť. Samozrejme vyberáme podľa toho, čo je dané a ktorý vzťah najrýchlejšie vedie k cieľu. Závisí od druhu jednosmerného motora, či tieto straty závisia, alebo nezávisia od zaťaženia.

Mechanické straty ΔP_{mec} sú súčtom všetkých strát trením (podrobnejšie pozri v [2]). Pri bežných výpočtoch sa nepočítajú detailne, ale sú dané ako určitá časť príkonu motora, alebo výkonu generátora. Považujú sa za straty nezávislé od zaťaženia.

ΔP_{Fe} sú straty v železe a sú súčtom strát hysteréznych a strát vírivými prúdmi pri premagnetovaní železného jadra kotvy – pozri podrobnejšie v [2]. Považujú sa za straty nezávislé od zaťaženia.

ΔP_{ad} sú dodatočné straty a sú dané ako určitá časť (napr. 1% - pozri príslušnú STN) príkonu motora, alebo výkonu generátora. Považujú sa za straty nezávislé od zaťaženia.

Z uvedeného prehľadu vyplýva, že tri zložky strát

$$\Delta P_{mec} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{ad} = \Delta P_0 \quad (2.58)$$

od zaťaženia nezávisia, t. j. sú rovnaké v stave naprázdno ako pri zaťažení. Tento fakt s výhodou využívame tak, že ich zisťujeme v stave naprázdno, voláme ich straty

naprázdno ΔP_0 a predpokladáme, že takú istú hodnotu týchto strát bude mať stroj aj pri zaťažení. V stave naprázdno sú to straty dominantné a v riešených príkladoch si ukážeme, že straty Jouleove možno v tomto stave zanedbať. Pre úplnosť treba dodať, že tieto straty môžu mierne závisieť od záťaže najmä v nekompenzovaných strojoch.

Z údajov merania naprázdno ich vypočítame zo vzťahu (2.54) a (2.55):

$$\Delta P_0 = \Delta P_{\text{mec}} + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{ad}} = UI_0 - \Delta P_{\text{ja}0} - \Delta P_{\text{b}} \quad (2.59)$$

Tieto straty možno tiež vypočítať na základe rozdielu medzi vyvíjaným elektromagnetickým momentom vo vzduchovej medzere M_e , pozri (2.22), ktorý reprezentuje vnútorný výkon vo vzduchovej medzere a momentom na hriadelí M_{hr} , ktorý reprezentuje výstupný výkon na hriadelí.

Preto môžeme hovoriť o momente strát $M_{\text{strát}}$, ktorý reprezentuje straty, ktoré nezávisia od zaťaženia, vznikajú v stave naprázdno, čiže sú to približne straty naprázdno:

$$\begin{aligned} M_{\text{strát}} &= M_e - M_{\text{hr}} \\ \Delta P_0 &= M_{\text{strát}} \Omega_{\text{hr}0} \end{aligned} \quad (2.60)$$

Ak je to motor s tvrdou mechanickou charakteristikou, možno približne uvažovať, že $\Omega_0 = \Omega_N$.

Pri zaťažení vznikajú v stroji tie isté zložky strát ako v stave naprázdno, ale straty, ktoré závisia od zaťažovacieho prúdu, budú mať hodnotu zodpovedajúcu tomuto prúdu. Napr. pri menovitej záťaži bude vinutím pretekať menovitý prúd a budú vznikať menovité straty vo vinutí, a teda celkové straty pri menovitom zaťažení budú:

$$\Delta P_N = \Delta P_{\text{ja}N} + \Delta P_{\text{b}N} + \Delta P_0 \quad (2.61)$$

kde

$$\Delta P_{\text{ja}N} = R_a I_{\text{a}N}^2 \quad (2.62)$$

sú straty vo vinutí kotvy, ktoré vznikajú prechodom menovitého prúdu v kotve. Ak má stroj ďalšie vinutia v sérii s vinutím kotvy (vinutie pomocných pólov, kompenzačné vinutie), tak je potrebné počítať straty aj v týchto vinutiach. Potom bude menovitý aj príkon, aj výkon (aj otáčky a uhlová rýchlosť) a aj účinnosť bude menovitá:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{\text{p}N}} = \frac{P_{\text{p}N} - \Delta P_N}{P_{\text{p}N}} \quad (2.63)$$

Pri inom zaťažení ako menovitom bude iný prúd, iné straty, iná účinnosť a treba ich detailne počítať.

RIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 2.1

Vlnové vinutie kotvy 4-póloveho jednosmerného stroja má 294 vodičov.

- Aký magnetický tok pod pólom je potrebný na to, aby sa pri rýchlosti $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ indukovalo na svorkách napätie $U_i = 230 \text{ V}$?
- Aký elektromagnetický moment sa vytvorí, ak kotvou preteká prúd $I_a = 120 \text{ A}$?
- Aké magnetické napätie pomocných pólov U_{magpp} je potrebné na to, aby sa pri prúde $I_a = 120 \text{ A}$ vytvorila pod pomocným pólom vo vzduchovej medzere magnetická indukcia $B_{\delta\text{pp}} = 0,15 \text{ T}$, ak efektívna radiálna dĺžka vzduchovej medzery pod pomocným pólom $\delta'_{\text{pp}} = \delta_{\text{pp}} k_C = 8 \text{ mm}$? Zanedbajte magnetické napätie v železe.
- O aký mechanický uhol γ treba posunúť kefy z priečnej neutrálnej osi, aby sa vytvorila magnetizácia v pozdĺžnej osi $U_{\text{magd}} = 200 \text{ A/pól}$?

Riešenie:

- Indukované napätie jednosmerných strojov je dané vzťahom

$$U_i = \frac{p}{a} \frac{z}{60} \Phi n$$

kde p je počet pólových dvojíc, $2a$ je počet paralelných vetiev, z je počet vodičov kotvy, Φ je magnetický tok pod pólom a n je rýchlosť točenia v $[\text{min}^{-1}]$. Pre vlnové vinutie platí, že $2a=2$ a potom

$$\Phi = \frac{U_i}{\frac{p}{a} \frac{z}{60} n} = \frac{230}{\frac{2}{1} \frac{294}{60} \cdot 1500} = 0,0156 \text{ Wb}$$

- Elektromagnetický moment jednosmerného stroja je daný

$$M_e = \frac{p}{a} \frac{z}{2\pi} \Phi I_a = \frac{2}{1} \frac{294}{2\pi} 0,0156 \cdot 120 = 175,2 \text{ Nm}$$

- V priečnej osi, kde sú umiestnené pomocné póly, pôsobí magnetické napätie reakcie kotvy. Magnetické napätie reakcie kotvy pripadajúce na jeden pól U_{maga} je dané vzťahom (2.40):

$$U_{\text{maga}} = \frac{1}{2} \frac{z}{2p} \frac{I_a}{2a} = \frac{1}{2} \frac{294}{4} \frac{120}{2} = 2205 \text{ A}$$

U_{maga} možno vyjadriť aj pomocou merného prúdového zaťaženia kotvy A a póloveho rozstupu τ_p , ale po dosadení dostaneme ten istý výraz, podľa ktorého sme už počítali:

$$U_{\text{maga}} = \frac{1}{2} A \tau_p = \frac{1}{2} \frac{z I_v \pi d}{\pi d} \frac{\pi d}{2 p} = \frac{1}{2} \frac{z}{2 p} \frac{I_a}{2 a}$$

Keby pomocný pól vytvoril magnetické napätie 2205 A, vo vzduchovej medzere pod pomocným pólom by bola nulová magnetická indukcia. Podľa zadania má byť vo vzduchovej medzere pod pomocným pólom magnetická indukcia 0,15 T, preto pomocný pól musí vytvoriť ďalšiu časť magnetického napätia a síce:

$$U_{\text{mag}\delta_{pp}} = \frac{B_{\delta_{pp}}}{\mu_0} \delta_{pp} k_{C_{pp}} = \frac{0,15}{4\pi \cdot 10^{-7}} 8 \cdot 10^{-3} = 955 \text{ A/pól}.$$

Teda pomocný pól musí vytvoriť celkové magnetické napätie

$$U_{\text{magpp}} = U_{\text{maga}} + U_{\text{mag}\delta_{pp}} = 2205 + 955 = 3160 \text{ A}$$

Pretože vinutie pomocných pólov je zapojené v sérii s vinutím kotvy a jeho závitmi preteká prúd kotvy $I_a = 120 \text{ A}$, potrebný počet závitov pomocných pólov je

$$N_{pp} = \frac{U_{\text{magpp}}}{I_a} = \frac{3160}{120} = 27 \text{ závitov}$$

d) Podľa obr. 2.8 posunutie osi kief o uhol γ vytvára magnetizačné alebo demagnetizačné napätie U_{magd} podľa toho, či pôsobí v smere, alebo proti smeru hlavného póľa, pozri (2.41):

$$U_{\text{magd}} = U_{\text{maga}} \frac{2\gamma_{el}}{\pi} = 2205 \frac{2\gamma_{el}}{180^\circ} 200 \text{ A}$$

$$\gamma_{el} = 8,16^\circ$$

$$\gamma_{mech} = 4,08^\circ$$

Príklad 2.2

Jednosmerné derivačné dynamo s menovitými hodnotami $U_N = 220 \text{ V}$ a $I_{aN} = 40 \text{ A}$ má odpor kotvy $R_a = 0,25 \Omega$. Odpor budiaceho vinutia, ktoré má 2500 závitov je $R_b = 110 \Omega$. Aby sme mohli zohľadniť nelinearitu obvodu, tabuľkou je daná charakteristika naprázdno pri $n = 500 \text{ min}^{-1}$ a derivačnom budení (pozri tab. 2.1).

- Nakreslite náhradnú schému derivačného dynamo.
- Aké je svorkové napätie pri $I_{aN} = 40 \text{ A}$, ak v stave naprázdno je $U_0 = 220 \text{ V}$?
- Aký regulačný odpor v obvode budenia R_{dreg} je potrebný na to, aby aj 1. v stave naprázdno, aj 2. pri menovitom zaťažení bolo svorkové napätie $U = 220 \text{ V}$? Reakciu kotvy a úbytok napätia na keľách zanedbajte. Nakreslite uvedené dva body do vonkajšej charakteristiky derivačného dynamo.
- Aké magnetické napätie budenia sme potrebovali na túto reguláciu (t. j. aby aj v stave naprázdno aj pri zaťažení bolo svorkové napätie 220 V)?

- e) Koľko závitov sériového budenia by bolo treba navinúť, aby sme dosiahli ten istý účinok, t. j. 100 % kompaudáciu (v stave naprázdno aj pri menovitom zaťažení má byť na svorkách 220 V)?
- f) Ako treba meniť prídavný regulačný odpor budiaceho obvodu R_{dreg} , ktorý je potrebný na to, aby sa menilo napätie od 220 V pri menovitej záťaži do 170 V pri stave naprázdno, pri rýchlosti otáčania 500 min^{-1} .

Tab. 2.1 Charakteristika naprázdno derivačného dynama pri 500 min^{-1}

U_i [V]	71	133	170	195	220	232
I_b [A]	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
k_ϕ [Vs]	1,36	2,54	3,25	3,72	4,2	4,43

Ako sme už uviedli, je výhodné určiť koeficient úmernosti elektromechanickej premeny energie k_ϕ medzi M_e a I_a , resp. U_i a Ω , ktorý zohľadňuje vzťah $U_i = C\Phi\Omega = k_\phi\Omega$. Odtiaľ pre 500 min^{-1} je $\Omega = 2\pi n / 60 = 2\pi \cdot 500 / 60 = 52,36 \text{ s}^{-1}$ a tento koeficient

$$k_\phi = \frac{U_i}{\Omega} = \frac{U_i}{52,36}$$

je uvedený v tab. 2.1 pre každé U_i . Na obr. 2.9 je charakteristika $k_\phi = f(I_b)$ a $U_i = f(I_b)$.

Riešenie:

- a) Náhradná schéma derivačného dynama je na obr. 2.9b
- b) Svorkové napätie pri menovitom prúde dostaneme po odčítaní úbytku napätia na odpore kotvy:

$$U = U_i - \Delta U_a = U_i - \Sigma R_a I_{aN} = 220 - 0,25 \cdot 40 = 210 \text{ V}$$

Tento stav je daný bodom A1, ktorý je znázornený na obr. 2.9c.

- c 1) V stave naprázdno pre $U_i = U_0 = 220 \text{ V}$ je podľa tab. 2.1 budiaci prúd $I_b=1,5 \text{ A}$. Preto celkový odpor v obvode budenia je

$$R_{d1} = \frac{U}{I_{b1}} = \frac{220}{1,5} = 146,6 \text{ } \Omega .$$

Potom regulačný odpor, ktorý treba do obvodu budenia zapojiť je:

$$R_{dreg1} = R_{d1} - R_b = 146,6 - 110 = 36,6 \text{ } \Omega$$

- c2) Ak je svorkové napätie 220 V, potom pri zaťažení menovitým prúdom je indukované napätie

$$U_i = U + \Delta U_a = 220 + 0,25 \cdot 40 = 230 \text{ V}$$

Tomuto indukovanému napätiu zodpovedá z charakteristiky naprázdno budiaci prúd 1,86A.

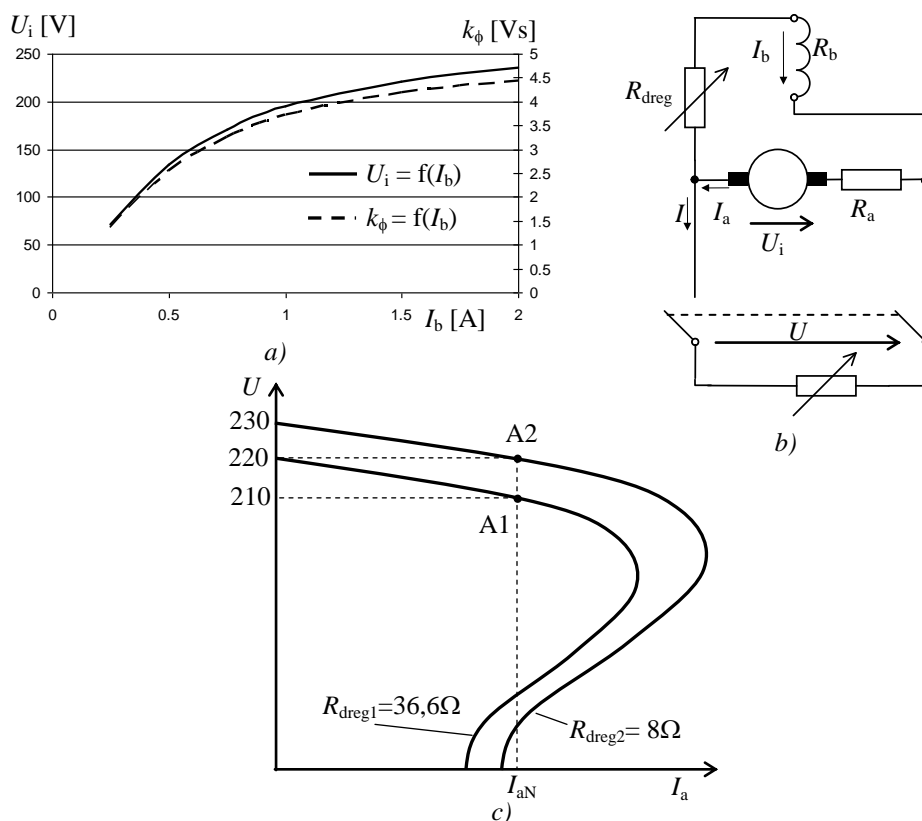
Na dosiahnutie tohto prúdu má byť v budiacom obvode zapojený celkový odpor

$$R_{d2} = \frac{U}{I_{b2}} = \frac{220}{1,86} = 118 \text{ } \Omega$$

a po odčítaní odporu budiaceho vinutia dostaneme požadovaný regulačný odpor pre tento stav:

$$R_{dreg2} = R_{d2} - R_b = 118 - 110 = 8 \text{ } \Omega$$

Bod pre stav A2 aj príslušná charakteristika sú naznačené na obr. 2.5c.



