

ROBOTI

VE ŠKOLE PRO PRAKTICKOU VÝUKU, MOTIVACI I ZÁBAVU

CZ.1.07/1.1.24/01.0066

ELEKTRICKÉ STROJE - POHONY

Ing. Petr VAVŘIŇÁK

Střední škola elektrotechnická, Ostrava, Na Jízdárně 30, příspěvková organizace

2014



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

POKYNY KE STUDIU:**ČAS KE STUDIU**

Čas potřebný k prostudování látky. Čas je pouze orientační a slouží jako hrubé vodítko pro rozvržení studia kapitoly.

**CÍL**

Cíle, kterých lze dosáhnout prostudováním kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.

**POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ**

Pojmy, které si je potřeba zapamatovat.

**VÝKLAD**

Teoretický výklad studované látky, zavedení nových pojmů a jejich vysvětlení.

**ŘEŠENÉ PŘÍKLADY**

Podrobný postup při řešení příkladů.

**SHRNUTÍ POJMŮ**

Zopakování hlavních pojmů.

**OTÁZKY**

Několik teoretických otázek pro ověření zvládnutí kapitoly.

**PRAKTICKÉ ÚLOHY**

Několik praktických příkladů pro ověření zvládnutí kapitoly.

OBSAH:

1. ELEKTRICKÉ STROJE	4
1.1. Obecné základy elektrických strojů	4
1.1.1. Rozdělení elektrických strojů	4
1.1.2. Hlavní části elektrických strojů	6
1.2. Konstrukční uspořádání stejnosměrných strojů	14
1.3. Reakce kotvy a její potlačení	19
1.4. Komutace	22
1.5. Stejnosměrné motory	25
1.5.1. Cíze buzený motor	25
1.5.2. Derivační motor	34
1.5.3. Sériový motor	36
2. ELEKTRICKÉ POHONY	43
2.1. Obecné základy elektrických pohonů	43
2.1.1. Základní veličiny pohybu a vztahy mezi nimi	43
2.1.2. Pohybové stavy	50
2.2. Definice elektrického pohonu	53
2.3. Výhody a nevýhody elektrických pohonů	55
2.3.1. Výhody elektropohonu	55
2.3.2. Nevýhody elektropohonu	56
2.3.3. Srovnání stejnosměrných a střídavých pohonů (výhody a nevýhody) ..	56
2.4. Druhy poháněných pracovních mechanismů	58
2.4.1. Jeřábová charakteristika pracovních mechanismů ($x = 0$)	59
2.4.2. Kalandrová charakteristika pracovních mechanismů ($x = 1$)	59
2.4.3. Ventilátorová charakteristika pracovních mechanismů ($x = 2$)	60
2.4.1. Navíječková charakteristika pracovních mechanismů ($x = -1$)	60
2.5. Statická stabilita pohonů	61
2.6. Druhy zatížení	63
2.6.1. Trvalé zatížení	64
2.6.2. Krátkodobé zatížení	64
2.6.3. Přerušované zatížení	65
2.7. Volba velikosti motorů	66
2.7.1. Volba motoru pro trvalé zatížení	66
2.7.2. Volba motoru pro přerušované zatížení	69
2.7.3. Volba motoru pro krátkodobé zatížení	71

1. ELEKTRICKÉ STROJE

Elektrický stroj je definován jako elektrické zařízení, které využívá ke své činnosti elektromagnetickou indukci a/nebo silové účinky elektrického proudu.

Pro návrh elektrického stroje je nutné vycházet z mnoha pro daný typ stroje zadaných parametrů. Jedná se především o velikost a druh jmenovitého proudu, napětí a výkonu, o druhy vnějších vlivů, ve kterých stroje pracují, o jejich chlazení, o způsob upevnění či spojení s dalším zařízením apod. Mezi podstatné vlivy na návrh motoru také patří druhy zatížení stroje určující jeho oteplení (trvalý chod, krátkodobý chod, přerušovaný chod apod. – blíže viz kapitola Pohony), jeho elektrická či mechanická zatížitelnost a mnoho dalších.

1.1. Obecné základy elektrických strojů

Abychom se s elektrickými stroji seznámili v obecné rovině, musíme si je nejdříve rozdělit do skupin dle různých parametrů a také si definujeme základní části elektrických strojů, které jsou nutné pro jejich činnost.

1.1.1. Rozdělení elektrických strojů



ČAS KE STUDIU

25 minut.



CÍL

Poznat rozdělení elektrických strojů a jejich hlavní části



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Netočivý stroj = elektrický stroj bez pohyblivých částí.

Točivý stroj = elektrický stroj, jehož jedna část se otáčí (rotuje).

Lineární stroj = elektrický stroj, jehož část se pohybuje přímočaře (v jednom i více směrech).

Transformátor = elektrický stroj měnící elektrickou energii jedněch parametrů na parametry jiné (střídavé napětí a proud jedněch hodnot na hodnoty jiné).

Elektrický motor = elektrický stroj přeměňující dodávanou elektrickou energii na energii mechanickou (rotační nebo lineární).

Elektrický generátor = elektrický stroj přeměňující mechanickou energii dodávanou na hřídel na energii elektrickou.

Rotační měnič = elektrický točivý stroj měnící elektrickou energii jedné parametru na parametry jiné (rotační měnič kmitočtu).

Asynchronní stroj = stroj, jehož pohyblivá část se pohybuje jinou rychlostí (otáčkami) než magnetické pole v jeho pevné části.

Synchronní stroj = stroj, jehož rychlost (otáčky) pohyblivé části je stejná s rychlostí (otáčkami) magnetického pole v části nepohyblivé.

Stejnoseměrný stroj = stroj pracující se statickým magnetickým polem.



VÝKLAD

Elektrické stroje dělíme podle druhu konané práce na stroje netočivé, stroje točivé a stroje lineární. Netočivé stroje neobsahují žádné pohyblivé části, jedná se zejména o transformátory. Točivé stroje obsahují rotační část (i část pevnou) a mezi točivé stroje patří různé druhy motorů, generátorů a rotačních měničů (dnes se už téměř nepoužívají). Stroje lineární obsahují pohyblivé části s posuvným pohybem (v jedné nebo dvou osách), mezi stroje lineární pak řadíme různé lineární motory.

Obecná činnost transformátorů spočívá ve změně elektrické energie určitých parametrů na parametry jiné (střídavé napětí a proud určitých hodnot na hodnoty jiné).

Točivé motory mění přiváděnou elektrickou energii na energii mechanickou předávanou otáčející se hřídelí. Rotační generátory mění energii mechanickou přiváděnou na hřídel (např. turbínou) na energii elektrickou odváděnou ze svorek stroje. Rotační měniče mění elektrickou energii jedné parametru na elektrickou energii s jinými parametry (např. rotační frekvenční měniče – dnes se již moc nepoužívají).

Lineární motory mění přiváděnou elektrickou energii na energii mechanickou dodávanou při posuvném pohybu.

Podle principů činnosti rozdělujeme točivé a lineární stroje na stroje asynchronní, synchronní, stejnosměrné a zvláštní. Asynchronní stroje mají rozdílné otáčky (rychlost – u lineárních strojů) pohybující se části proti otáčkám (rychlosti) magnetického pole pohybujícího se ve statické části stroje. Synchronní stroje mají otáčky (rychlost) pohybující se části stejné s otáčkami (rychlosti) magnetického pole. Stroje stejnosměrné pracují se stejnosměrným napětím a tedy statickým magnetickým polem ve statické části. Zvláštní stroje jsou pak principiálně kombinací nebo úpravou předchozích principů.

Podle počtu fází dělíme stroje (stejně jako ostatní elektrická zařízení) na trojfázové a jednofázové (popř. jednofázové s pomocnou fází).

Podle druhu proudu dělíme stroje na stejnosměrné (pracují se statickým magnetickým polem) a střídavé (pracují s magnetickým polem točivým nebo posuvným).

POZNÁMKA:

V tomto textu se kvůli jeho rozsahu budu zabývat jen motory stejnosměrnými (jsou použity v robotických stavebnicích).



SHRNUTÍ POJMŮ

Netočivý stroj, točivý stroj, lineární stroj, transformátor, elektrický motor, elektrický generátor, rotační měnič, točivý motor, lineární motor, asynchronní stroj, synchronní stroj, stejnosměrný stroj.



OTÁZKY

Jak rozdělujeme stroje podle druhu konané práce?

Jak definujeme netočivé stroje a který druh stroje mezi ně patří?

Jaký je rozdíl mezi točivým a lineárním motorem?

Jak rozdělujeme stroje podle principu činnosti?

1.1.2. Hlavní části elektrických strojů



ČAS KE STUDIU

65 minut.



CÍL

Poznat hlavní části elektrických strojů (magnetický a elektrický obvod a izolaci) a jejich další provozně konstrukční části (kryty, chlazení a způsob montáže).



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Magnetický obvod = část elektrického stroje sloužící k vedení magnetického toku.

Elektrický obvod (vinutí) = část elektrického stroje sloužící k vedení proudu a vytváření magnetického pole.

Izolace = část elektrického stroje sloužící k izolaci částí elektrického obvodu (cívky) vůči sobě i vůči ostatním částem elektrických strojů, izoluje též magnetické obvody.

Vnější vlivy = vlastnosti prostředí, ve kterém elektrické stroje pracují.

Krytí = konstrukční opatření, kterými se chrání stroj před vnějšími vlivy, vniknutím cizích předmětů, a kterými je chráněna obsluha před úrazem.

Chlazení = konstrukční opatření, která odvádí ze stroje ztrátové teplo.

Montáž = konstrukční opatření, která slouží k mechanickému upevnění strojů k podložce a k upevnění pohybujících se částí stroje s poháněným zařízením.



VÝKLAD

Každý elektrický stroj se skládá z magnetického obvodu, vinutí (elektrického obvodu), izolace, krytu, chlazení, a montážních prvků (patky, příruby, rámy, podvozky apod.). Obecně je tedy vzhled stroje závislý nejen na druhu stroje, ale i na tvaru magnetického obvodu, druhu vinutí, na použité izolaci, je ovlivněn také prostředím, ve kterém stroj pracuje, krytím stroje, chlazením stroje, upevněním k podložce a u točivých strojů spojením pohonu s hnanou částí.

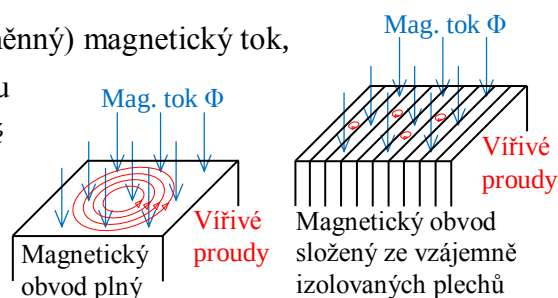
Magnetický obvod

Úkolem magnetického obvodu stroje je vedení magnetického toku, vyvolaného proudem procházejícím v cívkě navinuté na magnetickém obvodu.

Základním materiálem pro výrobu magnetických obvodů elektrických strojů je železo, které se zušlechťuje přidáním malého množství křemíku pro snížení ztrát. V některých menších strojích se používají i permanentní magnety vyrobené ze slitin obsahujících železo, nikl nebo kobalt.

Magnetický obvod elektrických strojů má různý tvar podle druhu stroje, ale v každém magnetickém obvodu vznikají ztráty, které se mění v teplo, a proto se musí omezit na minimum. Ztráty v magnetických obvodech dělíme na ztráty vířivými proudy a na ztráty hysterezní.

Prochází-li magnetickým obvodem střídavý (proměnný) magnetický tok, potom se v něm kolmo na směr magnetického toku indukují (železo je vodivé) tzv. *Foucaultovy vířivé proudy*, které se výrazně zmenšují sestavením magnetického obvodu ze vzájemně izolovaných plechů. Plechy strojů se nejčastěji vyrábějí o



tloušťce 0,5 nebo 0,35 mm. Plechy se izolují např. laky, keramickými vrstvami nebo oxidy. „Čistý“ průřez aktivního železa magnetického obvodu (určuje maximální výkon stroje) sestaveného z izolovaných plechů pak dostaneme, když změřený průřez násobíme činitelem plnění železa, který se blíží jedné (jedna = magnetický obvod z jednoho kusu) - $k_{Fe} = 0,85$ (laky) až 0,97 (oxidy).

Ztráty vířivými proudy ve wattech lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta P_F = \frac{C}{\rho} (B_{\max} \cdot f \cdot a)^2 \cdot m,$$

kde C je konstanta závisící na materiálu, ρ je rezistivita železa, $B_{\max}$ amplituda magnetické indukce, f frekvence, a tloušťka plechů a m hmotnost železa magnetického obvodu.

Hysterezní ztráty vznikají přemagnetováním železa, přičemž práce potřebná k přemagnetování je úměrná ploše hysterezní smyčky, z čehož vyplývá, že materiály s menší plochou hysterezní smyčky mají i menší hysterezní ztráty.

Hysterezní ztráty pro $B_{\max} \leq 1$ T jsou dány vztahem:

$$\Delta P_H = C \cdot B_{\max}^{1,6} \cdot f \cdot m$$

a pro $B_{\max} > 1$ T, pak vztahem:

$$\Delta P_H = C \cdot B_{\max}^2 \cdot f \cdot m.$$

Při frekvenci 50 Hz a při poskládání magnetického obvodu

ze vzájemně izolovaných plechů tvoří hysterezní ztráty ΔP_H asi 70 % celkových ztrát v železe (magnetickém obvodu) ΔP_{Fe} , které lze přibližně ve wattech vyjádřit vztahem:

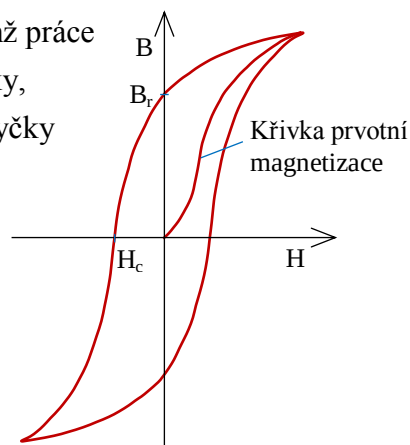
$$\Delta P_{Fe} = \Delta p_{1,0} \cdot B_{\max} \cdot \frac{f}{50} \cdot k_p \cdot m,$$

kde $\Delta p_{1,0}$ jsou měrné ztráty [$W \cdot kg^{-1}$] a k_p je činitel opracování.