Obr. 2.9 K príkladu 2.2: a) Charakteristika naprázdno a závislosť $k_\phi = f(I_b)$ derivačného dynama z príkladu 2.2, b) náhradná schéma derivačného dynama, c) vonkajšie charakteristiky s vyznačením riešených bodov

d) Na túto reguláciu napätia, t. j., aby v stave naprázdno, aj pri menovitom zaťažení bolo svorkové napätie 220 V, sme potrebovali magnetické napätie:

$$\Delta U_{\text{magb}} = N_b \Delta I_b = 2500(1,86 - 1,5) = 900 \text{ A},$$

ktoré sme vytvorili zvýšením budiaceho prúdu reguláciou odporu v budiacom vinutí.

e) Ten istý stav dosiahneme, ak necháme navinúť sériové budiace závitov N_{bs} , ktorými pretečie prúd kotvy, a tak vytvorí rovnako veľké magnetické napätie:

$$U_{\text{magbs}} = N_{bs} I_a = 900 \text{ A}$$

Potom počet potrebných budiacich sériových závitov je:

$$N_{bs} = \frac{U_{\text{magbs}}}{I_a} = \frac{900}{40} = 23 \text{ závitov}$$

Tým by sme vytvorili kompaundné dynamo, s tzv. 100% kompaudáciou, kedy v stave naprázdno, aj pri zaťažení je menovité napätie.

f) Najprv treba vypočítať U_i pre dva zadané stavy, aby sme určili rozsah zmeny budiaceho prúdu a odtiaľ rozsah zmeny odporu budiaceho obvodu R_d :

Stav	Naprázdno	Pri zaťažení
$U_i = U + R_a I_a$	170 V	$220 + 0,25 \cdot 40 = 230 \text{ V}$
I_b z char.naprázdno	0,75 A	1,86 A
$R_d = U / I_b$	226,6 Ω	118,3 Ω
$R_{d\text{reg}} = R_d - R_b$	116,6 Ω	8,3 Ω

Príklad 2.3

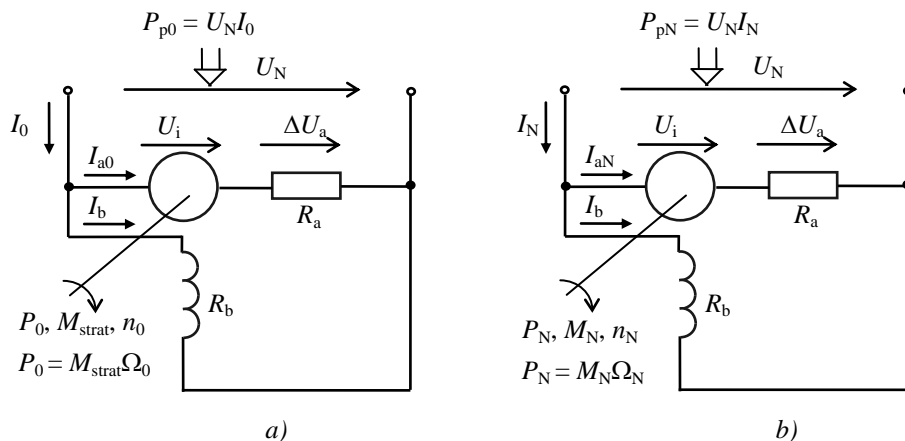
Jednosmerný stroj z príkladu 2.2 má pracovať ako motor pri $U = 220 \text{ V}$. Vyžaduje sa regulácia rýchlosti v pomere 2:1 zmenou budenia. Zanedbajte účinok reakcie kotvy, úbytku napätia na kefách, zanedbajte prúd v kotve v stave naprázdno ($I_{a0} = 0 \text{ A}$). Nakreslite náhradnú schému derivačného motora so smermi prúdov a napätí a vypočítajte:

- V akom rozsahu je potrebné meniť regulačný odpor budiaceho obvodu potrebného na to, aby tento derivačný motor mohol meniť otáčky od 500 min^{-1} v stave naprázdno do 1000 min^{-1} pri menovitej záťaži pri prúde $I_{aN} = 40 \text{ A}$.
- Hodnotu sériového budiaceho magnetického napätia potrebného na to, aby sa dosiahol pokles rýchlosti o 10 % zo stavu naprázdno (500 min^{-1}) do menovitého stavu, t. j. na 450 min^{-1} .
- Pokles rýchlosti zo stavu naprázdno po stav pri menovitej záťaži (40 A) so sériovým budením z bodu b), ak budiaci obvod je nastavený tak, že otáčky v stave naprázdno sú 1000 min^{-1} .

d) Ako sa zvýši moment motora s týmto sériovým budením v porovnaní s bodom a) pri najmenšom budení (1000 min^{-1} pri menovitom prúde).

Riešenie:

Náhradná schéma derivačného motora v stave naprázdno, aj pri zaťažení je na obr. 2.10.



Obr. 2.10 Náhradná schéma derivačného motora a) v stave naprázdno, b) pri menovitom zaťažení.

Úlohy a) a b) vyžadujú vypočítať rozsah zmeny k_ϕ , aby sme zistili požiadavky na budenie. Výsledky výpočtu sú zhrnuté do nasledujúcich tabuliek:

a)

Stav	Naprázdno	Menovitá záťaž
Prúd I	$I_{a0} = 0$	$I_{aN} = 40 \text{ A}$
Otáčky n	500 min^{-1}	1000 min^{-1}
Uhlová rýchlosť Ω	$52,36 \text{ s}^{-1}$	$104,7 \text{ s}^{-1}$
$U_i = 220 - 0,25I_a$	220 V	210 V
$k_\phi = U_i / \Omega$	4,2 Vs	2,0 Vs
I_b z krivky $k_\phi = f(I_b)$	1,5 A	0,38 A
$R_d = 220 / I_b$	146,7 Ω	579 Ω
$R_{\text{dreg}} = R_d - R_b$	36,7 Ω	469 Ω

b)

Otáčky n	500 min^{-1}	450 min^{-1}
Ω	$52,36 \text{ s}^{-1}$	$47,12 \text{ s}^{-1}$
$U_i = 220 - 0,25I_a$	220 V	210 V
$k_\phi = U_i / \Omega$	4,2 Vs	4,46 Vs
I_b z krivky $k_\phi = f(I_b)$	1,5 A	2,05 A
$U_{\text{magb}} = I_b N_b$	$1,5 \cdot 2500 \text{ A}$	$2,05 \cdot 2500 \text{ A}$

Takže zmena (zvýšenie) budiaceho prúdu v derivačnom (paralelnom) budiacom obvode I_b z 1,5 na 2,05 A zabezpečí pokles otáčok z 500 na 450 min^{-1} . Na túto zmenu bolo potrebné magnetické napätie v derivačnom magnetickom obvode:

$$\Delta U_{\text{magb}} = \Delta I_b N_b = (2,05 - 1,5) 2500 = 1375 \text{ A}$$

Ten istý účinok by sme dosiahli, keby sme zabezpečili magnetické napätie v sériovom magnetickom obvode vo veľkosti 1375 A. Na to je potrebné navinúť tento počet sériových závitov:

$$N_{\text{bs}} = \frac{U_{\text{magbs}}}{I_a} = \frac{1375}{40} \cong 35 \text{ závitov}$$

Tak by samozrejme vznikol kompaundný motor. Klasický jednosmerný derivačný motor (bez sériových budiacich závitov) by pri menovitom zaťažení prúdom $I_{aN} = 40 \text{ A}$ mal otáčky n_N , ktoré by sme vypočítali takto:

$$\frac{U_{iN}}{U_{i0}} = \frac{C_U \Phi n_N}{C_U \Phi n_0} = \frac{n_N}{n_0},$$

pretože budenie je konštantné. Ak berieme do úvahy, že prúd v kotve v stave naprázdno I_{a0} sa zanedbáva, potom

$$n_N = n_0 \frac{U - R_a I_{aN}}{U - R_a I_{a0}} = 500 \frac{220 - 0,25 \cdot 40}{220} = 477,3 \text{ min}^{-1}$$

Aby sa dosiahol pokles na 450 min^{-1} , treba zaradiť príslušný počet sériových budiacich závitov (kompaundný motor), alebo nenechať budenie konštantné, ale nastaviť zvýšené budenie na 2,05 A.

c) Ak sme raz derivačnému motoru pridali sériové budenie, tak je účinné aj pri ostatných prevádzkových stavoch motora. V tomto bode zadania máme vypočítať, ako sa zvýšenie budenia spôsobené sériovými závitmi prejaví pri menovitom zaťažení v takom prevádzkovom stave, pri ktorom v stave naprázdno má motor 1000 min^{-1} . Túto rýchlosť môže motor dosiahnuť pri zníženom budení, ktoré vypočítame pomocou závislosti $k_\phi = f(I_b)$, pričom

$$k_{\phi} = \frac{U_i}{\Omega} = \frac{220}{104,7} = 2,1$$

Teraz z obr. 2.9a zistíme, že zodpovedajúca hodnota budiaceho prúdu je 0,4 A. Táto hodnota budiaceho prúdu vytvára s príslušným počtom derivačných budiacich závitov 2500 magnetické napätie:

$$U_{\text{magb}} = 0,4 \cdot 2500 = 1000 \text{ A}$$

Avšak pri zaťažení prúdom kotvy 40 A sa k tejto hodnote pričíta sériové magnetické napätie 1375 A (pozri bod b)), takže celkové budiace magnetické napätie motora je

$$U_{\text{magcelk}} = 1000 + 1375 = 2375 \text{ A}$$

Na vytvorenie tohto magnetického napätia len derivačným obvodom by bol potrebný budiaci prúd

$$I_b = \frac{U_{\text{magcelk}}}{N_b} = \frac{2375}{2500} = 0,95 \text{ A}$$

Tomuto budiacemu prúdu z krivky $k_{\phi} = f(I_b)$ zodpovedá $k_{\phi} = 3,65$ Vs. Odtiaľ uhlová rýchlosť pri menovitom zaťažení bude

$$\Omega = \frac{U_i}{k_{\phi}} = \frac{210}{3,65} = 57,5 \text{ s}^{-1} = 549 \text{ min}^{-1}$$

Zodpovedajúca rýchlosť je teda 549 min^{-1} .

Pokles rýchlosti je preto

$$\frac{1000 - 549}{1000} \cdot 100 = 45,1\%$$

d) Elektromagnetický moment motora je daný vzťahom

$$M_e = C\Phi I_a = k_{\phi} I_a$$

Našou úlohou je vypočítať, ako sa zmení vyvíjaný elektromagnetický moment stroja pri zmene budenia, ak záťažový prúd ostane menovitý. Zároveň máme sledovať, či sa zmení výkon vo vzduchovej medzere. Pri najmenšom budiacom prúde 0,38 A pri 1000 min^{-1} a $104,7 \text{ s}^{-1}$ (bod a)) je $k_{\phi} = 2$. Preto pri zaťažení menovitým prúdom sa vyvíja moment

$$M_e = 2 \cdot 40 = 80 \text{ Nm}$$

Výkon vo vzduchovej medzere pri tomto momente a uhlovej rýchlosti $104,7 \text{ s}^{-1}$ je

$$P_{\delta} = M_e \Omega = 80 \cdot 104,7 = 8376 \text{ W}$$

S prídavným sériovým budením sa rýchlosť zníži na 549 min^{-1} , čiže $57,5 \text{ s}^{-1}$, koeficient $k_\phi = 3,65$ (bod c)) a vyvíja sa moment

$$M_e = 3,65 \cdot 40 = 146 \text{ Nm}$$

Výkon vo vzduchovej medzere je

$$P_\delta = 146 \cdot 57,5 = 8395 \text{ W}$$

Vidíme, že aj keď kvôli sériovému budeniu rýchlosť značne poklesla, elektromagnetický moment motora sa z toho istého dôvodu zvýšil o

$$\frac{146 - 80}{80} 100 = 82,5 \%$$

a výkon vo vzduchovej medzere zostal ten istý, čo je správne, pretože aj záťažový prúd reprezentujúci záťaž na hriadeli je konštantný. Rozdiel vo vypočítanej hodnote P_δ súvisí so zaokrúhľovaním čísel a nepresným odčítaním z krivky $k_\phi = f(I_b)$.

(Odporúčame nakresliť ilustračné charakteristiky $\Omega = f(I_a)$ pre všetky body zadania a nakresliť vypočítané pracovné body.)

Príklad 2.4

V príklade 2.3 bol prúd naprázdno derivačného motora zanedbaný. V skutočnosti celkový vstupný prúd naprázdno je $I_0 = 5 \text{ A}$, pričom obvod kotvy a obvod budenia sú pripojené na ten istý zdroj napätia 220 V a na hriadeli v stave naprázdno nie je žiadny moment záťaže, uvažujeme len moment potrebný na krytie strát naprázdno ($M_{\text{strát}}$).

Vypočítajte rýchlosť, výstupný výkon a účinnosť pri menovitej záťaži, ak menovitý prúd kotvy je $I_{aN} = 40 \text{ A}$.

Riešenie:

Budiaci prúd pri svorkovom napätí $U = 220 \text{ V}$ a odpore budiaceho vinutia $R_b = 110 \Omega$ je

$$I_b = \frac{U}{R_b} = \frac{220}{110} = 2 \text{ A}$$

Potom prúd v kotve v stave naprázdno je

$$I_{a0} = I_0 - I_b = 5 - 2 = 3 \text{ A}$$

Hodnota k_ϕ z magnetizačnej krivky (obr.2.9a) pre $I_b = 2 \text{ A}$ je $4,43 \text{ Vs}$. Indukované napätie v stave naprázdno je:

$$U_{i0} = U - R_a I_{a0} = 220 - 0,25 \cdot 3 = 219,25 \text{ V}$$

Potom skutočná rýchlosť v stave naprázdno je

$$\Omega_0 = \frac{U_{i0}}{k_\phi} = \frac{219,25}{4,43} = 49,49 \text{ s}^{-1} \Rightarrow n_0 = 473 \text{ min}^{-1}.$$

Moment vyvíjaný v stave naprázdno M_{e0} , ktorý kryje straty v stave naprázdno a nazývame ho moment strát $M_{\text{strát}} = M_{e0}$, možno vypočítať pomocou prúdu v kotve v stave naprázdno:

$$M_{e0} = M_{\text{strát}} = k_\phi I_{a0} = 4,43 \cdot 3 = 13,29 \text{ Nm},$$

Výkon vo vzduchovej medzere v stave naprázdno je:

$$P_{\delta 0} = M_{e0} \Omega_0 = 13,29 \cdot 49,49 = 657,72 \text{ W}$$

Tento výkon kryje straty naprázdno, čiže súčet strát v železe, mechanických a strát dodatočných, preto ho možno stotožniť so stratami naprázdno: $P_{\delta 0} = \Delta P_0$

Ak je známy výkon vo vzduchovej medzere, resp. straty naprázdno a uhlová rýchlosť naprázdno, potom moment strát možno vypočítať aj takto (urobíme skúšku správnosti):

$$M_{\text{strát}} = \frac{\Delta P_0}{\Omega_0} = \frac{657,72}{49,49} = 13,29 \text{ Nm}$$

Pri menovitom zaťažení, keď kotvou tečie prúd $I_{aN} = 40 \text{ A}$, je rýchlosť daná indukovaným napätím v menovitom stave $U_{iN} = 210 \text{ V}$ (pozri Príklad 2.3) a $k_\phi = 4,43$, pretože buďenie je to isté, ako v stave naprázdno:

$$\Omega_N = \frac{U_{iN}}{k_\phi} = \frac{210}{4,43} = 47,4 \text{ s}^{-1} \Rightarrow n_N = 453 \text{ min}^{-1}.$$

Ak zanedbáme zmeny momentu strát so zmenou rýchlosti, tak pri motoroch s tvrdou mechanickou charakteristikou, t. j. keď sa otáčky so zaťažením príliš nemenia, možno straty naprázdno ΔP_0 pri známom momente strát a menovitej rýchlosti približne vypočítať takto:

$$\Delta P_0 = M_{\text{strát}} \Omega_N = 13,29 \cdot 47,4 = 630 \text{ W}.$$

Rozdiel v hodnote v porovnaní s hodnotou $657,72 \text{ W}$ zodpovedá rozdielu medzi menovitou rýchlosťou a rýchlosťou naprázdno.

Výstupný menovitý mechanický výkon na hriadeľi P_N dostaneme, ak od hodnoty výkonu vo vzduchovej medzere pri menovitej záťaži $P_{\delta N}$ odčítame straty naprázdno:

$$P_{\delta N} = U_i I_{aN} = 210 \cdot 40 = 8400 \text{ W}$$

$$P_N = P_{\delta N} - \Delta P_0 = 8400 - 630 = 7770 \text{ W}$$

Vstupný elektrický príkon je daný súčinom svorkového napätia a prúdu, ktorý tečie zo zdroja a rozdeľuje sa na prúd kotvy a budiaci prúd. V menovitom stave je vstupný príkon takýto:

$$P_{PN} = U I_N = U (I_{aN} + I_b) = 220(40 + 2) = 9240 \text{ W}$$

takže účinnosť motora v menovitom stave je:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{PN}} = \frac{7770}{9240} = 0,841$$

Účinnosť pre inú ako menovitú záťaž treba vypočítať podobným spôsobom s daným záťažovým prúdom.

Príklad 2.5

Derivačný jednosmerný motor má tieto údaje: $U_N = 500 \text{ V}$, $n_N = 500 \text{ min}^{-1}$, $I_{aN} = 42 \text{ A}$, odpor kotvy $R_a = 0,6 \Omega$, odpor budiaceho vinutia $R_b = 500 \Omega$. Je daná magnetizačná charakteristika stroja pri 500 min^{-1} :

$I_b \text{ [A]}$	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$U_i \text{ [V]}$	285	375	445	500	540
$k_\phi = U_i / \Omega_N \text{ [Vs]}$	5,44	7,16	8,5	9,56	10,3

- Vypočítajte všetky dôležité parametre motora v menovitom chode, hlavne: U_{iN} , $k_{\phi N}$, I_{bN} , R_{bN} , M_N .
- Vypočítajte hodnotu odporu, ktorý treba do obvodu motora (uvedte, do ktorého obvodu motora) pridať, aby pri menovitom momente mal motor otáčky $1. 300 \text{ min}^{-1}$, $2. 600 \text{ min}^{-1}$.
- Vypočítajte hodnotu odporu, ktorý treba do obvodu motora (uvedte, do ktorého obvodu), zaradiť, aby pri otáčkach 800 min^{-1} mal motor ten istý výkon $P = M \cdot \Omega$ ako v úlohe b2).