Měrné ztráty $\Delta p_{1,0}$ určují ztráty ve wattech v 1 kg magnetického obvodu při magnetické indukci 1 T a frekvenci 50 Hz, tyto ztráty uvádějí výrobci plechů pro magnetické obvody elektrických strojů (někteří výrobci uvádějí i měrné ztráty $\Delta p_{1,5}$ při magnetické indukci 1,5 T).

Činitel opracování k_p určuje zhoršení vlastností magnetických obvodů opracováním plechů (např. drážkováním u točivých strojů, kde se pohybuje v rozmezí 1,5 až 2. U transformátorů pak v rozmezí 1,02 až 1,2).

Značného zmenšení celkových ztrát v železe ΔP_{Fe} dosáhneme zušlechtěním železných plechů, přidáním 0,8 až 4,5 % křemíku a technologickým zpracováním. Plechy s přísadou křemíku jsou sice velmi křehké, ale s větší rezistivitou než má samotné železo (pro točivé stroje a malé transformátory se elektrotechnické plechy vyrábějí s obsahem křemíku 0,3 % až 3,5 % a pro výkonové transformátory s obsahem křemíku 3,5 % až 4,5 %).



Podle výrobního způsobu se plechy dělí do tří skupin:

- a) plechy válcované za tepla - ocel s přídavkem křemíku pro plechy válcované za tepla se vyrábí z pokud možno nejčistších surovin v martinských nebo elektrických obloukových pecích, odlévá se do kokil a vytvořené ingoty se pak postupně válcují s řadou meziohřevů na tzv. bramy, poté na tzv. ploštiny a nakonec na plechy tloušťky 0,35, 0,5 nebo 1 mm, jejichž měrné ztráty $\Delta p_{1,0}$ se pohybují od 0,9 do 1,5 W·kg⁻¹. Používají se již méně pro svařovací transformátory a pro stejnosměrné stroje – jsou nejlevnější na výrobu, ale jsou drsnější na povrchu (mají horší činitel plnění).
- b) plechy válcované za studena neorientované – do tloušťky cca 3 mm se válcují stejně jako plechy válcované za tepla, pak se nechají pozvolna ochladnout a pak se válcují už bez meziohřevů až na konečnou tloušťku 0,5 mm. Jejich měrné ztráty $\Delta p_{1,0}$ se pohybují od 1,3 do 3,6 W·kg⁻¹ a používají se pro výrobu magnetických obvodů stejnosměrných strojů, střídavých strojů a malých transformátorků. Jejich výroba je nákladnější, ale mají hladší povrch a lepší magnetické vlastnosti než plechy válcované za tepla.
- c) válcované za studena orientované – opět do tloušťky cca 3 mm se válcují stejně jako plechy válcované za tepla, pak se nechají pozvolna ochladnout na teplotu pod 500°C, pak se válcují v jednom směru a nakonec se plechy žíhají čímž se „položí“ hrany krystalů do směru válcování (tzv. Gossova struktura). Vyrábějí se v tloušťkách 0,35 až 0,02 mm a používají se pro velké transformátory. Měrné ztráty $\Delta p_{1,0}$ ve směru válcování jsou od 0,3 do 0,8 W·kg⁻¹, ale ve směru kolmém jsou až čtyřikrát větší. Jejich výroba je nejnákladnější a jsou nejkřehčí, ale ve směru válcování mají nejlepší magnetické vlastnosti.

Elektrický obvod - vinutí

Elektrický obvod elektrických strojů stejně jako elektrický obvod jiných elektrických zařízení slouží k vedení elektrického proudu při provozu stroje. Nejdůležitější částí elektrického obvodu elektrických strojů pro jejich správnou činnost jsou všechna jejich vinutí. Úkolem vinutí v elektrických strojích je vytvoření magnetického pole nebo slouží k indukci napětí. Nejpoužívanějším materiálem vinutí elektrických strojů je tažená, elektricky rafinovaná měď, ale vinutí transformátorů velkých výkonů a rotorů asynchronních motorů nakrátko se často dělá z hliníku, neboť je levnější a lehčí, i když má větší rezistivitu. Používají se i další materiály jako například mosaz či bronz.

Tvar vinutí, počet cívek a závitů závisí především na druhu a velikosti stroje, může buď obepínat magnetický obvod (transformátory) nebo je uloženo v drážkách magnetického obvodu (točivé stroje). Průřez vinutí závisí především na procházejícím proudu, materiálu a chlazení vinutí.

Průchodem proudu vinutím vzniká magnetické pole potřebné pro činnost stroje, ale vytvářejí se i nežádoucí tzv. Jouleovy tepelné ztráty dané součinem druhé mocniny proudu a odporu vinutí: $\Delta P_j = R \cdot I^2$.

Izolace

Zajišťuje izolaci mezi jednotlivými závity vinutí, mezi fázemi navzájem, mezi fázemi a zemí, mezi vinutím a magnetickým obvodem či kotrrou, mezi plechy magnetického obvodu apod.

Používají se převážně izolace v pevném skupenství, jde o látky organické i anorganické jako například různé laky, keramické hmoty, oxidy, slídy, silikony, PVC apod. Je však potřeba i izolace ve skupenství plynném, používá se především vzduch. Kapalně izolanty se používají především k chlazení (transformátorový olej).

Izolace musí nejenom zajistit dostatečnou elektrickou pevnost a případně i pevnost mechanickou (komutátory), ale musí také vydržet určité teploty, teplo vzniklé ve stroji musí spolehlivě odvádět, musí odolávat prachu, vlhkosti, chemickým či jiným vnějším vlivům.

Každá izolace má kromě udané elektrické pevnosti určenu též maximální dovolenou teplotu $\vartheta_{\max}$, kterou snese bez poškození a která je dána tzv. třídou izolace:

Izolace třídy Y	$\vartheta_{\max} = 90\text{ °C}$	}	Dříve izolace třídy C	$\vartheta_{\max} > 180\text{ °C}$
Izolace třídy A	$\vartheta_{\max} = 105\text{ °C}$			
Izolace třídy E	$\vartheta_{\max} = 120\text{ °C}$			
Izolace třídy B	$\vartheta_{\max} = 130\text{ °C}$			
Izolace třídy F	$\vartheta_{\max} = 155\text{ °C}$			
Izolace třídy H	$\vartheta_{\max} = 180\text{ °C}$			
Izolace třídy 200	$\vartheta_{\max} = 200\text{ °C}$			
Izolace třídy 220	$\vartheta_{\max} = 220\text{ °C}$			

Při překročení hranice maximální dovolené teploty izolace o 10 °C se její životnost zkrátí na polovinu!

Pro návrh stroje častěji vycházíme z hodnoty tzv. dovoleného oteplení, které je dáno vztahem: $\Delta\vartheta_{\max} = \vartheta_2 - \vartheta_1$, kde ϑ_1 je teplota okolního vzduchu (zjišťuje se teploměrem ze vzdálenosti 1 až 2 m od stroje, chráněným před sáláním a průvanem a například v prostředí normálním nemá přestoupit 35 °C) a ϑ_2 je průměrná střední teplota stroje.

POZNÁMKA:

Maximální dovolená teplota $\vartheta_{\max}$ je maximální teplota, kterou izolace vydrží.

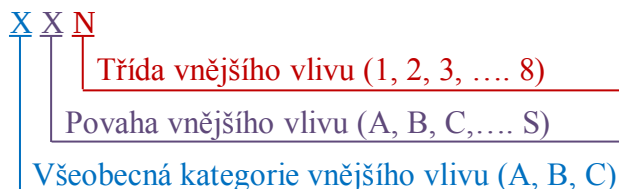
Maximální dovolené oteplení $\Delta\vartheta_{\max}$ je hodnota maximálního nárůstu teploty oproti teplotě okolí daného hodnotou vnějšího vlivu, ve kterém stroj pracuje.

Prostředí, ve kterém stroj pracuje

Na volbu konstrukce, izolace a krytí strojů má vliv prostředí, ve kterém stroj pracuje.

Prostředí, ve kterém elektrický stroj pracuje, je popsáno tzv. vnějšími vlivy.

Vnější vlivy se třídí do stupňů. Každý stupeň vnějšího vlivu je označen dvěma písmeny velké abecedy a číslicí.



Prvé písmeno označuje všeobecnou kategorii vnějšího vlivu:

A = prostředí,

B = využití,

C = konstrukce budovy.

Prostředí = vlastnosti okolí (prostoru nebo jeho části), vytvořené samotným prostorem nebo předměty v prostoru umístěnými. Patří sem teplota, vlhkost, nadmořská výška, přítomnost vodní masy, výskyt cizích pevných těles, výskyt korozivních nebo znečišťujících látek, mechanické namáhání, výskyt flóry, fauny, přítomnost elektromagnetických, elektrostatických a ionizujících působení, sluneční záření, seizmické účinky, četnost výskytu bouřek a pohyb vzduchu.

Využití = uplatnění objektů nebo jejich částí dané vlastnostmi osob, jež vycházejí z jejich duševních a pohybových schopností, stupně jejich elektrotechnických znalostí, elektrického odporu lidského těla, četností osob v prostoru a možností jejich úniku, a vlastnostmi látek zpracovávaných nebo skladovaných v objektu.

Konstrukce budovy: souhrn vlastností budovy vyplývajících z povahy užitého konstrukčního a dekorativního materiálu, provedení budovy a její fixace k okolí.

Druhé písmeno označuje povahu vnějšího vlivu

Je-li první písmeno A, pak je druhé písmeno: A = teplota okolí B = vlhkost C = nadmořská výška D = výskyt vody S = vítr	Je-li první písmeno B, pak je druhé písmeno: A = schopnost osob B = odpor lidského těla C = dotyk osob s potenciálem země D = podmínky úniku v případě nebezpečí E = povaha zpracovávaných nebo skladovaných látek
Je-li první písmeno C, pak je druhé písmeno: A = stavební materiály	B = konstrukce budov

Číslice za písmeny označuje třídu každého vnějšího vlivu

Například:

AC2 prostředí – nadmořská výška – větší než 2 000 m.

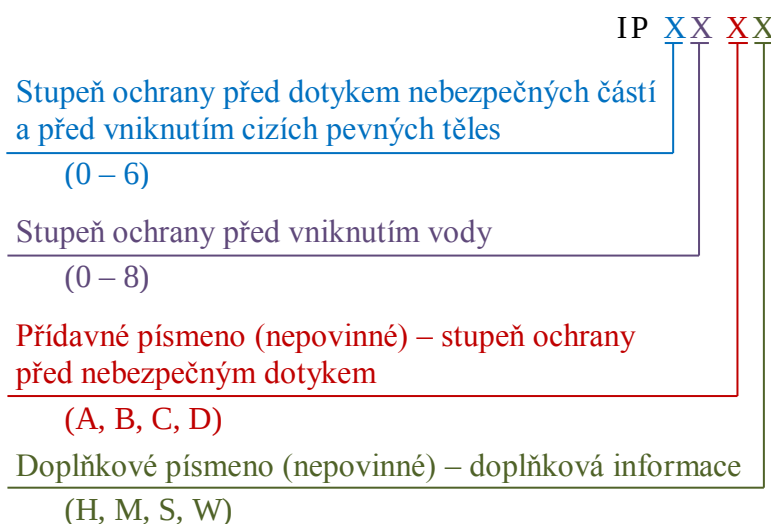
AD5 prostředí – výskyt vody – tryskající voda

BA2 využití – schopnost osob – děti v místech pro ně určených.

CA1 konstrukce budovy – stavební materiály – nehořlavé.

Krytí

je to souhrn konstrukčních opatření, kterými se chrání stroj před vniknutím cizích předmětů a vody a které chrání obsluhující osoby před úrazy vzniklými dotykem s živými nebo pohyblivými se částmi. Je dáno mezinárodním označením IP (International protection = mezinárodní ochrana, někdy též ingress protection) blíže viz ČSN EN 60034-5.



Chlazení

Ztrátové teplo, které ve stroji vzniká (ztráty v magnetickém obvodu ΔP_{Fe} , Jouleovy ztráty v elektrickém obvodu ΔP_J , ztráty třením - v ložiskách, na kartáčích a další) je nutné ze stroje odvádět chlazením, které opět promluví do jeho podoby (povrchové žebrování, vnější radiátory či trubky, externí vzduchové či olejové chlazení, ...). Chlazení se označuje mezinárodní značkou IC (international cooling = mezinárodní chlazení) blíže viz ČSN EN 60034-6.

IC X X X X X

Číslice označující uspořádání chladicího okruhu

(0 - 9)

Písmeno označující druh primárního chladiva

(A, H, N, C, U, W, S)

Číslice označující způsob uvádění primárního chladiva do pohybu

(0 - 9)

Písmeno označující druh sekundárního chladiva (je-li použito)

(A, H, N, C, U, W, S)

Číslice označující způsob uvádění sekundárního chladiva do pohybu

(0 - 9)

Montáž

Vnější podoba stroje závisí taky na jeho upevnění k podložce a u točivých strojů na spojení s poháněným zařízením. Všechna tato konstrukční řešení jsou zahrnuta v mezinárodním označení tvaru strojů a polohy svorkovnice IM (international mounting = mezinárodní montáž) blíže viz ČSN EN 60034-7+A1.

IM X X X X

Skupinové číslo tvaru stroje

(0 - 9)

Číselný znak podle způsobu montáže

(00 - 99)

Číselný znak podle konce hřídele

(0 - 9)



SHRNUTÍ POJMŮ

Magnetický obvod, elektrický obvod (vinutí), izolace, krytí, chlazení, montáž.



OTÁZKY

Jaké ztráty vznikají v magnetických obvodech a jak je snižujeme?

K čemu slouží vinutí elektrických strojů?

Jaké jsou třídy izolací a co tyto třídy určují?

Jak se označují vnější vlivy?

K čemu slouží a jak se značí kryty elektrických strojů?

K čemu slouží a jak se označuje chlazení elektrických strojů?

1.2. Konstrukční uspořádání stejnosměrných strojů

POZNÁMKA:

Stejnosměrné stroje se podle druhu konané práce rozdělují na generátory neboli dynamy a na motory. V tomto textu se zaměřím jen na motory, které používají jako hnací část pohonů.



ČAS KE STUDIU

90 minut.



CÍL

Poznat jednotlivé části statoru a rotoru stejnosměrných strojů.



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Stator = nepohyblivá vnější část stroje.

Rotor = rotující část stroje.

Hlavní póly = vytvářejí spolu s vinutím hlavních pólů budící magnetické pole.

Pomocné póly = vytvářejí spolu s vinutím magnetické pole působící proti magnetickému poli rotoru (reakci kotvy – viz další kapitola) a potlačuje jej.

Kompenzační vinutí = je umístěno v pólových nástavcích hlavních pólů a pomáhá potlačovat magnetické pole rotoru a zlepšuje tvar magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem.