Magnetizačná charakteristika je na obr. 2.11.

Riešenie:

- Indukované napätie pri menovitom zaťažení:

$$U_{iN} = U_N - R_a I_{aN} = 500 - 0,6 \cdot 42 = 474,8 \text{ V}$$

Menovitá uhlová rýchlosť:

$$\Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60} = \frac{2\pi \cdot 500}{60} = 52,36 \text{ s}^{-1}$$

Koeficient magnetického toku:

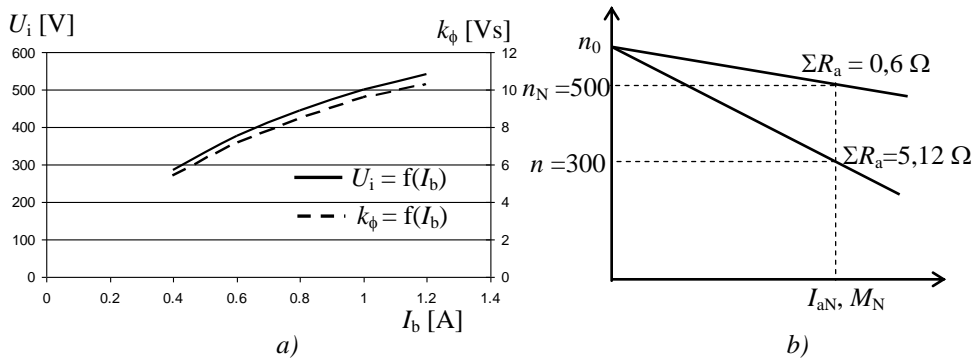
$$k_{\phi N} = \frac{U_{iN}}{\Omega_N} = \frac{474,8}{52,36} = 9,07 \text{ Vs}$$

Pre tento koeficient je I_b z magnetizačnej charakteristiky (obr. 2.11) 0,9 A. Celkový odpor budiaceho obvodu pre menovitý stav

$$R_{bN} = \frac{U_N}{I_{bN}} = \frac{500}{0,9} = 555 \text{ } \Omega$$

a elektromagnetický moment

$$M_{eN} = k_{\phi} I_{aN} = 9,07 \cdot 42 = 381 \text{ Nm}$$



Obr. 2.11 K príkladu 2.5: a) Magnetizačná charakteristika derivačného motora, b) zmena mechanickej charakteristiky zmenou odporu v obvode kotvy

b1) Pretože $300 \text{ min}^{-1} < 500 \text{ min}^{-1}$, čiže požadované otáčky sú menšie ako menovité, reguláciu možno urobiť zaradením odporu do obvodu kotvy. Ak má motor pracovať pri M_N , kotvou bude tiecť prúd I_{aN} , pretože buďenie ostáva konštantné:

Zo vzťahu (2.25) a (2.7) je uhlová rýchlosť pri 300 min^{-1}

$$\Omega_{300} = \frac{U_N - \Sigma R I_{aN}}{k_{\phi N}} = \frac{2\pi 300}{60} = 10\pi$$

Z toho istého vzťahu

$$\Sigma R = \frac{U_N - k_{\phi N} \Omega_{300}}{I_{aN}} = \frac{500 - 9,07 \cdot 10\pi}{42} = 5,12 \text{ } \Omega$$

Tento súčet odporov sa skladá z odporu kotvy a hľadaného prídavného odporu, ktorý treba zaradiť do série s odporom kotvy, aby sa rýchlosť znížila na 300 min^{-1} . Takže hľadaný odpor je:

$$R_s = \Sigma R - R_a = 5,12 - 0,6 = 4,52 \text{ } \Omega$$

b2) Pretože $600 \text{ min}^{-1} > 500 \text{ min}^{-1}$, reguláciu treba urobiť zoslabením toku, teda zaradením odporu do obvodu budenia (k_ϕ sa zmení a je neznámou v rovnici pre Ω). Opäť z rovnice (2.25) a (2.27):

$$\Omega_{600} = \frac{U_N}{k_{\phi 600}} - \frac{R_a}{k_{\phi 600}} I_a = \frac{U_N}{k_{\phi 600}} - \frac{R_a M_{eN}}{(k_{\phi 600})^2}$$

Pretože $M_e = k_\phi I_a$ a k_ϕ je neznáma, neznámy je aj prúd I_a . Moment M_e je však známy (je menovitý), preto sme za I_a dosadili M_N / k_ϕ . Po úprave dostaneme kvadratickú rovnicu:

$$\Omega_{600} (k_{\phi 600})^2 - U_N k_{\phi 600} + R_a M_{eN} = 0$$

$$k_{\phi 600} = \frac{U_N + \sqrt{(U_N^2 - 4\Omega_{600} R_a M_{eN})}}{2 \cdot \Omega_{600}} = \frac{500 + \sqrt{500^2 - 4 \cdot 20\pi \cdot 0,6 \cdot 381}}{2 \cdot 20\pi} = 7,47 \text{ Vs}$$

$$\text{kde } \Omega_{600} = \frac{2\pi 600}{60} = 20\pi.$$

Z magnetizačnej krivky (obr. 2.11) je pre $k_\phi = 7,47$ budiaci prúd $I_b = 0,64 \text{ A}$ a odpor budiaceho obvodu

$$R_{\text{bcelk}} = R_{\text{bN}} + R_{\text{breg}} = \frac{U_N}{I_b} = \frac{500}{0,64} = 781 \Omega$$

Teda do budiaceho obvodu treba v porovnaní s menovitým stavom zaradiť prídavný regulačný odpor R_{breg} :

$$R_{\text{breg}} = R_{\text{bcelk}} - R_{\text{bN}} = 781 - 555 = 226 \Omega$$

c) Pretože $800 \text{ min}^{-1} > 500 \text{ min}^{-1}$, reguláciu treba opäť urobiť zaradením odporu do obvodu budenia. Výpočet k_ϕ je rovnaký ako v bode b2), v čitateli sa nič nemení, pretože požiadavka bola, že $P = M\Omega$ ostáva rovnaké (druhý člen pod odmocninou obsahuje $M\Omega$), ako v bode b2), teda mení sa len menovateľ na hodnotu

$$2\Omega_{800} = 2 \frac{2\pi 800}{60} = 167,6$$

$$k_{\phi 800} = \frac{U_N + \sqrt{(U_N^2 - 4\Omega_{800} R_a M_{eN})}}{2 \cdot \Omega_{800}} = \frac{500 + \sqrt{500^2 - 4 \cdot 20\pi \cdot 0,6 \cdot 381}}{167,6} = 5,601 \text{ Vs}$$

Z magnetizačnej krivky pre vypočítané $k_{\phi 800} = 5,601$ je budiaci prúd $I_b = 0,41 \text{ A}$. Potom celkový odpor v budiacom obvode má byť:

$$R_{\text{bcelk}} = R_{\text{bN}} + R_{\text{breg}} = \frac{U_{\text{N}}}{I_{\text{b}}} = \frac{500}{0,41} = 1219 \, \Omega,$$

To znamená, že do budiaceho obvodu treba zaradiť tento regulačný odpor:

$$R_{\text{breg}} = R_{\text{bcelk}} - R_{\text{bN}} = 1219 - 555 = 664 \, \Omega$$

Príklad 2.6

Motor s cudzím budením, ktorý má na svorkách kotvy aj budenia 220 V, 1000 min⁻¹, 7,5 kW má účinnosť 85 % pri menovitom zaťažení. Celkový odpor budiaceho vinutia je $R_{\text{b}} = 100 \, \Omega$, odpor kotvy $R_{\text{a}} = 0,4 \, \Omega$. Nakreslite náhradnú schému motora s cudzím budením a vypočítajte:

- prúd, koeficient magnetického toku, elektromagnetický moment a moment na hriadeli v menovitom stave (I_{aN} , $k_{\phi\text{N}}$, M_{eN} , M_{N}), ďalej moment strát, straty naprázdno a celkové straty.
- napájacie napätie, pri ktorom by rýchlosť bola polovicou menovitej rýchlosti, ak moment záťaže M_{z} je úmerný Ω^2 ; pritom k_{ϕ} a R_{a} sa nemenia,
- prídavný odpor v obvode kotvy, ktorým by sa dosiahol pokles rýchlosti na polovicu menovitej hodnoty, ak moment záťaže je priamo-úmerný rýchlosti; k_{ϕ} a U sú nezmenené, čiže menovité ($k_{\phi\text{N}}$, U_{N}),
- koeficient magnetického toku k_{ϕ} potrebného na to, aby rýchlosť pri menovitom výkone bola 2000 min⁻¹, napätie menovité a R_{a} nezmenené,
- elektromagnetický moment, ak napätie, tok a rýchlosť sú polovičné voči svojej menovitej hodnote a v obvode kotvy je zaradený prídavný odpor 2 Ω .

Riešenie:

- Účinnosť motora v menovitom stave je daná

$$\eta_{\text{N}} = \frac{P_{\text{N}}}{P_{\text{pN}}} = \frac{P_{\text{N}}}{P_{\text{pa}} + P_{\text{pb}}} = \frac{P_{\text{N}}}{U_{\text{N}}I_{\text{aN}} + U_{\text{N}}I_{\text{b}}} = \frac{7500}{220I_{\text{aN}} + 220 \cdot 2,2} = 0,85$$

V menovateli zlomku pre účinnosť je elektrický príkon, ktorý sa skladá z dvoch zložiek: príkonu obvodu kotvy a príkonu budiaceho vinutia, pričom

$$I_{\text{b}} = \frac{U_{\text{N}}}{R_{\text{b}}} = \frac{220}{100} = 2,2 \, \text{A}.$$

Štítkový údaj o výkone motora je vždy mechanický výkon na hriadelí, preto 7,5 kW je v čitateli.

Zo vzťahu pre účinnosť vypočítame prúd v obvode kotvy $I_{\text{aN}} = 37,9 \, \text{A}$. Potom celkový príkon v menovitom stave je

$$P_{\text{pN}} = 220 \cdot 37,9 + 220 \cdot 2,2 = 8822 \, \text{W}$$

Zo vzťahu pre indukované napätie vypočítame koeficient magnetického toku pre menovitý stav:

$$k_{\phi N} = \frac{U_i}{\Omega_N} = \frac{U_N - R_a I_{aN}}{2\pi n_N / 60} = \frac{220 - 0,4 \cdot 37,9}{2\pi 1000 / 60} = 1,956 \text{ Vs}$$

Menovitý elektromagnetický moment

$$M_{eN} = k_{\phi N} I_{aN} = 1,956 \cdot 37,9 = 74,13 \text{ Nm}$$

Menovitý moment na hriadeli

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{7500}{104,7} = 71,63 \text{ Nm}$$

$$\text{kde } \Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60} = \frac{2\pi 1000}{60} = 104,7 \text{ s}^{-1}.$$

Moment strát

$$M_{\text{strát}} = M_{eN} - M_N = 74,13 - 71,63 = 2,5 \text{ Nm}$$

Straty naprázdno, ak neuvažujeme pokles rýchlosti pri zaťažení, t. j. predpokladáme, že $\Omega_0 = \Omega_N$:

$$\Delta P_0 = M_{\text{strát}} \Omega_0 = 2,5 \cdot 104,7 = 261,75 \text{ W}$$

Celkové straty sú dané rozdielom príkonu a výkonu a v menovitom stave majú hodnotu:

$$\Delta P_N = P_{pN} - P_N = 8823 - 7500 = 1323 \text{ W}.$$

Urobíme skúšku správnosti a vypočítame súčet všetkých zložiek strát:

$$\begin{aligned} \Delta P_N &= R_a I_{aN}^2 + R_b I_b^2 + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mec} + \Delta P_{ad} = \\ &= \Delta P_{jaN} + \Delta P_b + \Delta P_0 = 0,4 \cdot 37,9^2 + 100 \cdot 2,2^2 + 261,75 = 1319 \text{ W} \end{aligned}$$

Tento výsledok sa dobre zhoduje s hodnotou 1323 W.

Všetky ostatné zadania vypočítame pomocou vzťahu pre rýchlosť (2.27),

$$\Omega = \frac{U}{k_{\phi}} - \frac{R_a M_e}{k_{\phi}^2},$$

ktorý vždy vhodne upravíme. Pretože aj moment strát je pre motor záťažou, budeme v ustálenom stave uvažovať, že $M_e = M_{zt}$:

b) Pri polovičnej rýchlosti a záťaži, ktorej mechanická charakteristika je úmerná štvorcu rýchlosti $\Omega_{1/2} = 52,36 \text{ s}^{-1}$

$$\frac{M_{zt}}{M_{ztN}} = \frac{k\Omega^2}{k(\Omega_N)^2} = \frac{(1/2\Omega_N)^2}{(\Omega_N)^2} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \Rightarrow M_{zt} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 M_{ztN}$$

$$M_{zt} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 M_{ztN} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot 71,63 = 17,9 \text{ Nm}$$

sa vyžaduje napätie

$$U = U_i + R_a I_a = k_{\phi N} \Omega_{1/2} + \frac{R_a M_{zt}}{k_{\phi N}} = 1,956 \cdot 52,36 + \frac{0,4 \cdot 17,9}{1,956} = 106,07 \text{ V} = 0,482 U_N,$$

čiže napätie treba znížiť na 48,2 % U_N .

c) Odlišná mechanická charakteristika záťaže dáva lineárnu závislosť momentu od rýchlosti, preto

$$M_{zt} = \frac{1}{2} M_N = \frac{1}{2} 71,63 = 35,815 \text{ Nm}.$$

Potom pri konštantnom napätí a magnetickom toku má byť v obvode kotvy zaradený celkový odpor:

$$R_{\text{acelk}} = R_s + R_a = \frac{U - k_{\phi N} \Omega_{1/2}}{M_{zt} / k_{\phi N}} = \frac{220 - 1,956 \cdot 52,36}{35,815 / 1,956} = 6,422 \text{ } \Omega,$$

čiže prídavný odpor je

$$R_s = R_{\text{acelk}} - R_a = 6,422 - 0,4 = 6,022 \text{ } \Omega$$

d) Pri menovitom napätí a danom odpore kotvy sa rýchlosť 2000 min⁻¹ dosiahne pri magnetickom toku, ktorý je reprezentovaný jeho koeficientom k_{ϕ} . Ten vypočítame podľa vzťahu pre k_{ϕ} z príkladu 2.5b2):

$$k_{\phi} = \frac{U_N + \sqrt{(U_N^2 - 4R_a \Omega_N M_N)}}{2 \cdot \Omega_{2000}} = \frac{220 + \sqrt{220^2 - 4 \cdot 0,4 \cdot 104,7 \cdot 71,63}}{2 \cdot 2\pi \cdot 2000 / 60} = 0,98 \text{ Vs}$$

Všimnite si, že pod odmocninou sú v súčine použité menovité hodnoty, pretože je dané, že sa má zachovať menovitý výkon $P_N = M_N \Omega_N$. Skontrolujeme, že $I_a = I_{aN}$ a vypočítame skutočný vyvíjaný moment. Prúd môžeme vypočítať zo vzťahov (2.14) až (2.17)

$$U = U_i + R_a I_a = k_{\phi} \Omega_{2000} + R_a I_a \Rightarrow I_a = \frac{U - k_{\phi} \Omega_{2000}}{R_a} = \frac{220 - 0,98 \cdot 209,43}{0,4} = 37 \text{ A}$$

Vidíme, že prúd je skutočne menovitý (malý rozdiel vznikol zaokrúhľovaním). Vypočítajme, ako sa zmení elektromagnetický vyvíjaný moment

$$M_e = k_\phi I_a = 0,98 \cdot 37 = 36,26 \text{ Nm}$$

e) Ak napätie, tok a rýchlosť sú polovičné voči svojej menovitej hodnote a v obvode kotvy je zaradený prídavný odpor 2Ω , tak vyvíjaný elektromagnetický moment je:

$$M_e = k_\phi I_a = k_\phi \frac{(U - U_i)}{R_{\text{acelk}}} = k_\phi \frac{(U - k_\phi \Omega)}{R_{\text{acelk}}} = \frac{1,956}{2} \frac{(110 - 0,978 \cdot 52,36)}{2 + 0,4} = 24 \text{ Nm} = 0,323 M_N$$

a prúd v kotve by bol:

$$I_a = \frac{M_e}{k_\phi} = \frac{24}{0,978} = 24,5 \text{ A} = 0,646 I_{aN}$$

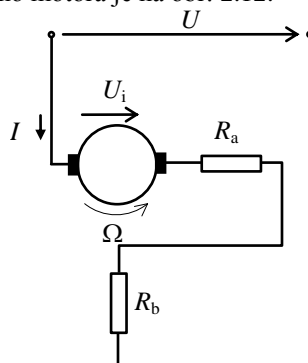
Príklad 2.7

Sériový jednosmerný motor, 220 V, má pri menovitej záťaži prúd $I_{aN} = 20 \text{ A}$ a menovitú rýchlosť $n_N = 700 \text{ min}^{-1}$. Súčet odporov v obvode kotvy je $0,5 \Omega$. Predpokladáme, že je v nenasýtenom stave.