Komutátor = válec poskládaný z měděných vzájemně odizolovaných lamel, do kterých jsou naletovány vývody rotorového vinutí.

Kartáč = uhlíkový hranolek, který dosedá na komutátor a pomocí měděného vývodu spojuje rotorové vinutí s rotorovou svorkovnicí umístěnou na statoru.

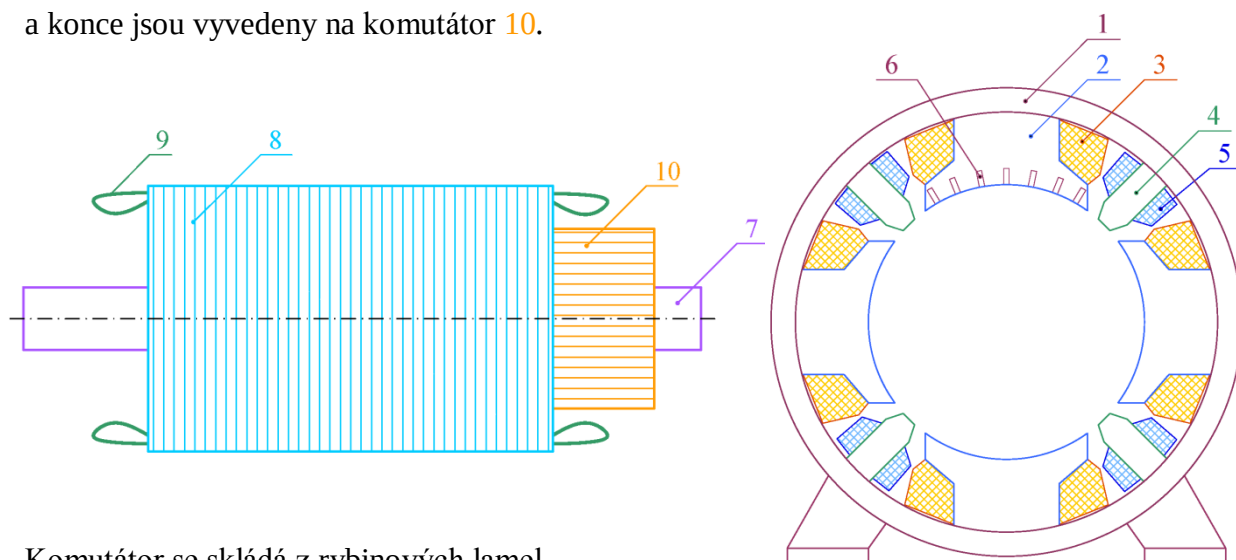
Smyčkové vinutí = vinutí rotoru, které má komutátorový krok roven jedné nebo mínus jedné.

Vlnové vinutí = vinutí rotoru, které má komutátorový krok větší než krok drážkový



VÝKLAD

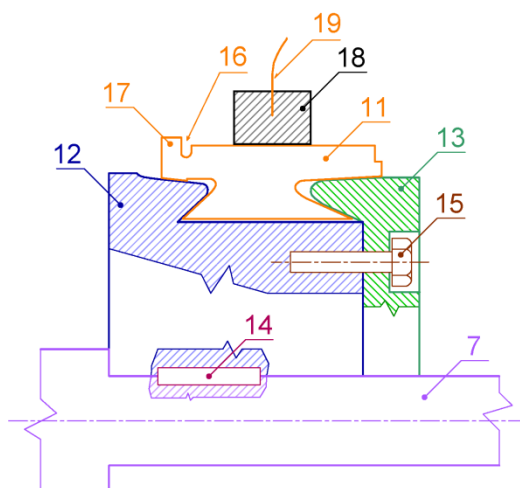
Stejnoseměrný stroj se skládá ze statoru a rotoru. Stator je složen s několika částí - v odlité kostře **1** jsou našroubovány hlavní póly **2**, na nichž je navinuto tzv. budicí vinutí **3** (vinutí hlavních pólů), mezi hlavními póly jsou našroubovány póly pomocné **4** s vinutím pomocných pólů **5**. Hlavní póly větších strojů pak mívají navíc ve svých pólových nastavcích drážky **6** pro uložení kompenzačního vinutí. Dnes se statory menších strojů pro zlevnění výroby vyrábějí z plechů, které jsou vystříženy tak, že vytvářejí hlavní a pomocné póly a v drážce mezi nimi je uloženo jak vinutí budicí, tak i vinutí pomocných pólů (vzájemně odizolované), některé stále mají opět v pólových nastavcích hlavních pólů drážky pro uložení kompenzačního vinutí. Celý svazek statorových plechů je pak nalisován do kostry. Rotor má tvar válce, je složen ze svazku plechů **8** nalisovaného na hřídeli **7**. Na vnějším obvodu rotorových plechů jsou drážky, ve kterých je izolovaně uloženo vinutí **9**, jehož začátky a konce jsou vyvedeny na komutátor **10**.



Komutátor se skládá z rybinových lamel

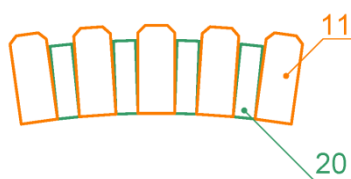
11 vyrobených z tvrdé mědi, mezi nimi jsou vloženy mezilamelové izolace stejného tvaru

vyrobené nejčastěji z mikanitu (slídy). Lamely a izolace jsou staženy stahovací konstrukcí složené ze dvou částí, pevná část **12** je k hřídeli **7** připojena pomocí zajišťovacího pera **14**, volná část **13** se k pevné části přitahuje stahovacími šrouby **15**. Na lamelách je patrná značka pro opracování **16** a také praporek pro naletování konců vinutí rotoru **17**. Na komutátor dosedají uhlíkové kartáče **18** držené nosičem kartáčů upevněným ve statoru a pomocí měděného vývodu **19** propojuje



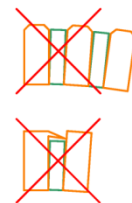
komutátor (vinutí rotoru) s rotorovou svorkovnicí umístěnou na kostře statoru.

Mezilamelová izolace 20 musí být správně zahloubena (po výrobcem určené době provozu se



musí přefrézovat) a lamely musí být zkoseny, aby nedošlo k propojení dvou lamel vlivem „otřepků“.

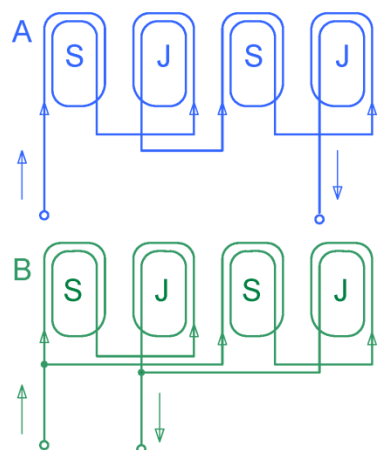
U menších strojů se vyrábějí komutátory nerozebíratelné. Při jejich výrobě se lamely



poskládají do formy a prostor mezi nimi i pod nimi se tlakově zaplní roztaveným termoplastem. Termoplast zde slouží jako mezilamelová izolace i jako stahovací materiál. Jejich velkou výhodou jsou výrazně nižší výrobní náklady, nevýhodou pak nemožnost výměny případně poškozené lamely.

Vinutí statoru

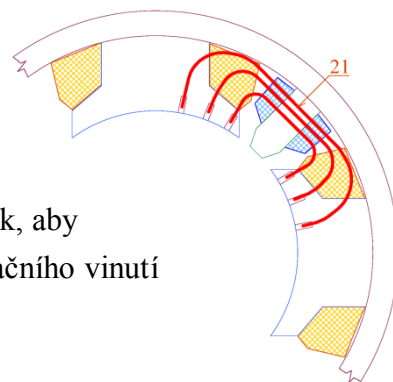
Ve statoru jsou umístěny na hlavních pólech budící cívky (3), na pomocných pólech vinutí



pomocných pólů (5) a u větších strojů je v drážkách pólových nástavců hlavních pólů uloženo kompenzační vinutí (21).

Budící cívky bývají nejčastěji zapojeny do série A, ale mohou být zapojeny i paralelně nebo paralelně ve skupinách B.

Kompenzační vinutí 21 vložené do drážek pólových nástavců hlavních pólů se umísťuje do prostoru mezi hlavní póly a stejně jako cívky pomocných pólů se jejich jednotlivé cívky zapojují vždy sériově (A). Zapojují

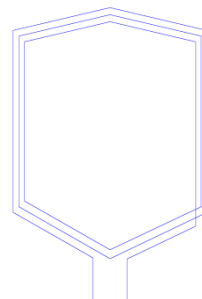


se navíc sériově vůči sobě a též sériově k vinutí rotoru (vždy tak, aby magnetické pole pomocných pólů a magnetické pole kompenzačního vinutí působilo proti magnetickému poli rotoru).

Vinutí rotoru

Rotory mají většinou dvouvrstvé vinutí a platí pro něj, že drážkový krok musí přibližně odpovídat pólovému dělení, může však být i zkrácený či prodloužený.

Má-li cívka rotoru takový tvar, že její začátek je připojen na lamelu komutátoru sousedící s lamelou, do které je naletován konec této cívky, mluvíme o tzv. smyčkovém vinutí. Počet lamel mezi začátkem a koncem vinutí jedné cívky rotoru se nazývá krok komutátoru a u smyčkového vinutí je tedy vždy roven jedné. Komutátorový krok smyčkového vinutí



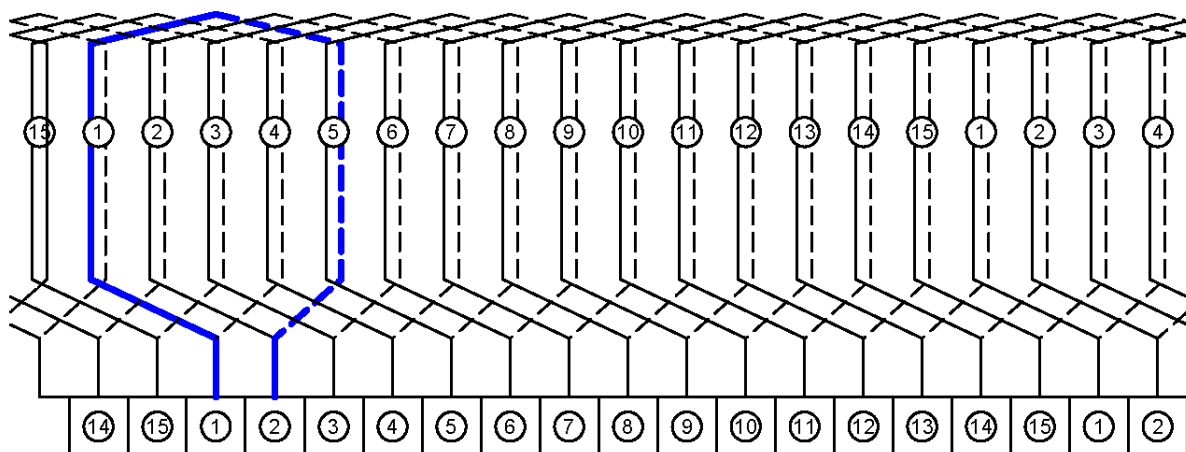
vypočteme ze vztahu: $y_k = y_1 - y_2 = 1$, kde y_1 je drážkový krok

($y_1 = \frac{Q}{2p}$, popř. $y_1 = \frac{Q}{2p} - n$ pro zkrácený krok, kde Q je počet drážek, $2p$ počet pólů a n

počet drážek, o které je krok zkrácen) a y_2 je krok připojení (krok kartáčů). Bude-li konec cívky připojen na lamelu s o jedno vyšším číslem než začátek této cívky (např. začátek = lamela č. 1, konec = lamela č. 2), jedná se o tzv. nekřížené vinutí (viz obrázek), bude-li naopak konec na lamele s nižším číslem (začátek = lamela č. 2, konec = lamela č. 1) jedná se o vinutí křížené.

Smyčkové vinutí má vždy počet paralelně zapojených proudových okruhů roven počtu pólů a také počtu kartáčů.

Na obrázku je uveden příklad rotorového smyčkového nekříženého vinutí čtyřpólového stroje s 15 drážkami:

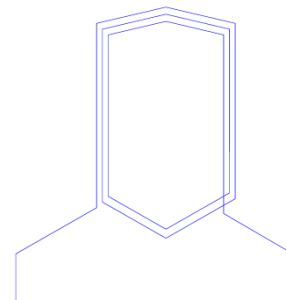


$$y_1 = \frac{Q}{2 \cdot p} = \frac{15}{2 \cdot 2} = 4, \quad y_k = 1.$$

Druhý možný způsob provedení rotorového vinutí je tzv. vinutí vlnové. Komutátorový krok vlnového vinutí je vždy větší než krok drážkový a odpovídá dvojnásobnému pólovému dělení. Je dán vztahem:

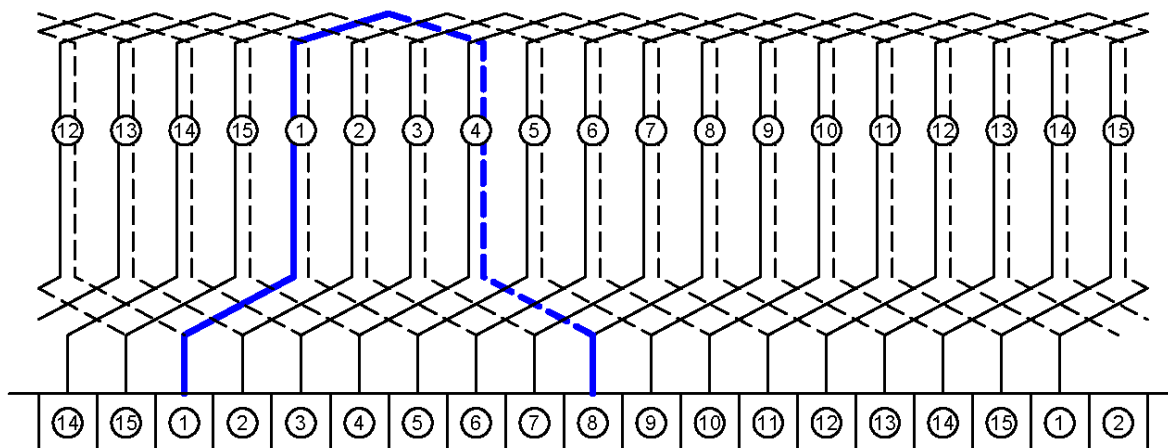
$$y_k = \frac{K \pm 1}{p}, \text{ nebo } y_k = y_1 + y_2, \text{ (kde } K \text{ je počet lamel a } y_1 = \frac{Q \pm 1}{2 \cdot p} \text{)}.$$

Počet lamel musí být u vlnového vinutí vždy lichý, jinak by konec poslední sériově spojené cívky skončil v lamele, na kterou je připojen začátek první cívky. Budeme-li ve výpočtu drážkového a komutátorového kroku dosazovat znaménko -, bude vinutí nekřížené (viz obrázek) a při dosazení znaménka +, bude křížené.