- Nakreslite náhradnú schému sériového motora.
- Vypočítajte, akú bude mať rýchlosť, ak:
 - moment záťaže stúpne o 44 %?
 - prúd motora je 10 A?

Riešenie:

- Náhradná schéma sériového motora je na obr. 2.12.



Obr. 2.12 Náhradná schéma jednosmerného sériového motora

- Rýchlosť je daná indukovaným napätím a budením:

$$\Omega = \frac{U_i}{k_\phi} = \frac{U - \Sigma R I_a}{k_\phi}$$

Pritom menovitá rýchlosť je

$$\Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60} = \frac{2\pi 700}{60} = 73,3 \text{ s}^{-1}$$

Do vzťahu pre Ω potrebujeme poznať prúd a jeho vzťah k záťažovému momentu. Pretože v sériovom motore je budiaci prúd zároveň prúdom kotvy, vzťah pre moment v sériovom motore možno upraviť takto:

$$M_e = C\Phi I_a = Ck_a I_a = k_M I_a^2$$

Potom pre menovitý stav by platilo:

$$M_{eN} = k_M I_{aN}^2$$

a pre moment zvýšený o 44 %:

$$M_e = 1,44 M_{eN} = k_M I_a^2$$

Pomer momentov v týchto dvoch stavoch umožní vypočítať prúd motora I_a :

$$\frac{M_e}{M_{eN}} = \frac{1,44 M_{eN}}{M_{eN}} = \frac{k_M I_a^2}{k_M I_{aN}^2} = \frac{I_a^2}{I_{aN}^2} = 1,44$$

$$I_a = \sqrt{1,44} I_{aN} = 1,2 I_{aN} = 1,2 \cdot 20 = 24 \text{ A}$$

Všimnime si (obr.2.13a), že moment stúpol o 44 % a prúd iba o 20 %. Toto zvýšenie prúdu spôsobí aj zvýšenie toku a spôsobí aj zmenu indukovaného napätia a rýchlosti. Opäť napíšeme vzťahy pre Ω pre obidva uvažované stavy:

$$\Omega_N = \frac{U_{iN}}{k_{\phi N}} = \frac{U - \Sigma R \cdot I_{aN}}{k_M I_{aN}} \qquad \Omega = \frac{U_i}{k_\phi} = \frac{U - \Sigma R \cdot I_a}{k_M I_a}$$

Ak urobíme pomer týchto vzťahov

$$\frac{\Omega}{\Omega_N} = \frac{U_i}{U_{iN}} \cdot \frac{k_{\phi N}}{k_\phi} = \frac{(U - \Sigma R \cdot I_a)}{(U - \Sigma R \cdot I_{aN})} \cdot \frac{k_M I_{aN}}{k_M I_a} = \frac{(U - \Sigma R \cdot I_a)}{(U - \Sigma R \cdot I_{aN})} \cdot \frac{I_{aN}}{I_a}$$

tak hľadaná rýchlosť je:

$$\Omega = \Omega_N \frac{(U - \Sigma R I_a)}{(U - \Sigma R I_{aN})} \frac{I_{aN}}{1,2 I_{aN}} = 73,3 \frac{(220 - 0,5 \cdot 24)}{(220 - 0,5 \cdot 20)} \cdot \frac{1}{1,2} = 60,5 \text{ s}^{-1} \Rightarrow n = 578 \text{ min}^{-1}$$

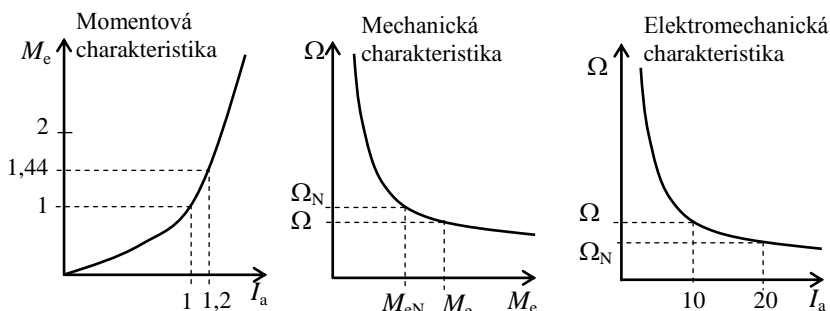
Je dôležité si všimnúť, že v sériovom motore aj indukované napätie, aj tok závisia od prúdu kotvy.

V ďalších príkladoch týkajúcich sa derivačného motora, alebo motora s cudzím budením uvidíme, že tam je magnetický tok konštantný a nezávisí od záťažového prúdu.

b2) Pre prúd motora $I_a = 10$ A výpočet urobíme priamo podľa predchádzajúceho vzťahu:

$$\Omega = 73,3 \frac{(220 - 0,5 \cdot 10)}{(220 - 0,5 \cdot 20)} \cdot \frac{20}{10} = 150,09 \text{ s}^{-1} \Rightarrow n = 1433 \text{ min}^{-1}$$

Odporúčame nakresliť elektromechanické a mechanické charakteristiky a vyznačiť zadané a vypočítané body.



Obr.2.13 Charakteristiky sériového motora, a) momentová charakteristika zodpovedajúca príkladu 2.7 – bod b1), b) mechanická charakteristika zodpovedajúca príkladu 2.7 – bod b1), c) elektromechanická charakteristika zodpovedajúca príkladu 2.7 – bod b2)

Príklad 2.8

Jednosmerný sériový motor má $U_N = 250$ V a odpor v obvode kotvy $\Sigma R = 1,2\Omega$.

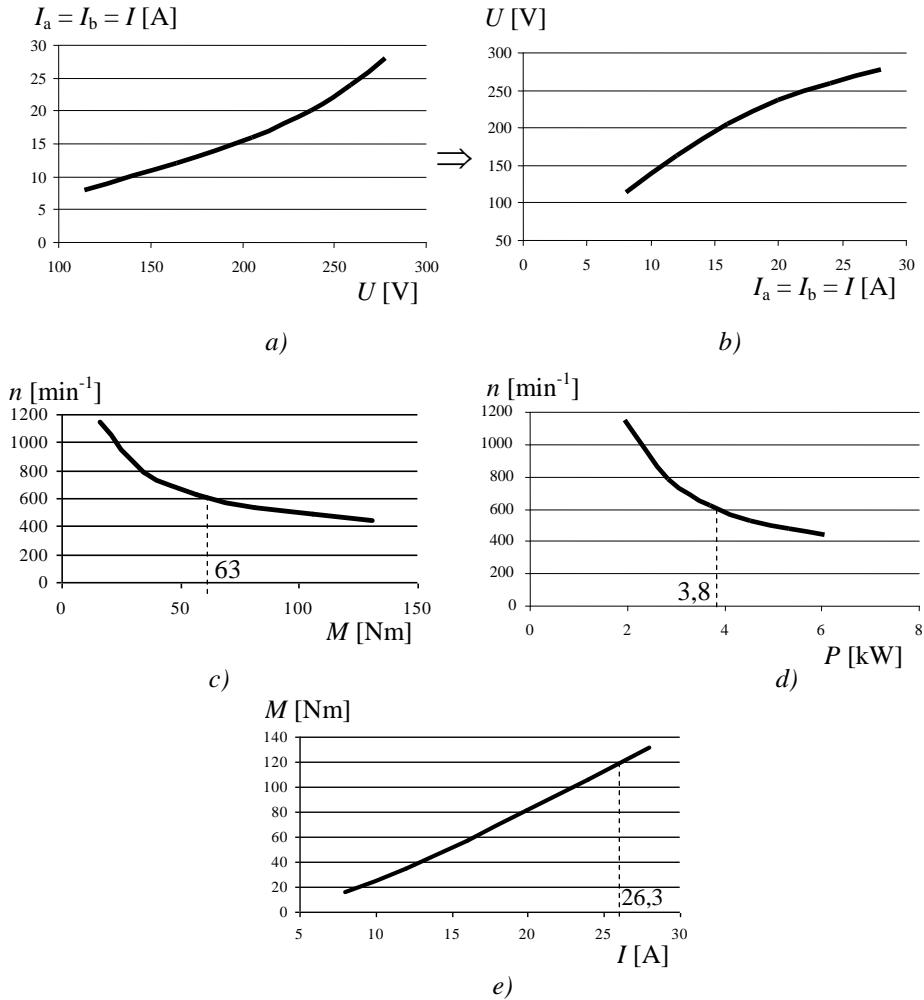
- Vypočítajte a nakreslite mechanickú charakteristiku rýchlosť - moment a rýchlosť - výkon z ďalej uvedených údajov a vypočítajte moment a výkon pri 600 min^{-1} .
- Vypočítajte hodnotu prídavného sériového odporu na obmedzenie záberového momentu pri menovitom napätí na 120 Nm .

Je daná magnetizačná charakteristika nameraná tak, že stroj beží ako motor napájaný premenlivým svorkovým napätím pri konštantnej rýchlosti 500 min^{-1} ($52,36 \text{ s}^{-1}$):

U [V]	114	164	205	237	259	278
$I_b = I_a = I$ [A]	8	12	16	20	24	28
$U_{itest} = U - 1,2I_b$ [V]	104,4	149,6	185,8	213	230,2	244,4
$k_\phi = \frac{U_{itest}}{\omega_{itest}} = \frac{U_{itest}}{52,36}$ [Vs]	2	2,86	3,55	4,07	4,4	4,67
$U_i = 250 - 1,2I$ [V]	240,4	235,6	230,8	226	221,2	216,4
$\Omega = U_i / k_\phi$ [s^{-1}]	120,2	82,4	65	55,5	50,3	46,3
$n = 60\Omega / 2\pi$ [min^{-1}]	1148	787	621	530	480	442
$M_e = k_\phi I$ [Nm]	16	34,3	56,8	81,4	105,6	130,8
$P = M \Omega$ [kW]	1,93	2,83	3,7	4,52	5,31	6,06

Riešenie:

a) Určili sme závislosť $k_\phi = f(I_b)$ a môžeme vypočítať rýchlosť a moment motora pre dané svorkové napätie 250 V, pričom $I_a = I_b = I$:



Obr. 2.14 Charakteristiky k príkladu 2.7, a) závislosť $I = f(U)$, b) závislosť $U = f(I)$, c) závislosť $n = f(M)$ pre bod príkladu 2.7a), d) závislosť $n = f(P)$ pre bod príkladu 2.7a), e) závislosť $M = f(I)$ pre bod príkladu 2.7b

Z výsledkov uvedených v tabuľke nakreslíme charakteristiky $n = f(M)$, $n = f(P)$ a pre rýchlosť 600 min⁻¹ odčítame moment 63 Nm a výkon 3,8 kW (obr. 2.14c,d)

b) Pre druhú časť úlohy je potrebné nakresliť charakteristiku $M = f(I)$, ktorej údaje sú v predchádzajúcej tabuľke, pretože k určitej hodnote momentu patrí len jedna hodnota prúdu. Potom z krivky $M = f(I)$, pozri obr. 2.14e, pre hodnotu momentu $M = 120 \text{ Nm}$ odčítame prúd $I = 26,3 \text{ A}$. Tento prúd bude pri rozbehu prúdom záberovým a aby sme pri rozbehu obmedzili prúd na túto hodnotu potrebujeme v obvode kotvy celkový odpor

$$R_{\text{celk}} = R_a + R_s = \frac{U - U_i}{I} = \frac{250 - 0}{26,3} = 9,51 \Omega$$

Preto k samotnému odporu kotvy treba do série zapojiť odpor

$$R_s = R_{\text{celk}} - R_a = 9,51 - 1,2 = 8,31 \Omega.$$

Indukované napätie sme uvažovali pri rozbehu $U_i = 0$, pretože aj $\Omega = 0$.

Príklad 2.9

Sériový jednosmerný motor má výkon 2 kW pri 1500 min^{-1} , 220 V a účinnosť $0,7$. Celkový odpor v obvode kotvy je $1,2 \Omega$.

- Nakreslite náhradnú schému a vypočítajte menovitý prúd a moment motora.
- Ako sa zmení 1. prúd, 2. otáčky a 3. výkon motora, ak moment klesne na polovicu? Úbytok na keľách uvažujte 2 V .
- Aký odpor treba do obvodu zaradiť, aby pri nezmenenom, t. j. menovitom momente klesli otáčky na polovicu?

Riešenie:

Náhradná schéma sériového motora je na obr.2.12.

- Menovitý prúd

$$I_N = \frac{P}{\eta U_N} = \frac{2000}{0,7 \cdot 220} = 12,98 \text{ A}$$

Menovitý moment na hriadeli

$$M_N = \frac{P}{\Omega_N} = \frac{P}{2\pi n_N / 60} = \frac{9,55P}{n_N} = \frac{9,55 \cdot 2000}{1500} = 12,7 \text{ Nm}$$

- Ako bolo ukázané v príklade 2.7, elektromagnetický moment závisí od štvorca prúdu:

$$M_{eN} = k_M I_N^2$$

a pri polovičnom momente od štvorca príslušného prúdu I :

$$M_e = \frac{1}{2} M_{eN} = k_M I^2$$

Prúd I pri tomto polovičnom momente vypočítame z pomeru predchádzajúcich vzťahov pre moment:

$$\frac{M_e}{M_{eN}} = \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow I = I_N \frac{1}{\sqrt{2}} = 9,17 \text{ A}$$

Rýchlosť otáčania pri polovičnom momente určíme zo vzťahu pre indukované napätie

$$n = \frac{U_i}{C_U \Phi} = \frac{U_i}{C_U C_\phi I} = \frac{U_i}{CI}$$

a podobne pri menovitom stave

$$n_N = \frac{U_{iN}}{CI_N}$$

Ich pomer

$$\frac{n}{n_N} = \frac{U_i}{U_{iN}} \frac{I_N}{I} = \frac{(220 - 1,2 \cdot 9,17 - 2)}{(220 - 1,2 \cdot 12,98 - 2)} \cdot \frac{12,98}{9,17}$$

umožní vypočítať rýchlosť pri polovičnom momente a príslušnom prúde:

$$n = 1500 \frac{(220 - 1,2 \cdot 9,17 - 2)}{(220 - 1,2 \cdot 12,98 - 2)} \cdot \frac{12,98}{9,17} = 2171 \text{ min}^{-1}$$

Výkon na hriadeli pri polovičnom momente je

$$P = M\Omega = M \frac{2\pi n}{60} = \frac{12,7}{2} \cdot \frac{2171}{9,55} = 1443,5 \text{ W}$$

c) Ak ostáva moment menovitý, je aj prúd menovitý. Opäť napíšeme už odvodené vzťahy pre menovitý stav a stav pri polovičných otáčkach sériového motora:

$$n_N = 1500 = \frac{U_{iN}}{CI_N} = \frac{U_N - (\Sigma R_a) I_N - 2}{CI_N}$$

$$n = \frac{1}{2} n_N = 750 = \frac{U_i}{CI_N} = \frac{U_N - (\Sigma R_a + R_s) I_N - 2}{CI_N}$$

$$\frac{1500}{750} = \frac{\frac{U_N - (\Sigma R_a) I_N - 2}{C I_N}}{\frac{U_N - (\Sigma R_a + R_s) I_N - 2}{C I_N}} \Rightarrow R_s = \frac{U_N - (\Sigma R_a) I_N - 2}{2 I_N} = \frac{220 - 1,2 \cdot 12,98 - 2}{2 \cdot 12,98} = 7,79 \Omega$$

Pomerom týchto dvoch vzťahov sme vypočítali hodnotu odporu $R_s = 7,79 \Omega$, ktorý je potrebné zapojiť sériovo do obvodu motora, aby otáčky poklesli na polovicu pri menovitom momente.

Odporúčame nakresliť elektromechanické a mechanické charakteristiky a vyznačiť zadané a vypočítané body podobne ako v príklade 2.8.

Príklad 2.10

Jednosmerný sériový motor má celkový odpor v obvode kotvy $\Sigma R_a = 1,3 \Omega$. Je pripojený na 220 V a zaťažený tak, že pri prúde 12,5 A má 950 min⁻¹. Aký odpor treba do obvodu kotvy zaradiť, aby pri nezmenenom momente klesli otáčky na 650 min⁻¹? Pri výpočte uvažujte úbytok napätia na keľách 2 V.

Riešenie:

Pri danom zaťažení sériového motora:

$$n_{950} = \frac{U_{i950}}{C I} = \frac{U - \Delta U}{C I} = \frac{220 - 1,3 \cdot 12,5 - 2}{C I} = \frac{201,8}{C I} = 950 \text{ min}^{-1}$$

Ak sa zmena otáčok uskutoční pri nezmenenom momente, znamená to, že aj prúd ostane nezmenený, a teda v sériovom motore sa nezmení ani magnetický tok

$$n_{650} = \frac{U_{i650}}{C I} = 650 \text{ min}^{-1}$$

Z pomeru otáčok v týchto dvoch stavoch vypočítame, aké má byť indukované napätie pri otáčkach 650 min⁻¹:

$$\frac{n_{650}}{n_{950}} = \frac{650}{950} = \frac{U_{i650}}{U_{i950}} \Rightarrow U_{i650} = 201,8 \frac{650}{950} = 138 \text{ V}$$

Takéto indukované napätie sa pri konštantnom prúde dosiahne prídavným odporom, zaradeným do obvodu kotvy

$$U_{i650} = U - (\Sigma R_a + R_s) I - 2 = 138 \text{ V} \Rightarrow (1,3 + R_s) \cdot 12,5 = 220 - 138 \Rightarrow R_s = 5,1 \Omega$$

Inak povedané: z pôvodného napätia na kotve 201,8 V treba 63,8 V zraziť na prídavnom odpore, aby na kotve ostalo len 138 V, zodpovedajúce otáčkam 650 min⁻¹. Zadanie môžeme vypočítať aj postupom použitým v predchádzajúcom príklade.

Príklad 2.11

Vypočítajte jednotlivé stupne rozbehového odporníka pre jednosmerný sériový motor 7,5 kW, 240 V, odpor v obvode kotvy $0,5 \Omega$, účinnosť 80 %. Maximálny záberový prúd pri rozbehu môže byť až 1,5-krát väčší ako menovitý, pri prechode zo stupňa na stupeň môže prúd kolísať v rozmedzí $I_N \div 1,5 I_N$.

Riešenie:

Menovitý prúd je

$$I_N = \frac{P_N}{\eta U_N} = \frac{7500}{0,8 \cdot 240} = 39 \text{ A}$$

Dovolený záberový prúd pri rozbehu je

$$I_{zab} = 1,5 I_N = 58,6 \text{ A}$$

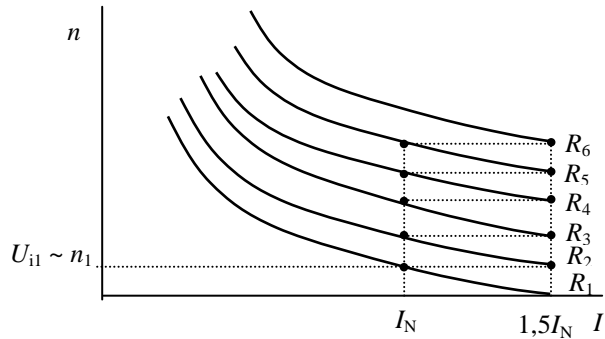
Celkový odpor, ktorý treba zaradiť do obvodu kotvy, aby obmedzil záberový prúd na dovolenú hodnotu (použijeme index „1“, aby sme mohli postupne číslovať ďalšie odporové stupne) je:

$$R_1 = \frac{U_N}{I_{zab}} = \frac{240}{58,6} = 4,1 \Omega$$

Odpor kotvy je $R_a = 0,5 \Omega$, preto do série s obvodom kotvy treba zapojiť odpor $R_{s1} = R_1 - R_a = 4,1 - 0,5 = 3,6 \Omega$.

Ďalšie stupne určíme na základe nasledujúcej úvahy (pozri obr. 2.15): Pri zábere motor stojí, $n = 0 \Rightarrow U_i = C_U \Phi n = 0$, t. j. celé svorkové napätie je na odpore kotvy, záberový prúd je obmedzený celkovým odporom zaradeným do obvodu kotvy. Tento záberový prúd vyvinie záberový moment, motor sa rozbehne, otáčky stúpajú, prúd klesá po charakteristike $n = f(I)$, čo je pre sériový motor hyperbola. Pri poklese prúdu na I_N treba zaradiť ďalší odporový stupeň $R_2 < R_1$, s ktorým prúd stúpne na $1,5 I_N$. (Dovolené kolísanie prúdu je predpísané, v tomto prípade je to $I_N \div 1,5 I_N$). Preradenie odporu sa vykoná pri rovnakých otáčkach (počas prepnutia odporu sa otáčky nemenia). Týmto konštantným otáčkam n_1 zodpovedá konštantné indukované napätie U_{i1} , tvorené pri odpore R_1 prúdom I_N , pri odpore R_2 prúdom $1,5 I_N$ (pozri obr. 2.11). Toto zapíšeme do nasledujúcej rovnice:

$$U_{i1} = U_N - R_1 I_N = U_N - R_2 \cdot 1,5 I_N$$



Obr. 2.15 Rozbehové charakteristiky jednosmerného sériového motora

Z predchádzajúcej rovnice možno vypočítať druhý stupeň odporníka:

$$R_2 = \frac{U_N - U_{i1}}{1,5I_N} = \frac{U_N - (U_N - R_1 I_N)}{1,5I_N} = \frac{240 - (240 - 4,1 \cdot 39)}{58,6} = 2,74 \Omega$$

Z toho vyplýva, že do série má byť zapojený odpor

$$R_{s2} = R_2 - R_a = 2,74 - 0,5 = 2,24 \Omega$$

Podobným výpočtom dostaneme ďalšie odporové stupne:

$$R_3 = 1,83 \Omega \Rightarrow R_{s3} = 1,33 \Omega$$

$$R_4 = 1,22 \Omega \Rightarrow R_{s4} = 0,72 \Omega$$

$$R_5 = 0,81 \Omega \Rightarrow R_{s5} = 0,31 \Omega$$

$$R_6 = 0,54 \Omega \Rightarrow R_{s6} = 0,04 \Omega$$

Tento šiesty stupeň vyžaduje už len taký odpor, ktorý takmer celý poskytuje samotná kotva, teda tu výpočet končí, odporník má 5 stupňov.

Rovnicu pre indukované napätie možno zovšeobecniť. Ak predpísané dovolené kolísanie prúdu je v rozmedzí od aI_N po bI_N , potom

$$U_{ix} = U - R_x \cdot aI_N = U - R_{x+1} \cdot bI_N$$

a odpor nasledujúceho stupňa má hodnotu:

$$R_{x+1} = \frac{a}{b} R_x$$

Príklad 2.12

Jednosmerný derivačný motor má tieto menovité hodnoty: výkon na hriadeli $P_N = 7,5 \text{ kW}$, svorkové napätie $U_N = 440 \text{ V}$, otáčky $n_N = 1440 \text{ min}^{-1}$, účinnosť $\eta_N = 82 \%$.

Straty v budiacom vinutí $\Delta P_b = 4 \%$ z príkonu, straty vo vinutí kotvy $\Delta P_a = 5,4 \%$ z príkonu.

Vypočítajte:

- Odpor budiaceho vinutia R_b a prúd I_b .
- Odpor kotvy R_a .
- Indukované napätie pri menovitej záťaži U_{iN} .
- Menovitý moment na hriadelí M_N , elektromagnetický moment M_{eN} a moment strát $M_{strát}$.
- Záberový prúd I_k , ktorý by motorom pretiekol pri zábere, keby v obvode kotvy nebol žiadny prídavný (spúšťací) odpor.
- Veľkosť spúšťacích odporov R_s , ktoré treba do obvodu kotvy zaradiť, aby prúd pri rozbehu kolísal od I_N do $1,5I_N$.
- Všetky zložky strát v menovitom stave.
- Prúd naprázdno motora
- Otáčky naprázdno
- Otáčky n' pri preťažení prúdom $I_a' = 1,2I_N$

Riešenie:

Na obr. 2.10b je náhradná schéma derivačného motora pre menovitý stav.

Príkon motora

$$P_{pN} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{7500}{0,82} = 9146,3 \text{ W}$$

Straty v budiacom vinutí

$$\Delta P_b = 0,04 \cdot 9146,3 = 365,85 \text{ W}$$

Straty v obvode kotvy pri menovitom prúde

$$\Delta P_{aN} = 0,054 \cdot 9146,3 = 493,9 \text{ W}$$

Menovitý prúd zo zdroja

$$I_N = \frac{P_{pN}}{U_N} = \frac{9146,3}{440} = 20,787 \text{ A}$$

- a) Straty v budiacom vinutí možno napísať niekoľkými spôsobmi, pretože vlastne ide o výkon jednosmerného prúdu:

$$\Delta P_b = U_N I_b = R_b I_b^2 = \frac{U_N^2}{R_b}$$

ale vždy použijeme taký vzťah, ktorý je pre výpočet neznámej veličiny najvýhodnejší. Napr. v tomto prípade sa najrýchlejšie dostaneme k cieľu cez napätie a straty:

$$R_b = \frac{U_N^2}{\Delta P_b} = \frac{440^2}{365,85} = 529,17 \ \Omega$$

Potom budiaci prúd je

$$I_b = \frac{U_N}{R_b} = \frac{440}{529,17} = 0,83 \ \Omega$$

b) Straty vo vinutí kotvy možno tiež napísať rôznym spôsobom

$$\Delta P_a = \Delta U_{aN} I_a = R_a I_a^2$$

ale na výpočet R_a je najvýhodnejší tento:

$$R_a = \frac{\Delta P_{aN}}{I_{aN}^2} = \frac{493,9}{19,95^2} = 1,24 \ \Omega$$

kde

$$I_{aN} = I_N - I_b = 20,787 - 0,83 = 19,95 \ \text{A}$$

c) Indukované napätie pri menovitom zaťažení je:

$$U_{iN} = U_N - \Delta U_{aN} = U_N - R_a I_{aN} = 440 - 1,24 \cdot 19,95 = 415,26 \ \text{V}$$

d) Moment na hriadeli v menovitom stave vypočítame pomocou menovitého výkonu na hriadeli P_N a uhlovej menovitej rýchlosti Ω_N :

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{7500}{150,79} = 49,74 \ \text{Nm}$$

kde

$$\Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60} = \frac{2\pi 1440}{60} = 150,792 \ \text{s}^{-1}$$

Na výpočet elektromagnetického momentu potrebujeme konštantu $C\Phi = k_\phi$, ktorú získame zo vzťahu pre U_i :

$$U_{iN} = C\Phi \Omega_N \Rightarrow C\Phi = \frac{U_{iN}}{\Omega_N} = \frac{415,26}{150,78} = 2,75 \ \text{Vs}$$

$$M_{eN} = C\Phi I_{aN} = 2,75 \cdot 19,95 = 54,94 \ \text{Nm}$$

Rozdiel medzi vyvíjaným elektromagnetickým momentom a momentom na hriadeli je moment strát

$$M_{\text{strát}} = M_{eN} - M_N = 54,94 - 49,74 = 5,2 \ \text{Nm}$$

Tento moment by mal zodpovedať stratám naprázdno, čo skontrolujeme v bode g). Teraz vypočítame straty naprázdno, pričom predpokladáme, že $\Omega_0 \doteq \Omega_N$:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{mec}} + \Delta P_{\text{ad}} = M_{\text{strát}} \Omega_N = 5,2 \cdot 150,79 = 784,1 \text{ W}$$

e) Pri zábere, t. j. v stave nakrátko, kedy motor stojí, $n = 0$ a na svorky je priložené menovité napätie, pretečie kotvou motora prúd nakrátko

$$I_{\text{ak}} = \frac{U_N}{R_a} = \frac{440}{1,24} = 354,838 \text{ A} = 17,78 I_{\text{aN}}$$

Celkový prúd motora v stave nakrátko by bol

$$I_k = I_{\text{ak}} + I_b = 354,83 + 0,83 = 355,66 \text{ A},$$

ale ako vidíme, I_b je zanedbateľnou zložkou celkového prúdu nakrátko, preto ho obvykle zanedbávame, takže uvažujeme $I_k = I_{\text{ak}}$.

Takýto prúd je pre motor nebezpečný, preto treba do obvodu kotvy zaradiť odpor, ktorým obmedzíme prúd na dovolenú hodnotu.

Dovolenou hodnotou prúdu pri zábere v tomto prípade je

$$I_{\text{zab}} = 1,5 I_{\text{aN}} = 1,5 \cdot 19,95 = 29,92 \text{ A},$$

pre ktorý platí

$$I_{\text{zab}} = \frac{U_N}{R_1} = \frac{U_N}{R_{s1} + R_a} = \frac{440}{13,46 + 1,24} = 29,93 \text{ A}$$

f) Celkový odpor na obmedzenie záberového prúdu je

$$R_1 = \frac{U_N}{I_{\text{zab}}} = \frac{440}{29,92} = 14,7 \text{ } \Omega$$

Teda do obvodu kotvy treba pridať sériový spúšťací odpor

$$R_{s1} = R_1 - R_a = 14,7 - 1,24 = 13,46 \text{ } \Omega$$

Ďalšie odporové stupne určíme podľa návodu v príklade 2.11:

$$R_2 = 9,8 \text{ } \Omega \rightarrow R_{s2} = R_2 - R_a = 9,8 - 1,24 = 8,56 \text{ } \Omega$$

$$R_3 = 6,53 \text{ } \Omega \rightarrow R_{s3} = 5,29 \text{ } \Omega$$

$$R_4 = 4,35 \text{ } \Omega \rightarrow R_{s4} = 3,11 \text{ } \Omega$$

$$R_5 = 2,9 \text{ } \Omega \rightarrow R_{s5} = 1,66 \text{ } \Omega$$

$$R_6 = 1,93 \text{ } \Omega \rightarrow R_{s6} = 0,69 \text{ } \Omega$$

$$R_7 = 1,29 \text{ } \Omega \rightarrow R_{s7} = 0,05 \text{ } \Omega$$

Siedmy odporový stupeň tvorí prakticky samotný odpor kotvy, takže netreba pridávať žiadny prídavný odpor a motor pracuje na charakteristike danej $U_N, R_a, (C\Phi)_N$, pozri obr. 2.16.

g) Celkové straty motora v menovitom stave sú dané rozdielom príkonu a výkonu

$$\Delta P_N = P_{pN} - P_N = 9146,3 - 7500 = 1646,3 \text{ W}$$

Tieto straty majú nasledujúce zložky:

$$\Delta P_N = \Delta P_{aN} + \Delta P_b + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mec} + \Delta P_{ad}$$

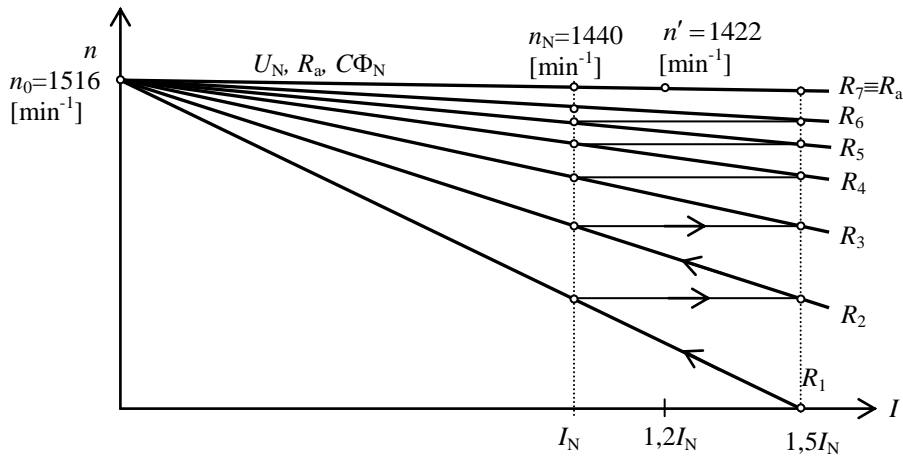
kde

$$\Delta P_{aN} = R_a I_{aN}^2 = 1,24 \cdot 19,95^2 = 493,5 \text{ W}$$

sú straty vo vinutí kotvy spôsobené pretekaním menovitého prúdu a

$$\Delta P_b = \frac{U_N^2}{R_b} = 365,85 \text{ W}$$

sú straty v budiacom vinutí pri U_N .