Na obrázku je uveden příklad rotorového vlnového nekříženého vinutí čtyřpólového stroje s 15 drážkami:

$$y_1 = \frac{Q-1}{2 \cdot p} = \frac{15-1}{2 \cdot 2} = 3, \quad y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{15-1}{2} = 7.$$



SHRNUTÍ POJMŮ

Stator, rotor, hlavní póly, budící vinutí, pomocné póly, kompenzační vinutí, komutátor, kartáč, smyčkové vinutí, vlnové vinutí.



OTÁZKY

Z čeho se skládá stator?

Z čeho se skládá rotor?

Jaká jsou vinutí ve stejnosměrných strojích?

1.3. Reakce kotvy a její potlačení



ČAS KE STUDIU

45 minut.



CÍL

Definovat pojem reakce kotvy, seznámit se s jejími důsledky a se způsoby jejího potlačení.



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Reakce kotvy = magnetické pole buzené proudem rotoru.

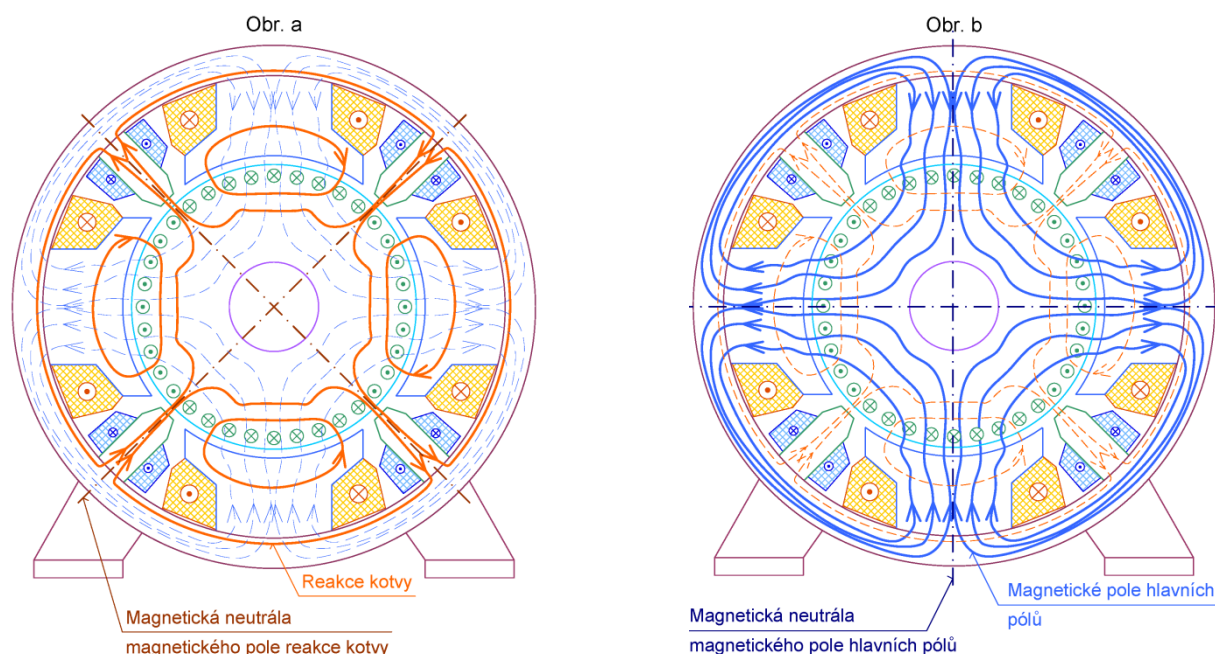
Lamelové napětí = napětí naměřené mezi lamelami komutátoru.

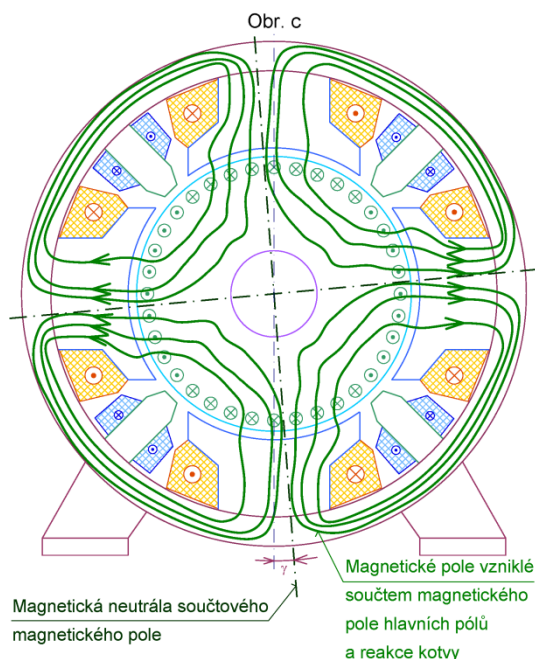
Lamelové spojky = vodiče spojující lamely, které mají mít stejný potenciál.



VÝKLAD

Pojmem „reakce kotvy“ nazýváme magnetické pole vytvářené proudem procházejícím vinutím rotoru (obr a). Magnetické indukční čáry jsou kolmé na indukční čáry magnetického pole hlavních pólů (obr b). Obě pole se sčítají a výsledné pole (obr c) má proti magnetickému poli hlavních pólů posunutou magnetickou neutrálu (směr posunutí magnetické neutrály závisí na činnosti stroje, u dynam je posunutá ve směru otáčení, u motorů proti směru).





Reakce kotvy je tedy ve stroji nežádoucí, a proto se ji snažíme potlačit. K potlačení slouží pomocné póly zapojené do série s rotorovým vinutím a u větších strojů se navíc do série připojuje i vinutí kompenzační. Jelikož vinutí pomocných pólů (i případné kompenzační vinutí) je zapojeno do série s vinutím rotoru, prochází jím při jakémkoliv zatížení stejný proud, který vytváří stejné magnetické pole jen opačného směru a tím kompenzuje (potlačuje) pole reakce kotvy.

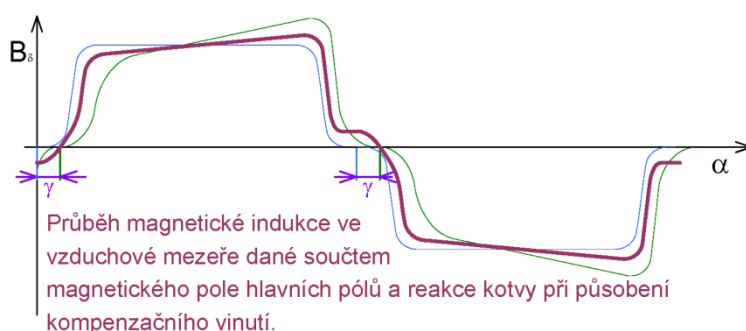
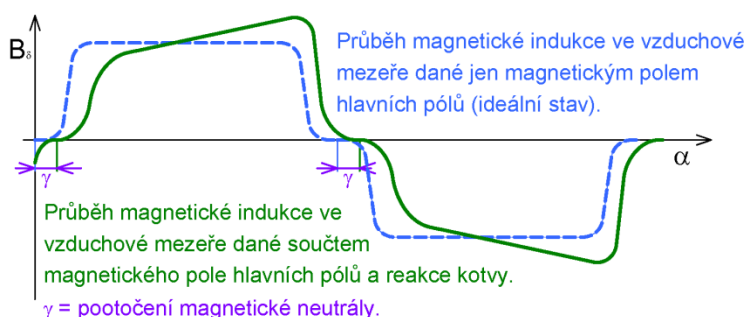
Nestačí-li to k úplnému vyrušení pole reakce kotvy, pak je nutné ještě pootočit kartáče o úhel γ tak, aby ležely v magnetické neutrále.

Při znázornění průběhu magnetické indukce

v závislosti na poloze vidíme (stejně jako na obr. c), že je výsledné magnetické pole reakcí

kotvy vytlačeno k jedné straně pólového nastavce hlavního pólu, tím zde vzniká magnetické přesycení a tedy deformované nehomogenní pole. Důsledkem deformovaného budícího pole se indukují v cívkách rotoru různá

napětí a to vede k napěťovým rozdílům mezi lamelami komutátoru (tzv. lamelovému napětí) a tím i k jiskření mezi lamelami. Lamelové napětí, jak již bylo řečeno, potlačujeme kompenzačním vinutím, které kromě potlačení reakce kotvy zmenšuje i deformaci budícího pole hlavních pólů. Navíc lamely, které mají mít stejné napětí, vzájemně propojujeme tzv. lamelovými spojkami (propojkami).





SHRNUTÍ POJMŮ

Reakce kotvy, lamelové napětí, lamelové spojky.



OTÁZKY

Co je to reakce kotvy a jak ji potlačujeme?

K čemu slouží lamelové spojky?

K čemu slouží kompenzační vinutí?

1.4. Komutace



ČAS KE STUDIU

45 minut.



CÍL

Definovat pojem komutace, seznámit se s jejím průběhem, s jejími nepříznivými vlivy a se způsoby jejího zlepšení.



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Komutace = změna směru proudu v cívce rotoru.

Reaktanční napětí = napětí indukované do komutující cívky vlivem změny směru proudu.

Komutační napětí = napětí indukované do komutující cívky sloužící k potlačení reaktančního napětí.



VÝKLAD

Je to proces, při kterém nastává změna směru proudu ve vinutí rotoru při přechodu kartáče z lamely na lamelu (viz obrázek na další straně).

A jelikož tento proces trvá nějakou dobu (tzv. doba komutace t_k), nastává časová změna proudu a tedy i magnetického toku vyvolaného tímto proudem. Touto změnou se indukuje v komutující cívce tzv. reaktanční napětí. Velikost reaktančního napětí závisí na indukčnosti komutující cívky L_k a na časové změně proudu $\Delta I / \Delta t$:

$$u_k = L_k \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

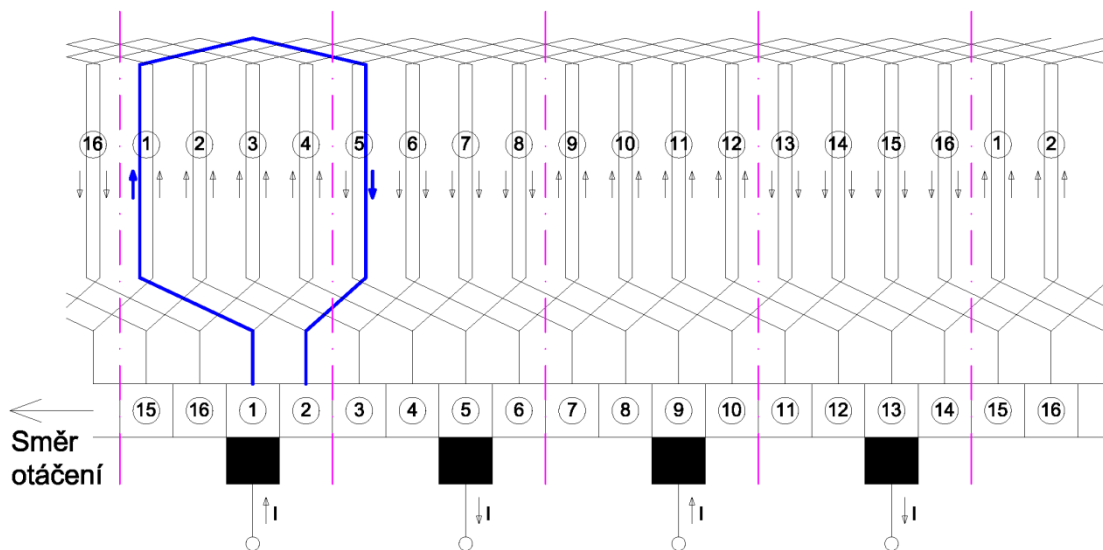
Pokud by se proud během komutace měnil lineárně (ideální průběh komutace) z $+I$ na $-I$ (tedy $2 \cdot I$), velikost komutačního napětí bychom mohli vypočítat ze vztahu:

$$u_k = L_k \cdot \frac{2 \cdot I}{t_k} = 2 \cdot I \cdot L_k \cdot \frac{v_k}{b_k},$$

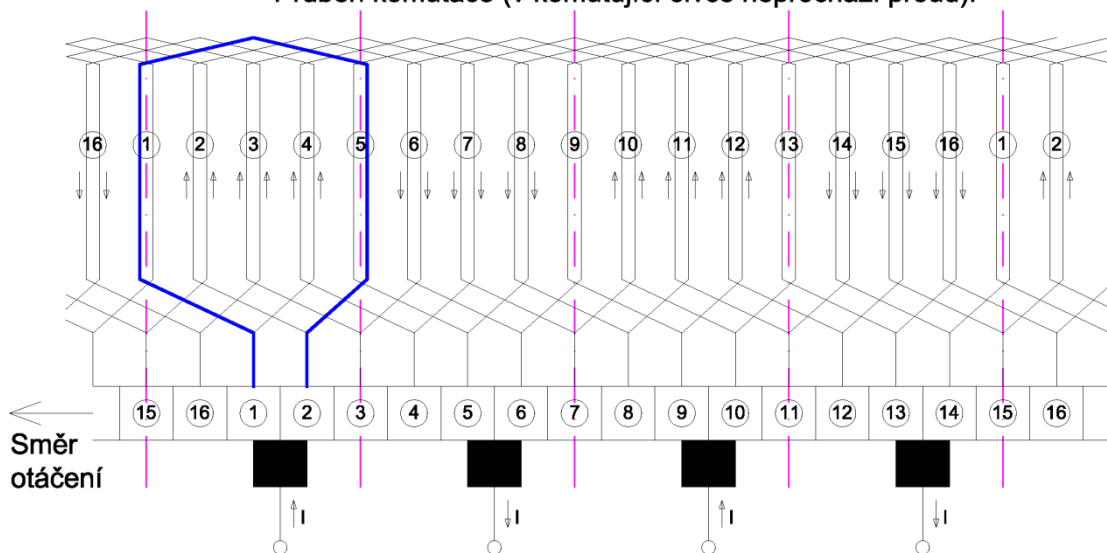
kde v_k je obvodová rychlost rotoru a b_k je šířka kartáče.