Obr. 2.16 Rozbehové odporové stupne pre derivačný motor z príkladu 2.12

Pokiaľ je napätie na svorkách konštantné, straty v železe ΔP_{Fe} , straty mechanické ΔP_{mec} a straty dodatočné ΔP_{ad} sa so zaťažením menia tak, že túto zmenu možno zanedbať, takže možno predpokladať, že súčet týchto troch zložiek strát je v stave naprázdno rovnaký, ako v stave pri zaťažení. Preto ich voláme straty naprázdno:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mec} + \Delta P_{ad}$$

Z celkových strát tvoria takúto časť:

$$\Delta P_0 = \Delta P_N - \Delta P_{aN} - \Delta P_b = 1646,3 - 493,9 - 365,85 = 786,55 \text{ W}.$$

Porovnaním s bodom d) kde výpočtom z $M_{\text{strát}}$ vyšlo 784,1 W, zistíme dobrú zhodu výsledkov.

h) V stave naprázdno sa motor otáča rýchlosťou n_0 a pri napätí U_N odoberá zo siete prúd naprázdno $I_0 = I_{a0} + I_b$ na krytie strát naprázdno ΔP_0 , strát vo vinutí kotvy spôsobených prechodom prúdu naprázdno kotvou I_{a0} :

$$\Delta P_{a0} = R_a I_{a0}^2$$

a strát v budiacom vinutí ΔP_b (ΔP_b a I_b nezávisia od záťažového prúdu, len od napätia). Potom príkon naprázdno derivačného motora je:

$$P_0 = U_N I_0 = \Delta P_{a0} + \Delta P_b + \Delta P_0$$

Neznámou je prúd I_0 , lepšie povedané I_{a0} , čo vidno, ak rozpíšeme túto rovnicu:

$$U_N (I_{a0} + I_b) = R_a I_{a0}^2 + \Delta P_b + \Delta P_0$$

Po úprave:

$$R_a I_{a0}^2 - U_N I_{a0} + \Delta P_0 = 0$$

$$I_{a0} = \frac{U_N \pm \sqrt{U_N^2 - 4R_a \Delta P_0}}{2R_a} = \frac{440 \pm \sqrt{440^2 - 4 \cdot 1,24 \cdot 786,55}}{2 \cdot 1,24} = 1,79 \text{ A}$$

(Použili sme len znamienko mínus, znamienko plus nemá fyzikálny význam)

Celkový prúd naprázdno je:

$$I_0 = I_{a0} + I_b = 1,79 + 0,83 = 2,62 \text{ A} = 12,64 \% I_N$$

i) Keďže mechanická charakteristika derivačného motora je lineárna, otáčky v stave naprázdno vypočítame porovnaním (priamou úmerou) s akýmkoľvek iným stavom, ktorý je známy, napr. s menovitým stavom.

V stave naprázdno je indukované napätie pri konštantnom budení úmerné otáčkam naprázdno a zároveň rozdielu napätia na svorkách a úbytku napätia tvoreného prechodom prúdu naprázdno:

$$U_{i0} = C_U \Phi n_0 = U_N - R_a I_{a0}$$

Pri menovitom chode je indukované napätie nasledujúce:

$$U_{iN} = C_U \Phi n_N = U_N - R_a I_{aN}$$

Pretože budenie je konštantné, možno tieto dve rovnice dať do pomeru, budenie a konštantu vykrátiť a určiť n_0 :

$$n_0 = n_N \frac{U_N - R_a I_{a0}}{U_N - R_a I_{aN}} = 1440 \frac{440 - 1,24 \cdot 1,79}{440 - 1,24 \cdot 19,95} = 1440 \frac{437,24}{415,26} = 1516 \text{ min}^{-1}$$

Tento pracovný bod je označený na charakteristike na obr. 2.16.

j) Pokiaľ je budenie konštantné, princíp výpočtu z predchádzajúceho bodu možno využiť pre akékoľvek dva stavy, z ktorých jeden je známy; v tomto prípade pre preťaženie $I_a' = 1,2I_N$:

$$U_i' = U_N - R_a 1,2I_{aN} = C_U \Phi n' \quad U_{i0} = U_N - R_a I_{a0} = C_U \Phi n_0$$

$$n' = n_0 \frac{U_N - R_a 1,2I_{aN}}{U_N - R_a I_{a0}} = 1516 \frac{440 - 1,24 \cdot 1,2 \cdot 19,95}{440 - 1,24 \cdot 1,79} = 1422,6 \text{ min}^{-1}$$

čo je menej ako n_N , takže výsledok je správny (pozri obr. 2.16).

Porovnajme výpočet derivačného motora v tomto bode s výpočtom v príklade 2.7 pre sériový motor, kde budenie stroja, resp. magnetický tok závisí od záťažového prúdu motora.

Príklad 2.13

Jednosmerný derivačný motor má vo vzduchovej medzere $\delta = 3,5 \text{ mm}$ magnetickú indukciu $B_\delta = 0,82 \text{ T}$. Budiacim vinutím preteká prúd $I_b = 2,4 \text{ A}$. Vypočítajte počet budiacich závitov na pól N_b za predpokladu, že zanedbáme magnetický odpor železa R_{Fe} .

Riešenie:

Predpoklad, že odpor železa zanedbávame znamená, že predpokladáme, že celé magnetické napätie sa spotrebuje na vytvorenie magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere. Na stručný výpočet, ako ho tu uskutočnime, tento predpoklad vyhovuje a veľmi zjednoduší výpočet. V skutočnosti asi 82 % magnetickeho napätia jednosmerných strojov sa spotrebuje vo vzduchovej medzere, 18 % na ostatné železné časti magnetickeho obvodu. Pri návrhu stroja by sme museli brať do úvahy všetky časti magnetickeho obvodu.

Teda za predpokladu $R_{Fe} = 0$ môžeme zákon celkového prúdu zjednodušene uviesť takto (pozri (2.29)): $N_b I_b = H_\delta \delta$
a počet budiacich závitov je:

$$N_b = \frac{H_\delta \delta}{I_b} = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0 I_b} = \frac{0,82 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2,4} = 951 \text{ závitov/pól}$$

Príklad 2.14

Napätie naprázdno 4-pólového dynama je 220 V pri 1400 min⁻¹, dĺžka kotvy je 40 cm, priemer kotvy je 20 cm, vinutie slučkové (paralelné $a=2$), koeficient pólového krytia $\alpha = 0,7$, počet vodičov v kotve 252, počet budiacich závitov na pól $N_b = 800$. Vypočítajte:

- Magnetický tok a magnetickú indukciu pod jedným pólom, ktoré sú potrebné na vytvorenie daného napätia.
- Prúdové povrchové zaťaženie kotvy pri $I_a = 100\text{A}$.
- Najmenšiu možnú vzduchovú medzeru δ , ktorá by zabezpečila, aby pod pólom počas prevádzky ostala magnetická indukcia vypočítaná v bode a).
- Budiaci prúd potrebný na vytvorenie danej magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere.
- Elektromagnetický moment stroja pri odbere $I_a = 100\text{ A}$. Magnetický odpor železa zanedbajte!

Riešenie:

- V stave naprázdno je indukované napätie totožné so svorkovým, lebo ak nepreteká kotvou prúd, nevznikajú žiadne úbytky napätia:

$$U_i = U_0 = C_U \Phi n = \frac{p}{a} \frac{z}{60} \Phi n$$

Potom magnetický tok, ktorým je vytvorené toto indukované napätie je:

$$\Phi = \frac{U_0}{\frac{p}{a} \frac{z}{60} n} = \frac{220}{\frac{2}{2} \frac{252}{60} \cdot 1400} = 0,037 \text{ Wb}$$

a zodpovedajúca magnetická indukcia pod pólom je

$$B_\delta = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\alpha \frac{\pi d}{2p} l_{\text{Fe}}} = \frac{0,037}{0,7 \frac{\pi \cdot 0,2}{4} \cdot 0,4} = 0,84 \text{ T}$$

- Prúd vo vodiči kotvy

$$I_v = \frac{I_a}{2a} = \frac{100}{4} = 25 \text{ A}$$

Prúdové povrchové zaťaženie kotvy pri prúde vo vodičoch kotvy 50 A je:

$$A = \frac{z I_v}{\pi d} = \frac{252 \cdot 25}{\pi \cdot 0,2} = 10026,57 \text{ A/m}$$

- Aby sa zabezpečila magnetická indukcia pod pólom aj počas zaťaženia, kedy pôsobí aj reakcia kotvy, vzduchová medzera by mala byť (pozri (2.45) až (2.47)):

$$\delta \geq \frac{\alpha \tau_p A \mu_0}{2 B_\delta} = \frac{0,7 \cdot 0,157 \cdot 20053,5}{2} \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{0,84} = 1,64 \text{ mm}$$

alebo inak, pomocou konštanty C_δ :

$$\delta \geq C_\delta \tau_p \frac{A}{B_\delta} = (0,4 \div 0,65) 10^{-6} \cdot 0,157 \frac{20053,5}{0,84} = 1,5 \div 2,44 \text{ mm}$$

Ako vidíme, vypočítaný rozmer vzduchovej medzery je v rozmedzí danom konštantou C_δ . Konkrétny výber δ súvisí s ďalšími vlastnosťami a parametrami stroja, napr. povrchovými stratami.

d) Ak predpokladáme, že je magnetický obvod nekonečne vodivý ($\mu_{Fe} \rightarrow \infty$), tak budiaci prúd potrebný na vytvorenie danej B_δ je:

$$N_b I_b = H_\delta \delta = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0} \Rightarrow I_b = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0 N_b} = \frac{0,84 \cdot 1,64 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 800} = 1,37 \text{ A}$$

Ak by konštruktér zväčšil vzduchovú medzeru, úmerne stúpne aj budiaci prúd.

e) Elektromagnetický moment pri prúde kotvy 100 A je:

$$M_e = C \Phi I_a = \frac{p}{a} \frac{z}{2\pi} \Phi I_a = \frac{2}{2} \frac{252}{2\pi} 0,037 \cdot 100 = 148,39 \text{ Nm}$$

Príklad 2.15

Derivačný motor na napätie $U = 220 \text{ V}$ (pozri obr. 2.6) má odpor budiaceho vinutia $R_b = 250 \Omega$, odpor kotvy $R_a = 0,5 \Omega$, prúd naprázdno $I_0 = 4,2 \text{ A}$, menovité otáčky $n_N = 1800 \text{ min}^{-1}$. Vypočítajte účinnosť motora a výkon na hriadelí pri $I_N = 20 \text{ A}$.

Riešenie:

Účinnosť motora je daná pomerom mechanického výkonu na hriadelí P a elektrického príkonu P_p na svorkách stroja. Pre menovité hodnoty

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{pN}}$$

pričom menovitý výkon dostaneme, ak od príkonu pri menovitom zaťažení odčítame straty pri menovitom zaťažení:

$$P_N = P_{pN} - \Delta P_N$$

kde príkon

$$P_{pN} = U I = 220 \cdot 20 = 4400 \text{ W}.$$

Celkové straty v menovitom stave sú dané týmito zložkami:

$$\Delta P_N = \Delta P_{aN} + \Delta P_b + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mec} + \Delta P_{ad}$$

Preto potrebujeme vypočítať jednotlivé zložky strát:

Straty vo vinutí kotvy pri menovitom zaťažení

$$\Delta P_{aN} = R_a I_{aN}^2 = 0,5 \cdot 19,12^2 = 182,78 \text{ W}$$

kde

$$I_{aN} = I_N - I_b = 20 - 0,88 = 19,12 \text{ A}$$

pretože

$$I_b = \frac{U}{R_b} = \frac{220}{250} = 0,88 \text{ A}$$

Straty v budiacom vinutí možno vypočítať ktorýmkoľvek z uvedených vzťahov:

$$\Delta P_b = U I_b = R_b I_b^2 = \frac{U_N^2}{R_b} = 193,6 \text{ W}$$

Straty naprázdno

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mec} + \Delta P_{ad}$$

sa so zaťažením nemenia, preto ich vypočítame zo stavu naprázdno a predpokladáme, že ak sa napätie nemení, ostatnú ΔP_0 rovnaké aj pri zaťažení.

Príkion v stave naprázdno P_0 kryje tieto zložky strát (straty v kotve prechodom prúdu naprázdno, straty v budiacom obvode a straty v železe, mechanické a dodatočné):

$$P_0 = U I_0 = R_a I_{a0}^2 + \Delta P_b + \Delta P_0$$

Preto pri známom prúde naprázdno možno vypočítať straty naprázdno:

$$\Delta P_0 = P_0 - R_a I_{a0}^2 - \Delta P_b = 220 \cdot 4,2 - 0,5(4,2 - 0,88)^2 - 193,6 = 724,88 \text{ W}$$

Celkové straty pri záťaži 20 A a svorkovom napätí 220 V sú:

$$\Delta P_N = 182,78 + 193,6 + 724,88 = 1101,26 \text{ W}$$

a účinnosť je

$$\eta_N = \frac{4400 - 1101,26}{4400} 100 = 74,9 \%$$

Pritom výkon na hriadelí je

$$P_N = 4400 - 1101,26 = 3298,74 \text{ W}$$

a moment na hriadeli je

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{3298,74}{188,49} = 17,5 \text{ Nm}$$

kde menovitá mechanická uhlová rýchlosť je:

$$\Omega_N = \frac{2\pi \cdot 1800}{60} = 188,49 \text{ s}^{-1}$$

Moment možno s dostatočnou presnosťou vypočítať priamo pomocou otáčok a konštanty $60/2\pi = 9,55$:

$$M_N = 9,55 \frac{P_N}{n_N} = 9,55 \frac{3298,74}{1800} = 17,5 \text{ Nm}$$

(Na precvičenie odporúčame vypočítať účinnosť napr. pri polovičnom zaťažení a potom pri 20% preťažení.)

Príklad 2.16

Vypočítajte účinnosť a všetky zložky strát jednosmerného kompaundného dynama pri 75 % zaťažení. Menovitý výkon dynama je 250 kW, napätie 230 V, odpor kotvy $R_a = 0,009 \Omega$, odpor sériových budiacich závitov $R_{bs} = 0,003 \Omega$, prúd pretekajúci budiacimi derivačnými závitmi $I_{bd} = 13 \text{ A}$. Dynamo pracuje pri U_N . V chode naprázdno v motorickom režime berie $I_0 = 38 \text{ A}$, pri magnetickom toku a rýchlosti zodpovedajúcej 75 % zaťaženiu.

Riešenie:

Náhradná schéma kompaundného stroja v generátorickom a motorickom režime v stave naprázdno je na obr. 2.17. Účinnosť dynama je:

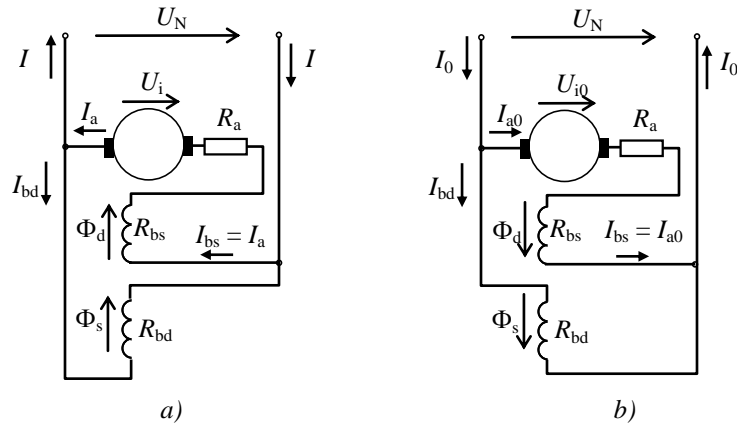
$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P}$$

kde P je výkon dynama na svorkách daný súčinom elektrického napätia a odoberaného prúdu. V menovateli je príkon dynama na hriadeli daný momentom a otáčkami pohonného stroja, resp. súčtom výkonu na svorkách a celkových strát v dyname.
75% výkon dynama je

$$P = 0,75 \cdot 250 = 187,5 \text{ kW}$$

a zodpovedajúci prúd na svorkách je:

$$I = \frac{P}{U_N} = \frac{187500}{230} = 815,2 \text{ A}$$



Obr. 2.17 Náhradná schéma kompaundného stroja v a) generátorickom režime – dynamo, b) v motorickom režime – motor v stave naprázdno

Prúd pretekajúci vinutím kotvy pri danej prevádzke je

$$I_a = I + I_{bd} = 815,2 + 13 = 828,2 \text{ A}$$

Straty vo vinutí kotvy a sériovom budiacom vinutí

$$\Delta P_a = (R_a + R_{bs}) I_a^2 = (0,009 + 0,003) 828,2^2 = 8231,3 \text{ W}$$

Straty v derivačnom vinutí budenia

$$\Delta P_{bd} = U_N I_{bd} = 230 \cdot 13 = 2990 \text{ W}$$

Straty naprázdno ΔP_0 určíme z chodu naprázdno v motorickom režime, pre ktorý máme daný prúd naprázdno:

$$P_0 = U I_0 = \Delta P_{a0} + \Delta P_{bd} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mec} + \Delta P_{ad} = \Delta P_{a0} + \Delta P_{bd} + \Delta P_0$$

Potom straty naprázdno:

$$\Delta P_{a0} = P_0 - \Delta P_{bd} - \Delta P_{a0}$$

kde

$$\Delta P_{a0} = (R_a + R_{bs}) I_{a0}^2 = 0,012 \cdot 25^2 = 7,5 \text{ W}$$

lebo

$$I_{a0} = I_0 - I_{bd} = 38 - 13 = 25 \text{ A}$$

Straty v budiacom vinutí 2990 W boli už uvedené, príkon naprázdno:

$$P_0 = U_N I_0 = 230 \cdot 38 = 8740 \text{ W}$$

Preto môžeme písať, že straty naprázdno sú:

$$\Delta P_0 = 8740 - 7,5 - 2990 = 5742,5 \text{ W}$$

Celkové straty dynama pri 75% zaťažení sú:

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_{bd} + \Delta P_0 = 8231,3 + 2990 + 5742,5 = 16963,8 \text{ W}$$

a jeho účinnosť pri tomto zaťažení je:

$$\eta = \frac{187500}{187500 + 16963,8} 100 = 91,7\%$$

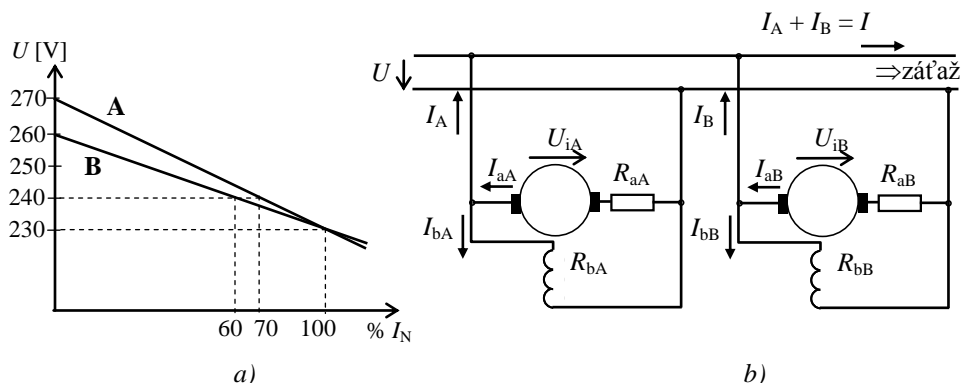
Hodnota vypočítanej účinnosti zodpovedá jednosmerným strojom daného výkonu. (Na precvičenie problematiky účinnosti odporúčame vypočítať účinnosť pri 100% záťaži.)