Ve skutečnosti však v důsledku Lenzova zákona (reaktanční napětí svými účinky působí proti změně, která jej způsobila) proud klesá ze začátku pozvolněji a největší změna nastává v okamžiku, kdy kartáč opouští lamelu. V tomto okamžiku se tedy i indukuje největší

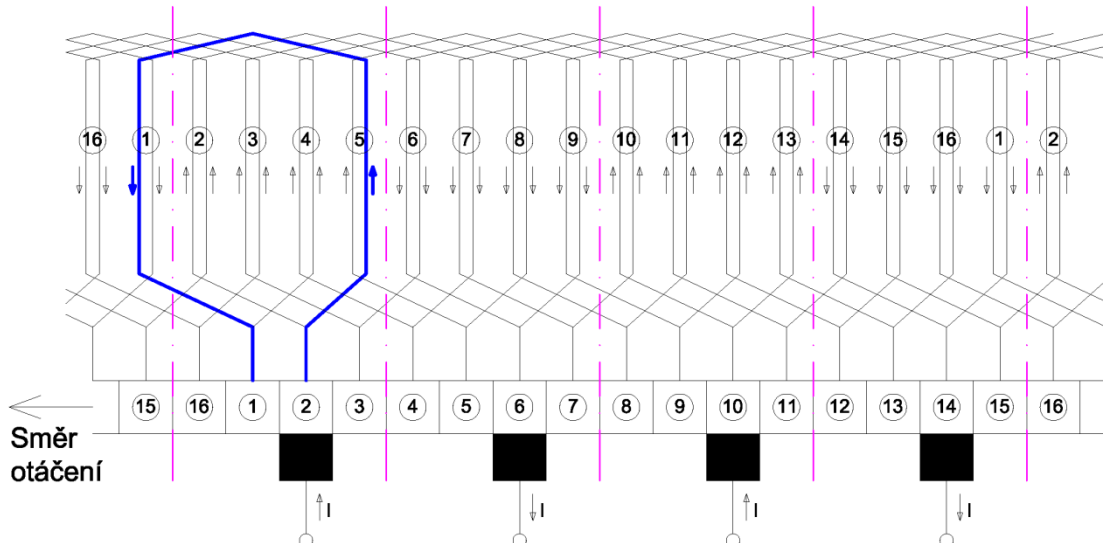
Začátek komutace (čerchovanou čarou je znázorněna magnetická neutrála).

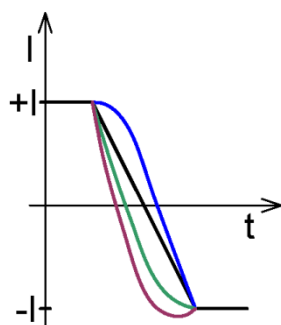


Průběh komutace (v komutující cívce neprochází proud).



Konec komutace (magnetická neutrála se posunula o jednu drážku dál).





Přímková komutace (ideální stav).

Skutečný průběh komutace (bez prostředků ke zlepšení komutace)

Průběh komutace při použití prostředků ke zlepšení komutace

Průběh při překomutování

reaktanční napětí a dochází k jiskření. Průběh komutace se tedy snažíme upravit tak, aby se v komutující cívice indukovalo i tzv. komutační napětí, které působí proti napětí reaktančnímu. Zlepšení průběhu

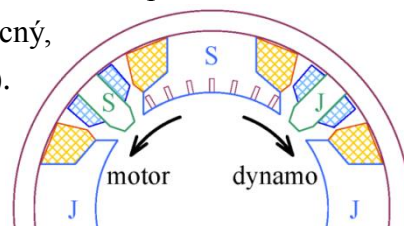
komutace provádíme u malých strojů pootočením kartáčů, u větších strojů použitím pomocných pólů a u největších strojů použitím pomocných pólů a kompenzačního vinutí.

K vytvoření komutačního napětí pootočením kartáčů dojde, pootočíme-li kartáče až za magnetickou neutrálu, kdy se komutující cívka dostane do vlivu sousedního hlavního pólu. Pootočení kartáčů se používá jen u strojů s malou změnou zatížení (se změnou zatížení se mění i magnetické pole reakce kotvy a tím i potřebný úhel pootočení). Nevýhodou tohoto způsobu je, že při velkém pootočení dochází i ke změně magnetického pole reakce kotvy a tím k zeslabování budícího magnetického pole.

Použití pomocných pólů (popřípadě i kompenzačního vinutí) slouží k potlačení reakce kotvy (viz předchozí kapitola) a navíc můžeme přidáním závitů vinutí pomocných pólů zesílit magnetické pole pomocných pólů a tím i indukovat komutační napětí do komutující cívky. Mohlo by se však stát, že magnetická indukce pomocných pólů bude příliš velká a tím by došlo k tzv. překomutování. Proto se mezi pomocný pól a kostru stroje vkládají plechy, které zmenšují vzduchovou mezeru mezi póly a rotorem (jejich tloušťka se zjišťuje při zkouškách prototypu). Pomocné póly jsou ve statoru zapojeny vždy tak, aby se v komutující cívice indukovalo napětí vyvolávající proud takového směru, jaký bude v cívice po komutaci (u motoru bude za severním hlavním pólem severní pól pomocný, u dynamu bude za hlavním pólem severní pomocný pól jižní).



SHRNUTÍ POJMŮ



Komutace, reaktanční napětí, komutační napětí, překomutování, jiskření na komutátoru.



OTÁZKY

Co je to komutace a jak ji zlepšujeme?

Co je to reaktanční a co komutační napětí?

Kdy nastane překomutování?

Co způsobuje jiskření na komutátoru?

1.5. Stejnosměrné motory

Stejnosměrné motory jsou stroje, které mění elektrickou energii na energii mechanickou (odebíranou z otáčející se hřídele) po připojení ke stejnosměrnému zdroji napětí. Rozdělujeme je podle zapojení budícího vinutí vůči vinutí rotoru (kotvy) na motory s cizím buzením a s buzením vlastním – paralelním (derivačním), sériovým a smíšeným.

1.5.1. Cize buzený motor



ČAS KE STUDIU

180 minut.



CÍL

Popsat schéma zapojení, princip činnosti, otáčkovou charakteristiku, spouštění, regulaci otáček a brzdění stejnosměrného motoru s cizím buzením.



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Cizí buzení = vinutí statoru, které není propojeno s vinutím rotoru a je připojeno na „cizí“ zdroj napětí (jiný zdroj než je připojen k rotorovému vinutí).

Otáčková charakteristika = závislost otáček (úhlové rychlosti) na točivém momentu $n = f(M)$.

Spouštění = rozjezd motoru (roztočení rotoru z klidu), často s omezením záběrného proudu.

Regulace otáček = úmyslná změna velikosti otáček rotoru.

Brzdění = úmyslné zpomalení nebo úplné zastavení otáčení rotoru.

Reverzace = změna směru otáčení (přepólováním vinutí statoru nebo rotoru).

Rekuperace = vracení energie zpět do sítě (zdroje).



VÝKLAD

POZNÁMKA:

Pro kreslení schémat využíváme vždy tzv. dvoupólové uspořádání, tedy kreslíme jen dva kartáče + a – (ve skutečnosti má stroj 2p pólů). Vinutí hlavních pólů kreslíme vždy kolmo na spojnici středů kartáčů a vždy do osy komutátoru.

Úplné schéma motoru se kreslí včetně vinutí pomocných pólů a kompenzačního vinutí zapojených do série s vinutím rotoru (proud jimi teče tak, aby vytvářel magnetické pole proti magnetickému poli rotoru), ale dále v textu budu používat jen schémata zjednodušená (bez vinutí pomocných pólů a kompenzačního vinutí).

Úplné schéma zapojení motoru s cizím buzením:

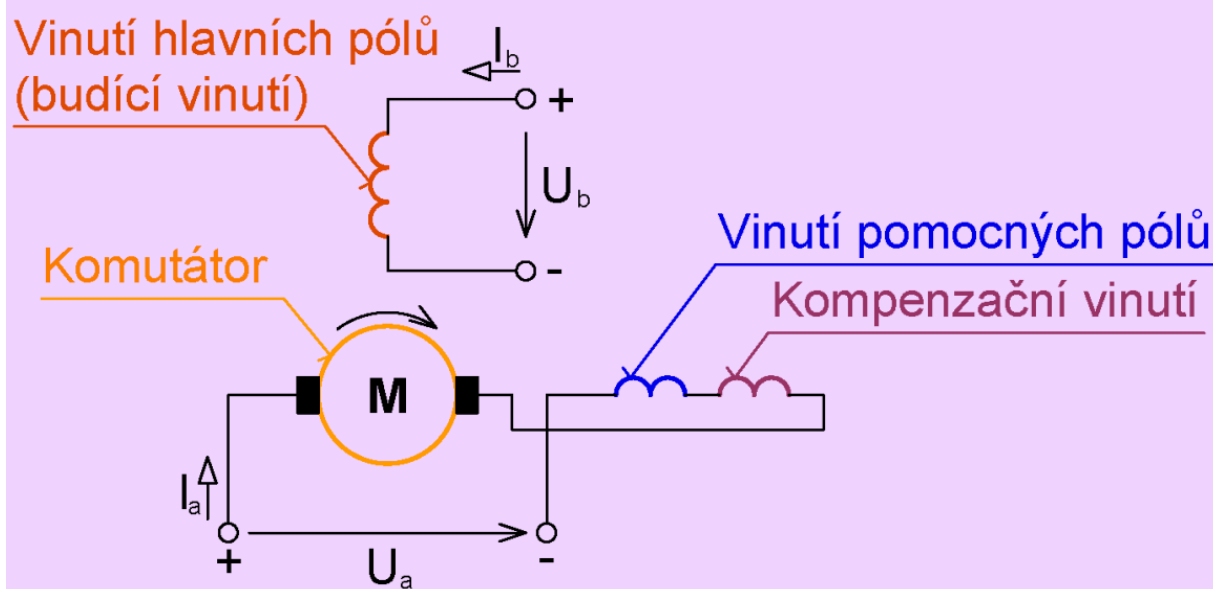
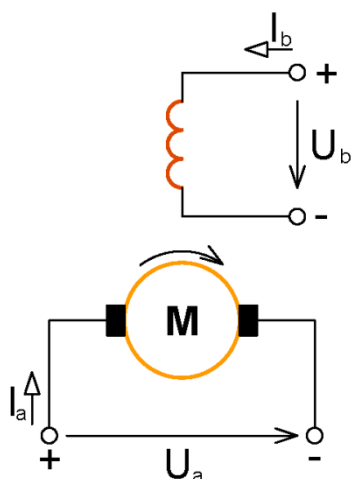


Schéma zapojení



Princip činnosti

Připojíme-li na cívky hlavních pólů zdroj stejnosměrného napětí, začne jimi protékat stejnosměrný proud, který vytvoří statické magnetické pole. Připojíme-li zároveň vinutí rotoru (přes komutátor a kartáče) ke zdroji stejnosměrného napětí, bude jím procházet (přes kartáče a komutátor) proud. A jelikož vodičem rotoru nacházejícího se v magnetickém poli hlavních pólů prochází proud, bude na vinutí rotoru působit síla (Flemingovo pravidlo levé ruky), která rotorem pohne a pootočí jej. Zároveň komutátor s kartáči změni směr proudu ve vinutí

rotoru (dojde ke komutaci) a rotor se opět pootočí. Komutátor tedy zajistí, že pod jižním pólem statoru bude vinutím rotoru procházet opačný proud než pod statorovým pólem severním a rotor se bude otáčet, tzn., že komutátor s kartáči pracuje jako rotační střídač.

Otáčková charakteristika

Je závislost otáček motoru na momentu stroje. U dobře kompenzovaného stroje (Φ se se zatížením nemění) se jedná o přímku se sklonem daným odporem kotvy. Pro určení tvaru otáčkové charakteristiky vycházíme z napěťové rovnice (II. Kirchhoffův zákon)

$U_a = U_i + R_a \cdot I_a$, kde U_i je indukované napětí a je dáno vztahem $U_i = C_1 \cdot \Phi \cdot \omega$, přičemž C_1 je konstrukční konstanta stroje, Φ je budící magnetický tok a ω je úhlová rychlost rotoru. Za indukované napětí dosadíme do napěťové rovnice $U_a = C_1 \cdot \Phi \cdot \omega + R_a \cdot I_a$ a poté ji celou vynásobíme proudem procházejícím rotorem, tím dostaneme rovnici výkonovou

$U \cdot I_a = I_a \cdot C_1 \cdot \Phi \cdot \omega + R_a \cdot I_a^2$, kde $U \cdot I_a$ představuje elektrický příkon, $R_a \cdot I_a^2$ Jouleovy tepelné ztráty ve vinutí rotoru a $I_a \cdot C_1 \cdot \Phi \cdot \omega$ je mechanický výkon na hřídeli motoru. Ten je dán také základním vztahem $P = M_h \cdot \omega$. Z rovností těchto dvou výrazů si vyjádříme proud rotoru

$I_a \cdot C_1 \cdot \Phi = M_h \cdot \omega \Rightarrow I_a = \frac{M_h \cdot \omega}{C_1 \cdot \Phi} = \frac{M_h}{C_1 \cdot \Phi}$. Za proud rotoru dosadíme do napěťové rovnice

$U = C_1 \cdot \Phi \cdot \omega + R_a \cdot \frac{M_h}{C_1 \cdot \Phi}$ a z ní matematickou úpravou vyjádříme úhlovou rychlost

v závislosti na hnacím momentu [$\omega = f(M_h)$]:

$$C_1 \cdot \Phi \cdot \omega = U - R_a \cdot \frac{M_h}{C_1 \cdot \Phi},$$

$$\omega = \frac{U - R_a \cdot \frac{M_h}{C_1 \cdot \Phi}}{C_1 \cdot \Phi},$$

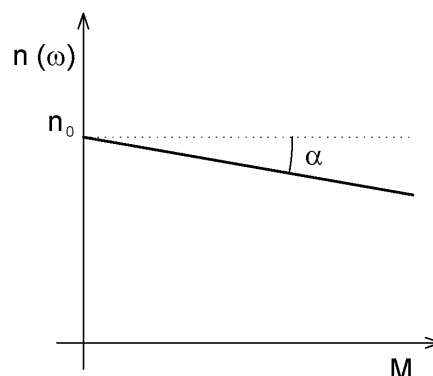
$$\omega = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$$

(obecně $y = k_0 - k_1 \cdot x$), jedná se o rovnici přímky se

směrnicí (sklonem) $\tan \alpha = \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2}$ (na svislou osu vynášíme místo úhlové rychlosti přímo

otáčky dle přepočtu $n = 60 \cdot \frac{\omega}{2 \cdot \pi}$). Dosadíme-li do rovnice stav bez zátěže, tedy $M_h = 0$, pak

dostaneme úhlovou rychlost (otáčky) naprázdno $\omega_0 = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi}$.



POZNÁMKA:

Rovnice přímky ve tvaru: $y = k_0 - k_1 \cdot x$, říká, že přímka protíná osu y v bodě k_0 a že je klesající (-) se sklonem odpovídajícím k_1 ($\tan \alpha = k_1$).

Z charakteristiky je vidět, že záběrný moment (moment při nulových otáčkách) by byl obrovský, ale v praxi jej můžeme využít jen u motorů do 1 kW, neboť moment je úměrný

proudu procházejícímu rotorovým vinutím ($M \sim I_a$) a motor s větším výkonem než 1 kW by byl příliš tepelně namáhán a došlo by k jeho zničení (spouštění viz dále). Z rovnice otáčkové charakteristiky je také patrné, že při chodu naprázdno nebo s jen velice malým zatížením by se motor při odpojení budicího zdroje (odbuzení) roztočil na obrovské otáčky a mohlo by dojít k mechanickému poškození vlivem odstředivých sil.

$$\omega = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$$

∞ (velké)
0 (malé)

Další nevýhodou cize buzeného motoru je nutnost použití dvou zdrojů napětí.

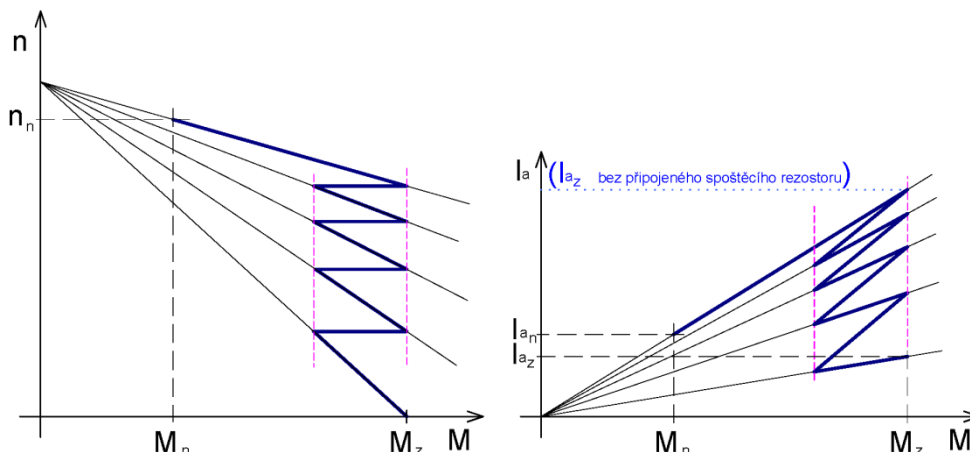
Výhodou je pak snadná reverzovatelnost (změna směru otáčení) přepólováním jednoho ze zdrojů (častěji reverzujeme v obvodu rotoru), včetně možnosti reverzačního brždění a také snadná regulace otáček změnou napětí na rotoru.

Spouštění

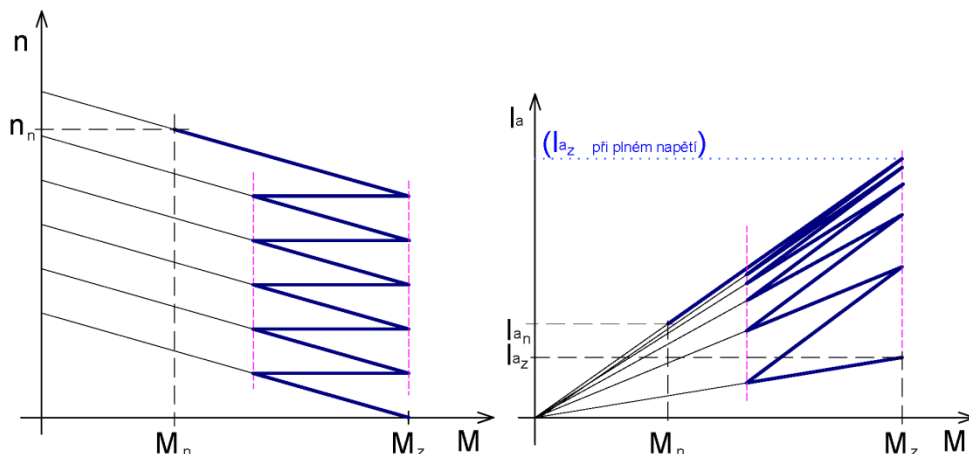
Spouštěním motoru se rozumí jeho roztočení z klidového stavu. V tomto okamžiku nastává velký proudový odběr, který musíme často omezovat.

Stejnoseměrné cize buzené motory se spouští tak, že se nejdříve připojí zdroj napětí k budicímu vinutí, nastaví se příslušný budicí proud a poté se připojí zdroj napětí k vinutí rotoru. Jelikož jsme však omezeni velikostí záběrného proudu, můžeme takto spouštět jen motory do výkonu cca 1 kW. U motorů větších musíme omezit velikost záběrného proudu buď spouštěcím rezistorem zapojeným sériově k vinutí rotoru, nebo snížením napětí rotorového zdroje.

Při *spouštění rezistorem do série s kotvou* se nejdříve nastaví největší hodnota odporu, tomu odpovídá záběrný proud a také sklon charakteristiky (vysvětleno v kapitole regulace otáček), poté se postupně přepínají jednotlivé stupně rezistoru, čímž se snižuje hodnota odporu a motor přechází na odpovídající otáčkovou a proudovou charakteristiku. Po roztočení na jmenovité otáčky se může rotorový spouštěč odpojit (neslouží-li zároveň k regulaci otáček).



Při spouštění regulovatelným zdrojem napětí nejdříve nastavíme velikost napětí na minimální hodnotu a poté napětí zvyšujeme. Máme-li zdroj s plynulou regulací napětí, pak po rozběhu zvyšujeme napětí a tím i otáčky při téměř konstantním momentu a proud narůstá přímo úměrně s napětím. Máme-li zdroj se „skokovou“ regulací napětí, budeme přepínat postupně na vyšší hodnoty napětí a motor bude přecházet na odpovídající otáčkovou (vysvětleno v kapitole regulace otáček) a proudovou charakteristiku.



Regulace otáček

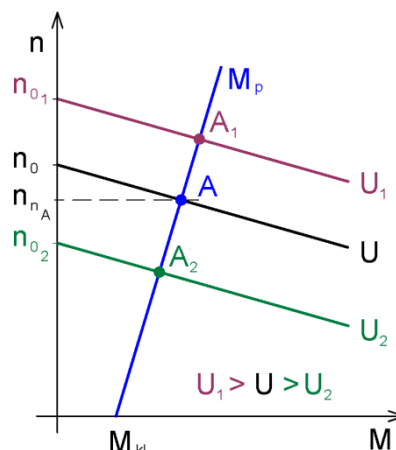
Regulací otáček se rozumí úmyslná změna otáček rotoru (ne změna jiným vlivem například náhlou změnou zatížení).

Otáčky stejnosměrného cize buzeného motoru lze regulovat (jak vyplývá z rovnice otáčkové charakteristiky: $\omega = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$) změnou napětí na rotoru, zařazením rezistoru do série s rotorovým vinutím, nebo změnou velikosti budícího proudu (budícího toku).

POZNÁMKA:

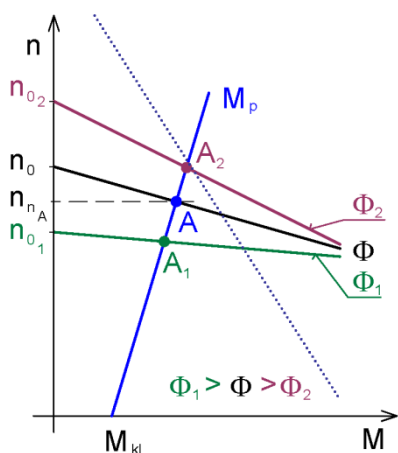
Pro posouzení změny otáček je v obrázcích použita tzv. kalandrová charakteristika pracovního mechanismu a jsou zde vyznačeny pracovní body a v průsečících charakteristik (bude vysvětleno ve druhé části učebního textu: Elektrické pohony).

Regulací otáček změnou napětí na rotoru měníme jen otáčky naprázdno (průsečík s osou otáček), neboť napětí je v rovnici otáčkové charakteristiky jen v prvním členu, sklon charakteristiky zůstává stejný. Většímu napětí na rotoru ($U_1 > U > U_2$) odpovídají vyšší otáčky naprázdno ($n_{01} > n_0 > n_{02}$). Tato regulace (používá se i pro spouštění) je dnes nejpoužívanější díky řízeným polovodičovým měničům.



Regulace otáček rezistorem do série s vinutím rotoru
umožňuje jen snižování otáček, neboť zapojením rezistoru do série s vinutím kotvy se pouze zvýší sklon charakteristiky (zvětší se hodnota druhého členu rovnice otáčkové charakteristiky a tedy i směrnice $\tan \alpha$), otáčky naprázdno se nemění ($R_1 < R_2$).

Regulace otáček buzením nastává při změně magnetického toku vytvářeného proudem procházejícím budícím vinutím.

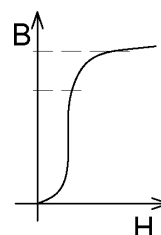


Změnou budícího toku Φ se mění obě části rovnice a jelikož je budící tok ve jmenovateli, budou se při zvýšení budícího magnetického toku zmenšovat otáčky naprázdno (první člen rovnice) a zároveň se bude zmenšovat i sklon charakteristiky (druhý člen rovnice = $\tan \alpha$). Naopak při snížení magnetického toku se budou otáčky naprázdno zvyšovat, ale bude se zvyšovat i sklon charakteristiky ($\Phi_1 > \Phi > \Phi_2$).

Tato regulace má jen omezený rozsah, protože budící tok lze měnit jen velice

omezeně v okolí ohybu magnetizační charakteristiky.

Při malém zatížení však nikdy nesmí dojít k přerušení napájení vinutí hlavních pólů, neboť by magnetický tok poklesl na hodnotu remanentního toku a otáčky by neúměrně vzrostly (viz modrá tečkovaná čára).

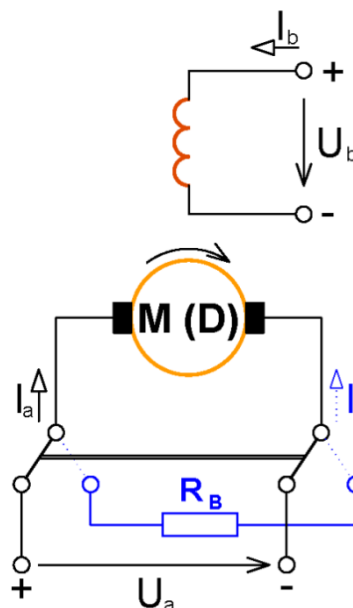


Brzdění

Brzděním se rozumí úmyslné zpomalení nebo úplné zastavení rotoru.

Cize buzené motory mohou být brzděny buď generátoricky nebo protiproudem. Přičemž do generátorického chodu přejde motor při brzdění do odporu nebo při brzdění rekuperací.

Brzdění do odporu – rotor odpojíme od zdroje a připojíme jej k brzdnému rezistoru. Točivá (mechanická) energie rotoru se ve stroji mění v energii elektrickou, tedy motor se stává dynamem a elektrická energie se v brzdném rezistoru mění v teplo ($R \cdot I^2$).



POZNÁMKA:

Princip činnosti cize buzeného dynamu:

Budící vinutí hlavních pólů je připojeno ke zdroji stejnosměrného napětí, budícím vinutím prochází proud a ten vybudí statické magnetické pole. Otáčíme-li rotorem, bude se do vodičů rotorového vinutí indukovat střídavé napětí, které mechanicky usměrňuje komutátor a z kartáčů pak odebíráme napětí stejnosměrné.

Po odpojení motoru od zdroje je první člen rovnice otáčkové charakteristiky roven nule

($\frac{U}{C_1 \cdot \Phi} = 0$) a rovnice otáčkové charakteristiky stroje je po připojení k brzdnému rezistoru

dána rovnicí: $\omega = -\frac{R_a + R_B}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$. Jedná se tedy o rovnici přímky, která má větší sklon, než

původní charakteristika a prochází počátkem

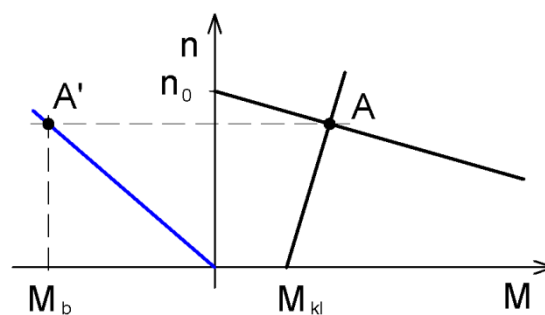
souřadnic. Moment rotujících částí se stává momentem zpomalovacím (znaménko mínus).

Pracovní bod A tedy přejde z pracovní charakteristiky na charakteristiku zpomalovací

do bodu A' (zanedbáme-li pokles otáček

v době přepínání) a bude brzděn brzdným

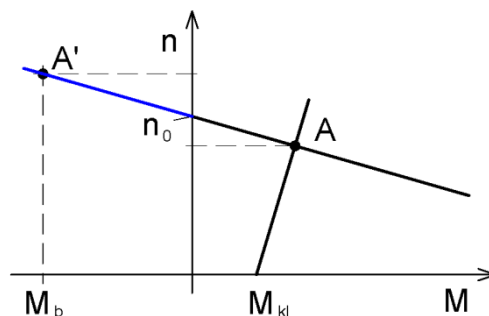
momentem M_b . Brzdný moment se bude zmenšovat se zmenšujícími se otáčkami.



Brzdění rekuperací – nastává tehdy, jsou-li otáčky rotoru větší než otáčky naprázdno a velikost napětí indukovaného do vinutí rotoru je větší než napětí zdroje připojeného k rotoru (zapojení motoru se nemění). Motor přechází do generátorického chodu a vrací elektrickou energii do sítě, přičemž je nutné, aby napájecí zdroj tuto energii uměl přijmout. Elektrickou energii přijme akumulátor, který se dobíjí, dynamo, které se stane motorem, ten roztáčí poháněcí asynchronní motor nad synchronní otáčky a on pak vrací energii do sítě, nebo řízený usměrňovač, který přejde do střídačového chodu (neřízený ani polořízený usměrňovač energii nepřijme stejně jako baterie).