Príklad 2.17

Dve derivačné dynamá majú pracovať paralelne. Dynamo A má výkon $P_A = 150$ kW, dynamo B výkon $P_B = 200$ kW, pri napätí spoločnej siete $U = 230$ V. Vonkajšie charakteristiky dynamá boli namerané iba v lineárnej oblasti a sú zobrazené na obr.2.18a:

I_a	100 % I_N	70 % I_N	60 % I_N	0
U_A [V]	230	240		270
U_B [V]	230		240	260

Vypočítajte prúdy oboch dynamá, celkový prúd a celkový výkon pri napätí siete 230 V a pri napätí siete 240 V. Náhradné schémy derivačných dynamá v paralelnej spolupráci sú na obr.2.18b.



Obr. 2.18 a) Časť vonkajších charakteristík derivačných dynamá, b) zapojenie derivačných dynamá pri paralelnej spolupráci

Riešenie:

Pri napätí siete 230 V je prúd dynama A

$$I_A = \frac{P_A}{U} = \frac{150 \cdot 10^3}{230} = 652,17 \text{ A}$$

a prúd dynama B:

$$I_B = \frac{P_B}{U} = \frac{200 \cdot 10^3}{230} = 869,56 \text{ A}$$

Celkový prúd je

$$I = I_A + I_B = 652,17 + 869,56 = 1521,73 \text{ A}$$

a celkový výkon

$$P = P_A + P_B = 150 + 200 = 350 \text{ kW}$$

Pri napätí 240 V budú dynamá dodávať do siete podľa už uvedenej tabuľky tieto prúdy:

$$I'_A = 0,7 I_A = 0,7 \cdot 652,17 = 456,5 \text{ A}$$

$$I'_B = 0,6 I_B = 0,6 \cdot 869,56 = 521,7 \text{ A}$$

Potom celkový prúd bude:

$$I' = I'_A + I'_B = 456,5 + 521,7 = 978,2 \text{ A}$$

Dynamá teda budú dodávať pri 240 V tieto výkony:

$$P'_A = U_{240} I'_A = 240 \cdot 456,5 = 109560 \text{ W}$$

$$P'_B = U_{240} I'_B = 240 \cdot 521,7 = 125208 \text{ W}$$

Celkový výkon dodávaný do siete pri napätí 240 V bude

$$P' = P'_A + P'_B = 234768 \text{ W}$$

Alebo to zistíme pomocou celkového prúdu:

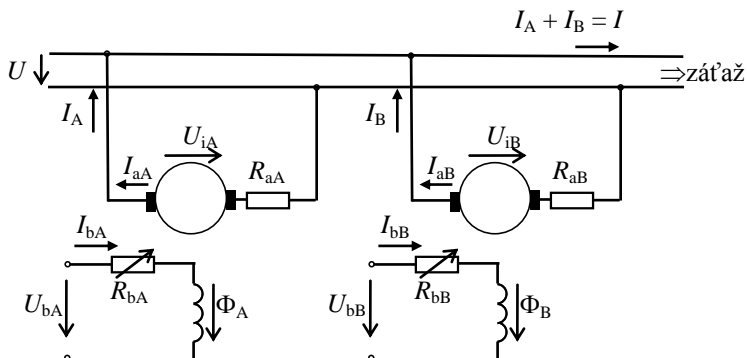
$$P' = U_{240} I' = 240 \cdot 978,2 = 234768 \text{ W}$$

Príklad 2.18

Dve cudzobudené dynamá pracujú spoločne do jednej siete. Dynamo A má odpor kotvy $R_{aA} = 0,074 \Omega$, dynamo B má odpor kotvy $R_{aB} = 0,04 \Omega$. Zdroje budiaceho prúdu boli

nastavené tak, že pri napätí siete $U = 220 \text{ V}$ dodávali obe dynamá rovnaký prúd $I_A = I_B = 120 \text{ A}$.

Vypočítajte prúdy I'_A , I'_B a svorkové napätie U' , ak celkový odber siete stúpne na 300 A . Pri tomto odbere ostane budiaci prúd rovnaký ako v pôvodnom stave. Pri výpočte uvažujeme, že obe dynamá sú úplne kompenzované a úbytky napätí na uhlíkoch zanedbávame. Náhradná schéma pri paralelnej spolupráci cudzobudených dynám je na obr. 2.19.



Obr. 2.19 Náhradná schéma paralelnej spolupráce dvoch cudzobudených dynám

Riešenie:

Pre výpočet dvoch neznámych I'_A , I'_B napíšeme dve rovnice:

1. Svorkové napätie dynám pracujúcich paralelne je rovnaké:

$$U' = U'_{iA} - R_{aA} I'_A = U'_{iB} - R_{aB} I'_B$$

2. Celkový prúd odoberaný zo siete sa rovná súčtu prúdov dodávaných oboma dynamami

$$I'_A + I'_B = 300 \text{ A}$$

Pretože budenie dynám sa nemení, indukované napätie v pôvodnom a novom stave ostane rovnaké, takže ho treba vypočítať z pôvodného stavu:

$$U'_{iA} = U_{iA} = U + R_{aA} I_A = 220 + 0,074 \cdot 120 = 228,9 \text{ V}$$

$$U'_{iB} = U_{iB} = U + R_{aB} I_B = 220 + 0,04 \cdot 120 = 224,8 \text{ V}$$

Po dosadení do rovnice pre U' a výpočte neznámych dostaneme:

$$I'_A = 141,3 \text{ A}$$

$$I'_B = 158,7 \text{ A}$$

a svorkové napätie pri tomto novom zaťažení je:

$$U' = 218,44 \text{ V}$$

Vidíme, že svorkové napätie sa pri zvýšení celkového odberu z 240 A na 300 A znížilo. Všimnite si tiež, že dynamo B s menším vnútorným odporom preberá na seba väčšiu záťaž, ako dynamo A - porovnajte túto skutočnosť s paralelnou spoluprácou transformátorov.

Príklad 2.19

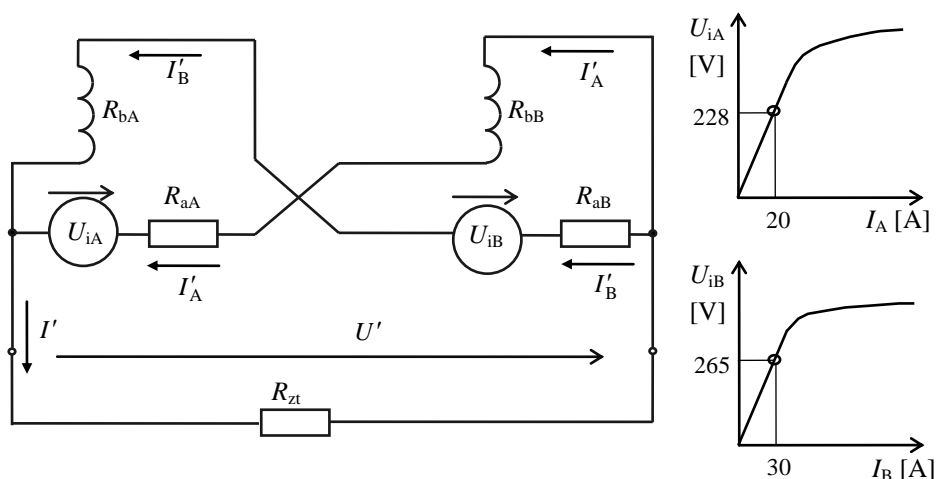
Sériové dynamo A má odpor budiaceho vinutia $R_{bA} = 0,22 \Omega$ a odpor kotvy $R_{aA} = 0,18 \Omega$ a pri výkone $P_A = 4,4 \text{ kW}$ má napätie $U_A = 220 \text{ V}$.

Sériové dynamo B má odpor budiaceho vinutia $R_{bB} = 0,3 \Omega$ a odpor kotvy $R_{aB} = 0,2 \Omega$ a pri výkone $P_B = 7,5 \text{ kW}$ má napätie $U_B = 250 \text{ V}$.

Vypočítajte svorkové napätie siete, do ktorej obe dynamá pracujú paralelne, ak celkový odber je 50 A.

Riešenie:

O paralelnej spolupráci sériových dynám treba povedať, že v jednoduchom zapojení je nestabilná, a že je nevyhnutné prekrižiť budiace vinutia dynám (pozri obr. 2.20). Okrem toho z priebehu vonkajšej charakteristiky sériového dynama je známe, že jeho indukované napätie závisí od záťažového prúdu, ktorý je zároveň prúdom budiacim. Preto ak predpokladáme pracovný bod charakteristiky v jej lineárnej oblasti, je účelné vypočítať konštantu úmernosti, s ktorou bude možné vypočítať indukované napätie pri novom zaťažení:



Obr. 2.20 Paralelná spolupráca sériových dynám

Záťažový prúd pri samostatnom chode dynama A je

$$I_A = \frac{P_A}{U_A} = \frac{4400}{220} = 20 \text{ A}$$

a dynama B

$$I_B = \frac{P_B}{U_B} = \frac{7500}{250} = 30 \text{ A}$$

Indukované napätie dynama A pri prúde 20 A je

$$U_{iA} = U_A + \Delta U_A = U_A + I_A (R_{bA} + R_{aA}) = 220 + 20(0,22 + 0,18) = 228 \text{ V}$$

Konštanta úmernosti, ktorá udáva sklon charakteristiky

$$k_A = \frac{U_{iA}}{I_A} = \frac{228}{20} = 11,4$$

Pre dynamo B

$$U_{iB} = U_B + \Delta U_B = U_B + I_B (R_{bB} + R_{aB}) = 250 + 30(0,3 + 0,2) = 265 \text{ V}$$

$$k_B = \frac{U_{iB}}{I_B} = \frac{265}{30} = 8,83$$

V zapojení s prekríženým vinutím sa indukované napätie vypočíta tak, že U_{iA} je úmerné cez k_A budiacemu prúdu I'_B . Potom:

$$U_{iA} = k_A I'_B$$

a U_{iB} je úmerné budiacemu prúdu I'_A . Potom

$$U_{iB} = k_B I'_A$$

kde I'_A , I'_B sú prúdy jednotlivých dynám pri paralelnej spolupráci pri celkovom odbere 50 A, teda $I'_A + I'_B = 50 \text{ A}$

Rovnica pre svorkové napätie pri paralelnej spolupráci pre dynamo A je:

$$\begin{aligned} U &= U_{iA} - R_{aA} I'_A - R_{bB} I'_A = k_A I'_B - (R_{aA} + R_{bB}) I'_A = \\ &= 11,4 I'_B - (0,18 + 0,3) I'_A = 11,4 I'_B - 0,48 I'_A \end{aligned}$$

pre dynamo B

$$\begin{aligned} U &= U_{iB} - R_{aB} I'_B - R_{bA} I'_B = k_B I'_A - (R_{aB} + R_{bA}) I'_B = \\ &= 8,83 I'_A - (0,2 + 0,22) I'_B = 8,83 I'_A - 0,42 I'_B \end{aligned}$$

Pretože svorkové napätie je pre obidve dynamá totožné, ak sa rovnajú ľavé strany rovnice, rovnajú sa aj pravé strany. Tým sme dostali jednu rovnicu na výpočet neznámych prúdov I'_A , I'_B , druhú tvorí rovnica ich celkového odberu:

$$11,4I'_B - 0,48I'_A = 8,83I'_A - 0,42I'_B, \quad I'_A + I'_B = 50 \text{ A}$$

Po výpočte dostaneme: $I'_A = 28 \text{ A}$, $I'_B = 22 \text{ A}$, $U' = 237,36 \text{ V}$. Opäť dynamo s menším odporom v obvode kotvy preberá na seba väčšiu záťaž.

Príklad 2.20

Jednosmerný 4-pólový derivačný motor má dvojvrstvové vlnové vinutie kotvy s počtom vodičov $z = 294$. Výkon $P_N = 7,5 \text{ kW}$; $U_N = 440 \text{ V}$; $n_N = 1440 \text{ min}^{-1}$; $R_a = 1,2 \Omega$; $R_b = 530 \Omega$; $\eta_N = 85 \%$; $\alpha = 0,7$; $d = 20 \text{ cm}$; $l_{Fe} = 38 \text{ cm}$.

Nakreslite:

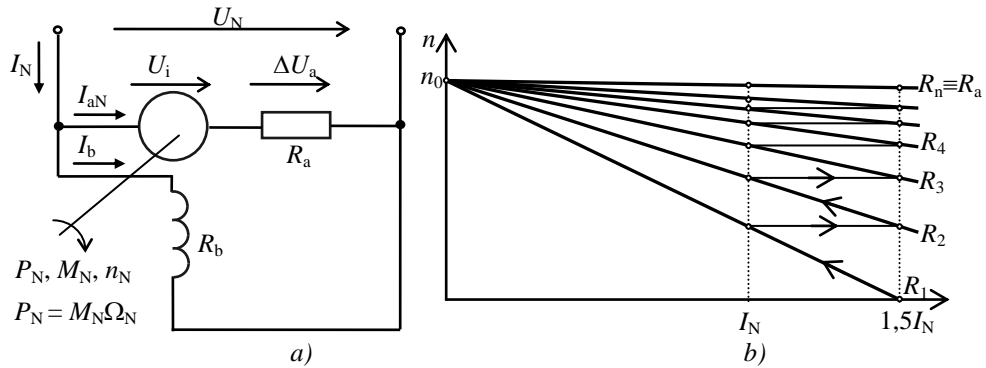
- náhradnú schému, vyznačte smery prúdov a napätí,
- mechanické charakteristiky, ktoré znázornia, ako možno rýchlosť daného jednosmerného motora meniť.

Vypočítajte:

- V menovitom stave príkon P_{PN} , prúd I_N , I_b , I_{aN} , U_{iN} , Φ , B_δ , elektromagnetický moment vo vzduchovej medzere M_{eN} , moment na hriadeľ M_N , moment strát $M_{strát}$.
- Potrebný počet budiacich závitov N_b , aby sa vytvorilo B_δ ak $\mu_{Fe} = \infty$. Vzduchovú medzeru δ uvažujte $2,5 \text{ mm}$.
- Počet závitov pomocných pólov N_{pp} tak, aby sa pod pomocným pólom vytvorila $B_{\delta pp} = 0,12 \text{ T}$, ak efektívna $\delta_{pp} = 5 \text{ mm}$ a U_{magpp} , ak $k_{Cpp} = 1,1$.
- Všetky zložky strát v menovitom stave.
- Prúd naprázdno, otáčky naprázdno.
- Na základe menovitého stavu vypočítajte zmenenú rýchlosť n' , ak vzniklo preťaženie na $I' = 1,25I_N$ a buďenie je nezmenené. Nakreslite príslušnú charakteristiku a vyznačte pôvodný a nový pracovný bod.
- Predpokladajte sériové zapojenie buďenia ku kotve, ak $\Sigma R_a = 2,1 \Omega$, ten istý I_N a I' ako v bode 6 a v tomto zapojení vypočítajte zmenenú rýchlosť n' . Nakreslite príslušnú charakteristiku v tomto zapojení, vyznačte pôvodný a nový pracovný bod a porovnajte s charakteristikou v bode 6.

Riešenie:

- Náhradná schéma derivačného motora s vyznačenými smermi prúdov a napätí je na obr.2.21a.
- Elektromechanické charakteristiky sú na obr. 2.21b.