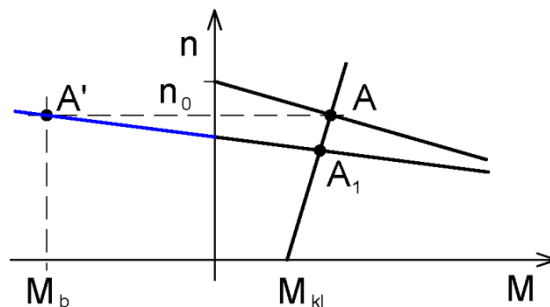
K rekuperaci tedy může dojít:

- při mechanickém zrychlení rotoru pracovním strojem například při spouštění břemene u zdvihačích zařízení nebo při jízdě trakčního vozidla s kopce. Pracovní bod A přejde po stejné charakteristice do bodu A' odpovídajícímu vyšším otáčkám a je brzděn zpět brzdným momentem M_b . Brzdný moment se bude s klesajícími otáčkami zmenšovat, až se stane opět momentem hnacím.

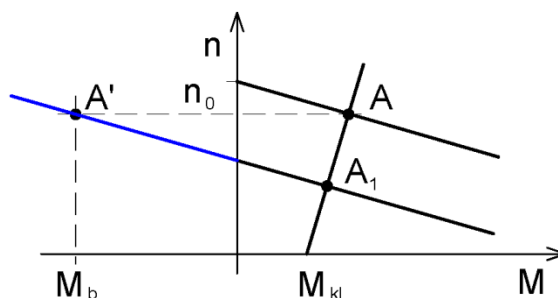


Motor ale bude dále zpomalovat, neboť hnací moment bude menší než moment zátěžný pracovního mechanismu (viz kapitola statická stabilita pohonu). Otáčky motoru se ustálí znovu v pracovním bodě A.

- *při zvýšení budicího toku.* Pracovní bod přejde na charakteristiku odpovídající vyššímu budicímu proudu (nižší n_0 a menší sklon charakteristiky) do pracovního bodu A' a bude brzděn momentem M_b . Brzdňý moment se bude s klesajícími otáčkami zmenšovat, až se stane opět momentem hnacím. Motor, ale bude dále zpomalovat, neboť hnací moment bude menší než moment zátěžný pracovního mechanismu. Otáčky motoru se ustálí v pracovním bodě A₁.

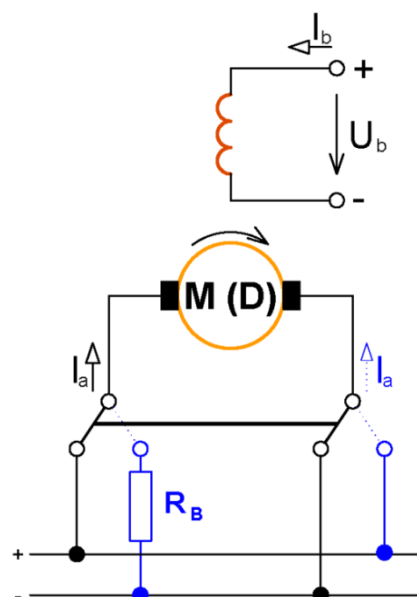


- *při snížení napájecího napětí* například při regulaci otáček napětím. Pracovní bod přejde na charakteristiku odpovídající tomuto napětí (do bodu A') a bude brzděn momentem M_b , a stejně jako v předchozím případě se otáčky motoru nakonec ustálí v pracovním bodě A₁.



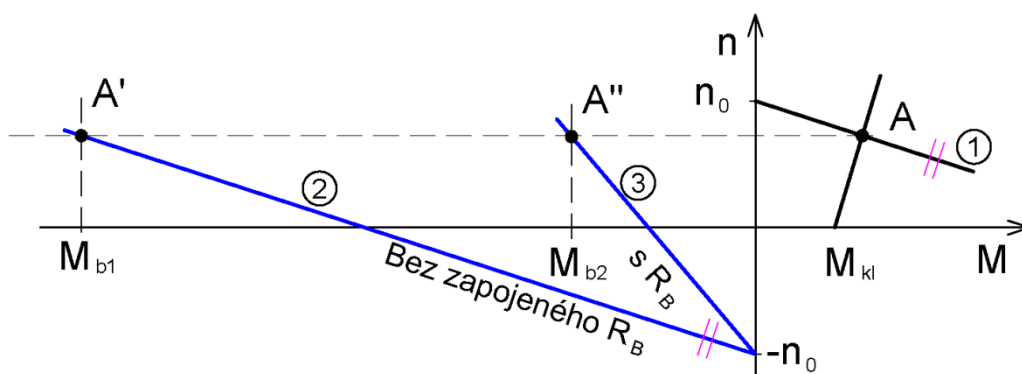
Rekuperačním brzděním lze motor jen přibrzdit do pracovního stacionárního bodu (stacionární bod viz kapitola 2.5 statická stabilita pohonu), pokud by měl být motor úplně zastaven, muselo by se snižovat napětí až na hodnotu, která by odpovídala minimálním otáčkám, a poté by se motor odpojil a nechal by se doběhnout.

Brzdění reverzací – motor začne brzdit reverzací neboli protiproudem, když jej přepneme na opačný smysl točení, tedy přepólujeme napájecí napětí rotoru (častěji) nebo napájecí napětí buzení. Po přepólování zdroje bude jeho napětí ve stejném smyslu jako napětí indukované, bude se s ním sčítat a obvodem začne procházet velký proud ($I_a = \frac{U + U_i}{R_a}$), který může dosáhnout až dvojnásobku jmenovitého proudu. Do obvodu se proto zařazuje brzdňý rezistor, jehož odpor však nesmí být příliš velký, neboť čím bude větší hodnota odporu, tím větší bude sklon charakteristiky a tím menší bude brzdňý moment (musíme najít kompromis mezi velikostí brzdňého momentu



a velikostí procházejícího proudu). Pracovní bod (A) se z charakteristiky ① dané rovnicí otáčkové charakteristiky ($\omega = \frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$) při reverzaci bez zapojeného rezistoru přesune na charakteristiku ② do pracovního bodu A', která je dána rovnicí $\omega = -\frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$, má tedy stejný sklon jako přímka ①, ale osu otáček protíná v bodě $-n_0$. Motor je brzděn brzdňným momentem M_{b1} , kterému odpovídá obrovský proud a ten by mohl poškodit vinutí rotoru. Proto se většinou připojuje brzdňný rezistor R_B a pracovní bod (A) přejde na charakteristiku ③ danou rovnicí $\omega = -\frac{U}{C_1 \cdot \Phi} - \frac{R_a + R_B}{C_1^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_h$ do pracovního bodu A''.

Rovnice má větší sklon než přímka ① a osu otáček protíná v bodě $-n_0$. Brzdňný moment se bude (v obou případech) s klesajícími otáčkami zmenšovat, až se rotor zastaví. V tomto okamžiku se musí odpojit zdroj napětí rotoru, protože jinak by se rotor roztočil opačným směrem (odpojit motor můžeme už při nastavených minimálních otáčkách a motor se nechá doběhnout).



SHRNUTÍ POJMŮ

Cizí buzení, otáčková charakteristika, spouštění motoru s cizím buzením, regulace otáček motoru s cizím buzením, brzdění motoru s cizím buzením, brzdění reverzací.



OTÁZKY

Nakreslete a popište schéma zapojení stejnosměrného motoru s cizím buzením.

Jaký je princip činnosti stejnosměrného motoru s cizím buzením?

Nakreslete a popište otáčkovou charakteristiku stejnosměrného motoru s cizím buzením.

Jak se dají regulovat otáčky stejnosměrného motoru s cizím buzením? Vysvětlete.

Jak se brzdí stejnosměrný motor s cizím buzením? Vysvětlete.

1.5.2. Derivační motor



ČAS KE STUDIU

45 minut.



CÍL

Popsat schéma zapojení, princip činnosti, otáčkovou charakteristiku, spouštění, regulaci otáček a brzdění stejnosměrného motoru derivačního.



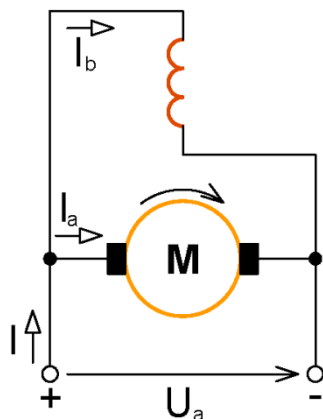
POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Vlastní buzení derivační = vinutí statoru, které je propojeno s vinutím rotoru paralelně.



VÝKLAD

Schéma zapojení



Princip

Po připojení zdroje stejnosměrného napětí na svorky motoru začne procházet proud, který se rozdělí do budicího vinutí (I_b) a zároveň přes komutátor a kartáče do vinutí rotoru (I_a). Proud procházející budicím vinutím vytvoří v hlavních pólech statické magnetické pole. Jelikož vodiči rotoru nacházejících se v magnetickém poli hlavních pólů prochází proud (vytvoří magnetické pole rotoru), bude na ně působit síla, která rotorem pohne a pootočí jej do magnetické neutrály. V neutrále jsou

umístěny kartáče a dojde ke komutaci, tedy ke změně směru proudu ve vinutí rotoru. Tím na rotorové vodiče bude působit síla, která opět rotorem pootočí a ten se začne otáčet (komutátor s kartáči pracuje jako rotační střídač).

Tyto motory se používají tam, kde jsou potřeba otáčky nezávislé na zatížení, a které není potřeba moc regulovat.

Otáčková charakteristika

Je tvarově téměř stejná jako u motoru s cizím buzením.

Bude-li konstantní budicí proud I_b , pak otáčková charakteristika má obdobný tvar (i odvození) jako u cizí buzeného motoru. Stejně jako u cizí buzeného motoru nesmí při malém zatížení

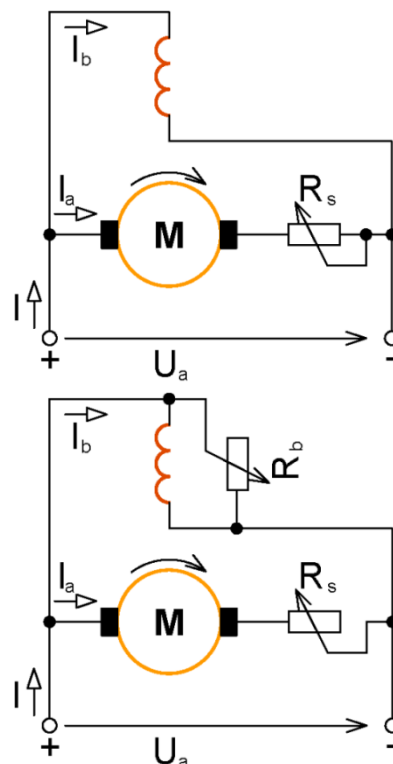
nikdy dojit k přerušení obvodu buzení, neboť by magnetický tok poklesl na hodnotu remanentního toku a otáčky by neúměrně vzrostly.

Spouštění

Tyto motory se spouští jen pomocí proměnného rezistoru zapojeného do série s rotorovým vinutím. Ten bývá navíc dimenzován na trvalý chod a používá se i k regulaci otáček. Spouštění napětím se nepoužívá, protože se se změnou napětí mění samozřejmě i budící proud. Charakteristiky při spouštění jsou stejné jako u cize buzeného motoru.

Regulace otáček

Otáčky derivačního motoru regulujeme proměnným rezistorem zapojeným sériově k vinutí rotoru, případně budícím proudem (regulovaným proměnným rezistorem zapojeným paralelně k budicímu vinutí – jako bočník).



Brzdění

Brzdit derivační motor můžeme úplně stejně jako motor cize buzený, jen při brzdění do odporu se začne při poklesu otáček na malou hodnotu výrazně zmenšovat brzdňný moment. Je-li to možné, je tedy lepší se zmenšujícími se otáčkami zmenšovat i velikost brzdňného odporu.



SHRNUTÍ POJMŮ

Vlastní buzení, derivační buzení, otáčková charakteristika, spouštění, regulace otáček a brzdění derivačního motoru.



OTÁZKY

Nakreslete a popište schéma zapojení stejnosměrného derivačního motoru.

Jaký je princip činnosti stejnosměrného derivačního motoru?

Jak se spouští, jak se regulují otáčky a jak se brzdí stejnosměrný derivační motor? Vysvětlete.

1.5.3. Sériový motor



ČAS KE STUDIU

180 minut.



CÍL

Popsat schéma zapojení, princip činnosti, otáčkovou charakteristiku, spouštění, regulaci otáček a brzdění stejnosměrného motoru derivačního.



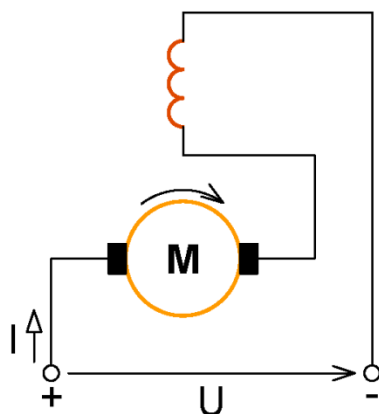
POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Vlastní buzení sériové = vinutí statoru, které je propojeno do série s vinutím rotoru.



VÝKLAD

Schéma zapojení



Princip

Po připojení motoru ke zdroji napětí začne proud procházet vinutím rotoru (přes kartáče a komutátor) i vinutím hlavních pólů (budícím vinutím). Proud průchodem vinutí hlavních pólů vytvoří ve statoru statické magnetické pole, a jelikož vodiči rotoru prochází stejný proud (nachází se v magnetickém poli hlavních pólů), bude na vodiče rotoru působit síla, která rotorem pohne a pootočí jej do magnetické neutrály. V neutrále jsou umístěny kartáče a dojde ke komutaci, tedy ke změně směru proudu ve vinutí

rotoru. Tím na rotorové vodiče bude nadále působit síla stejným směrem a rotor se začne otáčet (komutátor s kartáči pracuje jako rotační střídač).