Obr. 2.21 a) Náhradná schéma derivačného motora, b) elektromechanické charakteristiky

1. Teraz postupne vypočítame nasledujúce veličiny pre menovitý stav: P_{pN} , I_N , I_b , I_{aN} , U_{iN} , I_b , Φ , B_δ , M_{eN} , M_N , $M_{strát}$:

$$P_{pN} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{7500}{0,85} = 8823,5 \text{ W}$$

$$I_N = \frac{P_{pN}}{U_N} = \frac{8823,5}{440} = 20 \text{ A}$$

$$I_b = \frac{U_N}{R_b} = \frac{440}{530} = 0,83 \text{ A}$$

$$I_{aN} = I_N - I_b = 20 - 0,83 = 19,17 \text{ A}$$

$$U_{iN} = U_N - \sum R_a I_{aN} = 440 - 1,2 \cdot 19,17 = 417 \text{ V}$$

$$\Phi = \frac{U_{iN}}{\frac{p}{a} \frac{z}{60} n} = \frac{417}{\frac{2}{1} \frac{294}{60} 1440} = 0,029 \text{ Wb} \quad B_\delta = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\alpha \frac{\pi d}{2p} l_{Fe}} = \frac{0,029}{0,7 \frac{\pi \cdot 0,2}{4} 0,38} = 0,69 \text{ T}$$

$$M_{eN} = C \Phi I_{aN} = \frac{p}{a} \frac{z}{2\pi} \Phi I_{aN} = \frac{2}{1} \frac{294}{2\pi} 0,029 \cdot 19,17 = 52 \text{ Nm}$$

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{7500}{150,8} = 49,7 \text{ Nm}$$

$$M_{strát} = M_{eN} - M_N = 52 - 49,7 = 2,3 \text{ Nm}$$

2. Potrebný počet budiacich závitov, ak $\mu_{Fe} = \infty$, vypočítame takto:

$$N_b I_b = H_\delta \delta = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0} \Rightarrow N_b = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0 I_b} = \frac{0,69 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,83} = 1654 \text{ závitov}$$

3. Na výpočet potrebných závitov pomocných pólov vypočítame najskôr magnetické napätie reakcie kotvy

$$\Delta U_{\text{maga}} = \frac{1}{2} \frac{z}{2p} \frac{I_{aN}}{2a} = \frac{1}{2} \frac{294}{4} \frac{19,17}{2} = 352 \text{ A}$$

Podľa zadania má byť vo vzduchovej medzere pod pomocným pólom magnetická indukcia 0,12 T, preto pomocný pól musí vytvoriť ďalšiu časť magnetického napätia a síce:

$$\Delta U_{\text{mag}\delta\text{pp}} = \frac{B_{\delta\text{pp}}}{\mu_0} \delta_{\text{pp}} k_{\text{Cpp}} = \frac{0,12}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 = 525 \text{ A/pól}$$

Teda pomocný pól musí vytvoriť celkové magnetické napätie

$$U_{\text{magpp}} = \Delta U_{\text{maga}} + \Delta U_{\text{mag}\delta\text{pp}} = 352 + 525 = 877 \text{ A}$$

Pretože vinutie pomocných pólov je zapojené v sérii s vinutím kotvy a jeho závitmi preteká prúd kotvy $I_{aN} = 19,17 \text{ A}$, potrebný počet závitov pomocných pólov je

$$N_{\text{pp}} = \frac{U_{\text{magpp}}}{I_a} = \frac{877}{19,17} = 46 \text{ závitov}$$

4. V tomto bode vypočítame všetky zložky strát, ktoré sú v menovitom stave motora. Celkové straty motora v menovitom stave sú dané rozdielom príkonu a výkonu

$$\Delta P_N = P_{\text{PN}} - P_N = 8823,5 - 7500 = 1323,5 \text{ W}$$

Tieto straty majú nasledujúce zložky:

$$\Delta P_N = \Delta P_{aN} + \Delta P_b + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{mec}} + \Delta P_{\text{ad}}$$

kde

$$\Delta P_{aN} = R_a I_{aN}^2 = 1,2 \cdot 19,17^2 = 441 \text{ W}$$

sú straty vo vinutí kotvy spôsobené pretekaním menovitého prúdu a

$$\Delta P_b = \frac{U_N^2}{R_b} = \frac{440^2}{530} = 365,3 \text{ W}$$

sú straty v budiacom vinutí pri U_N .

Ďalšiu zložku tvoria straty naprázdno:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{mec}} + \Delta P_{\text{ad}}$$

Z celkových strát tvoria takúto časť:

$$\Delta P_0 = \Delta P_N - \Delta P_{aN} - \Delta P_b = 1323,5 - 441 - 365,3 = 517,2 \text{ W}.$$

5. Ďalej vypočítame prúd naprázdno zo vzťahu pre príkon naprázdno:

$$P_0 = U_N I_0 = \Delta P_{a0} + \Delta P_b + \Delta P_0$$

Po úprave dostaneme kvadratickú rovnicu, z ktorej vypočítame prúd kotvy naprázdno:

$$U_N(I_{a0} + I_b) = R_a I_{a0}^2 + \Delta P_b + \Delta P_0 \Rightarrow R_a I_{a0}^2 - U_N I_{a0} + \Delta P_0 = 0$$

$$I_{a0} = \frac{U_N \pm \sqrt{U_N^2 - 4R_a \Delta P_0}}{2R_a} = \frac{440 \pm \sqrt{440^2 - 4 \cdot 1,2 \cdot 517,2}}{2 \cdot 1,2} = 1,18 \text{ A}$$

Celkový prúd naprázdno je:

$$I_0 = I_{a0} + I_b = 1,18 + 0,83 = 2,01 \text{ A}$$

Otáčky naprázdno vypočítame priamou úmerou, pretože charakteristika má priamkovú závislosť. Potrebujeme vedieť indukované napätie v stave naprázdno:

$$U_{i0} = C_U \Phi n_0 = U_N - R_a I_{a0} = 440 - 1,2 \cdot 1,18 = 438,6 \text{ V}$$

Pri menovitom chode je indukované napätie $U_{iN} = 417 \text{ V}$ (bod 1)). Takže ak vzťah pre indukované napätie pre stav naprázdno a stav menovitý dáme do pomeru

$$\frac{U_{i0}}{U_{iN}} = \frac{C\Phi n_0}{C\Phi n_N},$$

výraz $C\Phi$ môžeme vykrátiť, lebo v derivačnom motore je budenie konštantné a dostaneme:

$$\frac{n_0}{n_N} = \frac{U_{i0}}{U_{iN}} \Rightarrow n_0 = n_N \frac{U_{i0}}{U_{iN}} = 1440 \frac{438,6}{417} = 1515 \text{ min}^{-1}$$

Vypočítané otáčky naprázdno sú zakreslené v charakteristike na obr.2.22.

6. V tomto bode vypočítame rýchlosť, ktorá zodpovedá preťaženiu $1,25I_N$. Budeme postupovať podobne ako pri otáčkach naprázdno. Najskôr musíme vypočítať indukované napätie U'_i , ktoré zodpovedá danému preťaženiu.

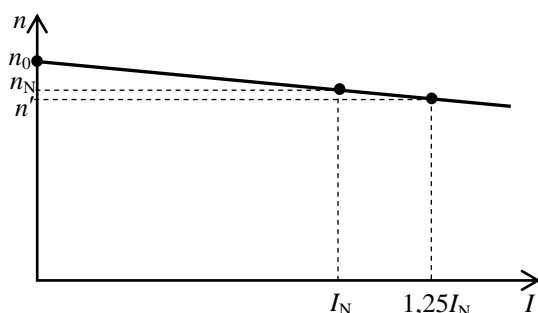
$$I' = 1,25I_N = 1,25 \cdot 20 = 25 \text{ A}, \text{ čiže } I'_a = I' - I_b = 25 - 0,83 = 24,17 \text{ A}$$

Potom indukované napätie pri preťažení je

$$U'_i = U_N - R_a I'_a = 440 - 1,2 \cdot 24,17 = 411 \text{ V}$$

Teraz môžeme vypočítať otáčky, ktoré zodpovedajú danému preťaženiu a zakreslíme ich do obr. 2.18. Podobnou úvahou ako pri výpočte otáčok naprázdno dostaneme:

$$\frac{n'}{n_N} = \frac{U'_i}{U_{iN}} \Rightarrow n' = n_N \frac{U'_i}{U_{iN}} = 1440 \frac{411}{417} = 1419 \text{ min}^{-1}$$

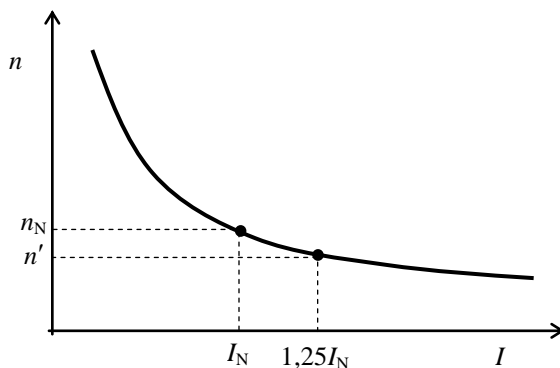


Obr. 2.22 Charakteristika $n=f(I)$ so zakreslením príslušných pracovných bodov

7. V tomto bode sa z derivačného motora stal sériový, takže pri výpočte otáčok pre dané zaťaženie postupujeme ako v sériovom motore (pozri príklad 2.7). Výpočet oproti derivačnému motoru je odlišný v tom, že budenie nie je konštantné, ale závisí od zaťažovacieho prúdu. Pokiaľ ostávajú menovitý prúd a aj I' nezmenené, otáčky vypočítame takto:

$$\frac{n'}{n_N} = \frac{U'_i}{U_{iN}} \frac{I_N}{I'} \Rightarrow n' = n_N \frac{U'_i}{U_{iN}} \frac{I_N}{I'} = 1440 \frac{(440 - 2,1 \cdot 1,25 \cdot 19,17)}{(440 - 2,1 \cdot 19,17)} \cdot \frac{19,17}{1,25 \cdot 19,17} = 1123 \text{ min}^{-1}$$

Menovitý stav a nový stav sú zakreslené na obr.2.23 pre sériové usporiadanie motora. Ako je vidieť aj z výpočtov a aj z charakteristiky, v sériovom zapojení otáčky poklesnú viac ako pri derivačnom zapojení, čo je spôsobené mäkkou charakteristikou sériového motora.



Obr. 2.23 Elektromechanická charakteristika motora pre sériové zapojenie budenia s vyznačením príslušných pracovných bodov

NERIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 2.21

Vypočítajte budiaci prúd štvorpólového dynama, ktorého napätie naprázdno je 31V pri 1200 min^{-1} , dĺžka kotvy 14 cm, priemer kotvy 12 cm, vinutie je paralelné, pólkové krytie 0,65, počet vodičov kotvy 300, dĺžka vzduchovej medzery 2 mm, počet budiacich závitov 1500 na polpár. Magnetický odpor železa zanedbajte.

(1,28 A)

Príklad 2.22

Jednosmerný štvorpólový stroj s paralelným vinutím je pri spúšťaní pripojený na 120 V. Spúšťací odpor a odpor v obvode kotvy je celkom 4Ω , kotva má priemer 12 cm a efektívnu dĺžku 14 cm, počet závitov 300, strednú hodnotu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere 0,65 T. Vypočítajte veľkosť záberového momentu.

(24,57 Nm)

Príklad 2.23

Dynamo s paralelným budením má pri záťažovom prúde 60 A napätie 212 V, budiaci prúd je 2,6 A a odpor obvodu kotvy $0,12 \Omega$. Vypočítajte veľkosť indukovaného napätia dynama a odpor budiaceho vinutia. V riešení zanedbajte vplyv reakcie kotvy a úbytok na kefách.

(219,5 V; $81,54 \Omega$)

Príklad 2.24

Dve cudzobudené dynamá pracujú paralelne. Prvé z nich má odpor v obvode kotvy $0,06 \Omega$, druhé má odpor v obvode kotvy $0,015 \Omega$. Budiace prúdy boli nastavené tak, že každé dynamo pri spoločnom napätí 107 V dávalo rovnaký prúd 53 A. Vypočítajte prúdy oboch strojov, ak stúpne pri nezmenenom buzení celkový prúd na hodnotu 130 A. Zanedbajte vplyv reakcie kotvy a úbytky na kefách.

(57,9 A; 72,1 A)

Príklad 2.25

Cudzobudené dynamo so štítkovými hodnotami 4 kW, 220 V, 2000 min⁻¹ a s odporom v obvode kotvy 0,8 Ω má pracovať pri rovnakom napätí ako motor. Vypočítajte rýchlosť a elektromagnetický moment motora pri menovitom prúde kotvy dynamo. Pri riešení predpokladajte konštantný budiaci prúd a zanedbajte vplyv reakcie kotvy a úbytky na keľách.

(1752 min⁻¹; 20,36 Nm)

Príklad 2.26

Otáčky motora s derivačným buđením pri napätí 220 V sú 1000 min⁻¹, prúd kotvy 20 A, odpor kotvy 1,2 Ω. Pri zväčšení odporu v obvode budenia o 25 % vypočítajte otáčky motora za predpokladu konštantného momentu. Zanedbajte vplyv sýtenia.

(1212 min⁻¹)

Príklad 2.27

Jednosmerný sériový motor 220 V má odpor kotvy, pomocných pólov a budiaceho vinutia 1,2 Ω. Pri záberovom prúde 25 A je záberový moment 27 Nm. Vypočítajte prúd a rýchlosť, pri ktorom je moment rovný polovici záberového momentu. Zanedbajte vplyv sýtenia.

(17,68 A; 2486 min⁻¹)

Príklad 2.28

Jednosmerný derivačný motor na 500 V má menovitý výkon 40 kW pri 500 min⁻¹, účinnosť 90 %, odpor kotvy 0,23 Ω, odpor budenia 400 Ω. Nasledujúca charakteristika bola nameraná v stave naprázdno pri 600 min⁻¹.

I_b [A]	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
U_i [V]	170	330	460	531	572	595

Vypočítajte:

- menovitý prúd kotvy
- menovitý elektromagnetický moment
- moment strát
- Aký odpor treba zapojiť do budiaceho obvodu, aby boli otáčky 1200 min⁻¹, ak prúd kotvy a moment strát ostane konštantný (menovitý) pri menovitom napätí. Aký bude výstupný výkon pri týchto podmienkach.

(87,64 A; 802,4 Nm; 38,5 Nm; 990 Ω; 37,1 kW)

Príklad 2.29

Cudzobudené jednosmerné dynamo na 500 V má v menovitom stave výstupný výkon 50 kW pri 1000 min⁻¹. Odpor kotvy je 0,4 Ω. Stroj pracuje ako motor, ale so zníženým napätím 200 V. Akými otáčkami sa bude otáčať, ak pracuje pri menovitom toku a menovitom prúde kotvy? Ako musíme znížiť tok, aby bežal rýchlosťou 1000 min⁻¹ s tým istým prúdom kotvy a ako sa bude odlišovať elektromagnetický moment od vyvíjaného momentu ak pracuje ako generátor v menovitom stave.

(296 min⁻¹; magnetický tok a elektromagnetický moment sa zredukujú na 29,6 % menovitej hodnoty)

Príklad 2.30

Derivačný motor s výkonom 18,65 kW, 500 min⁻¹ je napájaný konštantným napätím 500 V. Prúd kotvy je pri plnom zaťažení 42 A. Odpor budenia je 500 Ω a odpor kotvy je 0,6 Ω. Nasledujúca magnetizačná charakteristika bola nameraná pri 400 min⁻¹.

I_b [A]	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
U_i [V]	236	300	356	400	432

Vypočítajte:

- Mechanický moment strát pri použití menovitého výkonu a otáčok a v ostatných výpočtoch ho považujte za konštantu.
- Vypočítajte budiaci prúd a prídavný budiaci odpor pre menovitú záťaž a otáčky.
- Aký prídavný budiaci odpor je potrebný na to, aby motor bežal v stave naprázdno rýchlosťou 600 min⁻¹?

(24,7 Nm; 0,9 A; 55,6 Ω; 160 Ω)

Príklad 2.31

Jednosmerný motor má menovitý výkon 7,5 kW, 200 V, menovitý prúd kotvy 45 A, menovitú rýchlosť 800 min⁻¹. Odpor kotvy je 0,5 Ω. Vypočítajte moment strát, keď predpokladáme, že je konštantný a nezávisí od otáčok.

(5,8 Nm)

Príklad 2.32

Jednosmerný sériový motor má menovité hodnoty 120 V, 54 A, 620 min⁻¹. Odpor kotvy, odpor vinutia pomocných pólov a budiaceho vinutia je 0,32 Ω. Vypočítajte, ako sa zmení rýchlosť motora pri konštantnom záťažovom momente, ak klesne napätie na 80 V a ďalej pri konštantnom napätí, ak klesne zaťaženie tak, že prúd motora bude 45 A. Vplyv sytenia zanedbajte.

(379 min⁻¹; 765 min⁻¹)

Príklad 2.33

Jednosmerný sériový motor bežal konštantnou rýchlosťou 1500 min⁻¹ a meniacim sa napätím a záťažou, čo dalo nasledujúcu tabuľku.

Svorkové napätie [V]	61	71	81	93	102,5	110
Prúd [A]	1,39	1,68	1,98	2,42	2,87	3,22

Ak je motor napájaný 110 V, vypočítajte hodnoty momentu pre stav, keď:

- Odpor kotvy je 7,4 Ω.
 - S predradným odporom je 30 Ω.
- (1,77 Nm; 0,53 Nm)