Otáčková charakteristika

Je závislost otáček motoru na momentu stroje. Jedná se v podstatě o hyperbolu, jejíž jednou asymptotou je osa otáček a druhou je rovnoběžka s osou momentu posunutá pod tuto osu. Pro určení tvaru otáčkové charakteristiky vycházíme (stejně jako u cizebuzeného motoru) z napěťové rovnice $U = U_i + R_{ab} \cdot I$, kde R_{ab} je součet odporu vinutí rotoru a vinutí hlavních

pólů a U_i je indukované napětí, dané vztahem $U_i = C_1 \cdot \Phi \cdot \omega$, kde C_1 je konstrukční konstanta stroje, $\Phi = C_2 \cdot I$ je budící magnetický tok (není konstantní je dán magnetizační charakteristikou) a ω je úhlová rychlost. Za indukované napětí dosadíme do napěťové rovnice $U = C_1 \cdot C_2 \cdot I \cdot \omega + R_{ab} \cdot I$ a poté ji celou vynásobíme proudem, tím dostaneme rovnici výkonovou $U \cdot I = C_1 \cdot C_2 \cdot I^2 \cdot \omega + R_{ab} \cdot I^2$, kde $U \cdot I$ představuje elektrický příkon, $R_{ab} \cdot I^2$ Jouleovy tepelné ztráty ve vinutí rotoru a $C_1 \cdot C_2 \cdot I^2 \cdot \omega$ je mechanický výkon na hřídeli motoru. Ten je dán také základním vztahem $P = M_h \cdot \omega$. Z rovností těchto dvou výrazů si vyjádříme proud $C_1 \cdot C_2 \cdot I^2 \cdot \omega = M_h \cdot \omega \Rightarrow I^2 = \frac{M_h \cdot \omega}{C_1 \cdot C_2 \cdot \omega} = \frac{M_h}{C_1 \cdot C_2} \Rightarrow I = \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}$ a dosadíme jej do napěťové rovnice $U = C_1 \cdot C_2 \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}} \cdot \omega + R_{ab} \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}$. Nakonec si z této rovnice vyjádříme úhlovou rychlost v závislosti na momentu [$\omega = f(M_h)$]

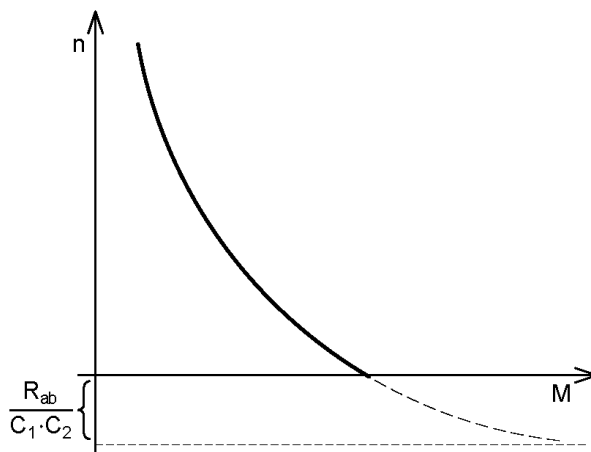
$$C_1 \cdot C_2 \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}} \cdot \omega = U - R_{ab} \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}$$

$$\omega = \frac{U}{C_1 \cdot C_2 \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}} - \frac{R_{ab} \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}}{C_1 \cdot C_2 \cdot \sqrt{\frac{M_h}{C_1 \cdot C_2}}}$$

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{C_1 \cdot C_2} \cdot \sqrt{M_h}} - \frac{R_{ab}}{C_1 \cdot C_2}$$

jedná se o rovnici hyperboly, jejíž jednou asymptotou je osa úhlové rychlosti (otáček

$n = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega$) a druhou je rovnoběžka s osou momentu posunutá pod tuto osu o $\frac{R_{ab}}{C_1 \cdot C_2}$.

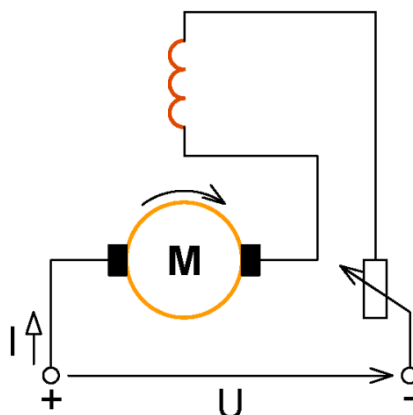


Tyto motory se používají tam, kde je potřeba velkého záběrného momentu (velké obráběcí stroje, trakce, startéry, apod.). Jejich nevýhodou je, že při odlehčení (nulovém zatěžovacím momentu) by jejich otáčky narostly na nekonečno a motor by se zničil odstředivou silou, nesmí se proto zapojovat s řemenovými, řetězovými nebo podobnými převody.

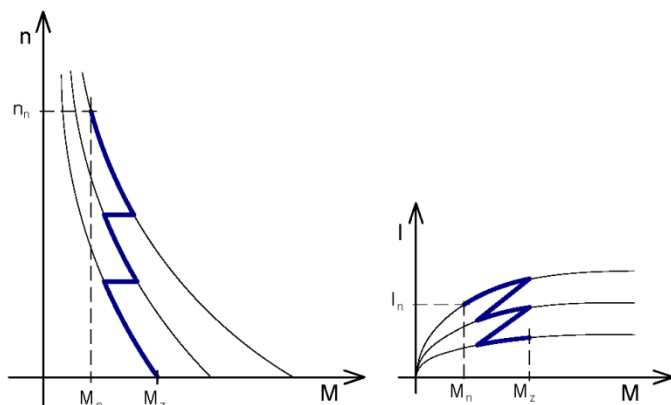
Spouštění

Spouštění sériového motoru se provádí proměnným rezistorem zapojeným do série, nebo regulovatelným zdrojem napětí.

Malé motory můžeme spouštět přímo, ale u motorů větších musíme omezit velikost záběrného proudu buď spouštěcím rezistorem zapojeným sériově k vinutí rotoru, nebo snížením napětí rotorového zdroje.



Při *spouštění rezistorem do série s kotvou* se nejdříve nastaví největší hodnota odporu, tomu



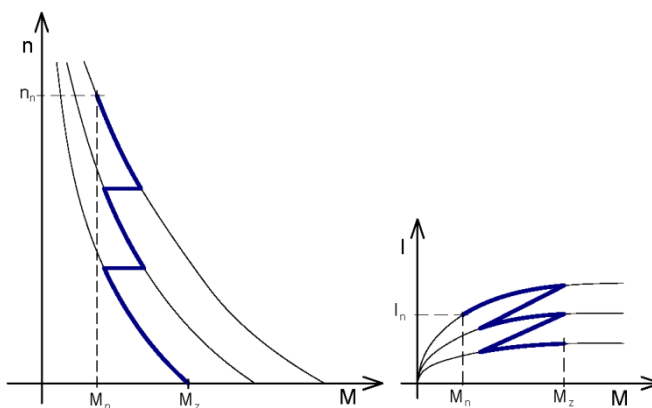
odpovídá záběrný proud a také charakteristika (vysvětleno v kapitole regulace otáček), poté se postupně přepínají jednotlivé stupně rezistoru, čímž se snižuje hodnota odporu a motor přechází na odpovídající otáčkovou a proudovou charakteristiku.

Po roztočení na jmenovité otáčky se může rotorový spouštěč odpojit

(neslouží-li zároveň k regulaci otáček).

Při *spouštění regulovatelným zdrojem napětí* nejdříve nastavíme velikost napětí na minimální hodnotu a poté napětí zvyšujeme.

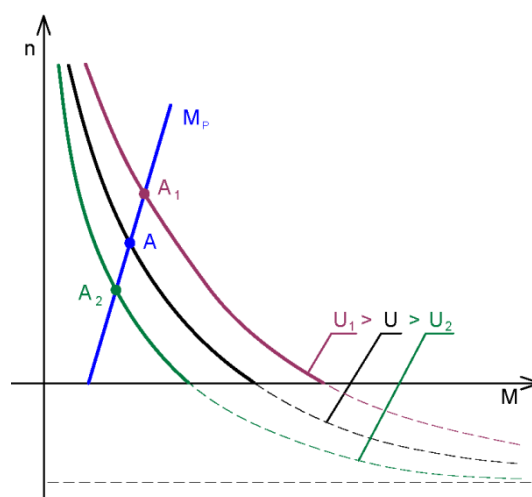
Máme-li zdroj s plynulou regulací napětí, pak po rozběhu zvyšujeme napětí a tím i otáčky při téměř konstantním momentu a proud narůstá přímo úměrně s napětím. Máme-li zdroj se „skokovou“ regulací napětí, budeme přepínat postupně na vyšší hodnoty napětí a motor bude přecházet na odpovídající otáčkovou (vysvětleno v kapitole regulace otáček) a proudovou charakteristiku.



Regulace otáček

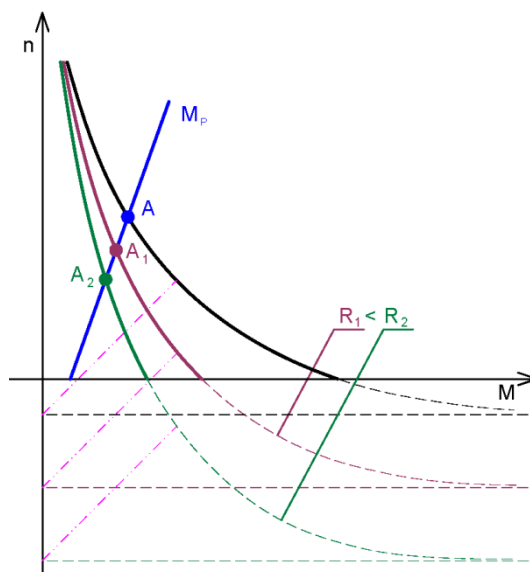
Otáčky sériových motorů se dají řídit napětím, odporem zařazeným do série s vinutím rotoru a budícím proudem.

Regulace otáček změnou napětí - změnou napětí se charakteristika jen posouvá **dál** od průsečíku asymptot (při větším napětí - U_1) nebo **blíží** k průsečíku asymptot (při menším napětí - U_2), asymptoty charakteristik zůstávají stejné.

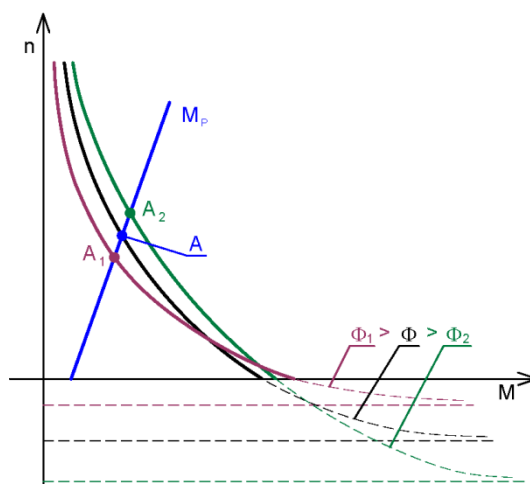


Regulace otáček rezistorem zapojeným do série -
zapojením rezistoru do série s vinutím kotvy (i
s ostatními vinutími) se pouze oddálí asymptota
charakteristiky rovnoběžná s osou momentu dál
pod tuto osu ($\frac{R_{ab}}{C_1 \cdot C_2} < \frac{R_{ab} + R_1}{C_1 \cdot C_2} < \frac{R_{ab} + R_2}{C_1 \cdot C_2}$).

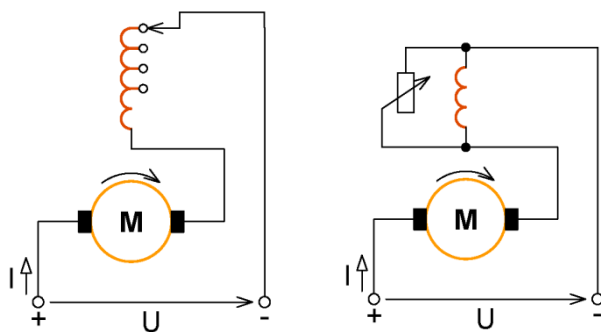
Vzdálenost charakteristiky od průsečíku asymptot
se téměř nemění (— · — · — · —). Otáčky lze regulovat
jen směrem dolů.



Regulace otáček buzením - změnou budícího toku Φ se mění obě části rovnice (mění se
parametr C_2 , neboť $C_2 = \frac{\Phi}{I}$) a proto při zvětšení
toku (Φ_1) se bude charakteristika přibližovat
k průsečíku asymptot a zároveň se bude
přibližovat i asymptota charakteristiky rovnoběžná
s osou momentu blíž k této ose. Naopak při
zmenšení budícího toku (Φ_2) se bude
charakteristika oddalovat od průsečíku asymptot
a zároveň se bude oddalovat i asymptota
charakteristiky rovnoběžná s osou momentu dál od
této osy.



Velikost budícího toku se dá regulovat přepínáním počtu závitů budícího vinutí nebo
zapojením bočníku k budícímu vinutí.



Brzdění

Motory se sériovým buzením mohou být brzděny buď do odporu, nebo protiproudem (reverzací).

Brzdění do odporu – Motor se odpojí od zdroje a připojí se k brzdnému rezistoru zapojenému sériově s vinutím kotvy a hlavních pólů. Tím se motor stane generátorem a změní se směr proudu. Aby se nezměnil i směr magnetického toku hlavních pólů, je nutné přehodit i příklady k budicímu vinutí.

Mechanická rovnice $\omega = \frac{U}{\sqrt{C_1 \cdot C_2} \cdot \sqrt{M_h}} - \frac{R_{ab}}{C_1 \cdot C_2}$, se po

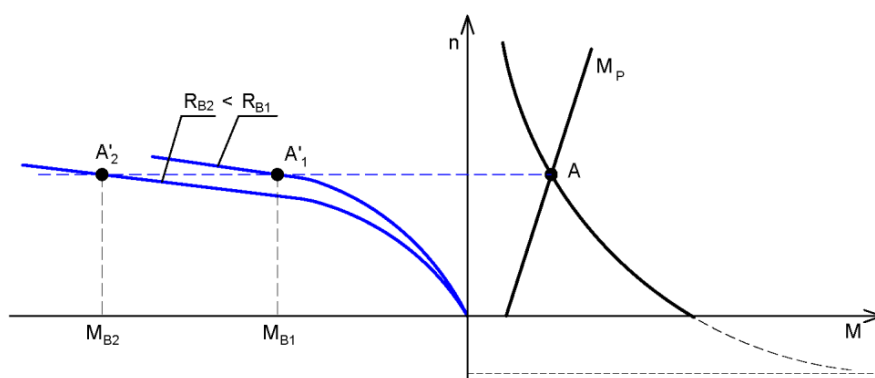
odpojení zdroje napětí ($U = 0$) a po připojení brzdného

rezistoru s odporem R_B upraví na tvar $\omega = + \frac{R_{ab} + R_B}{C_1 \cdot C_2}$,

(kladné znaménko vychází z konstanty C_2 , neboť při brzdění je proud rotorem opačný, tedy

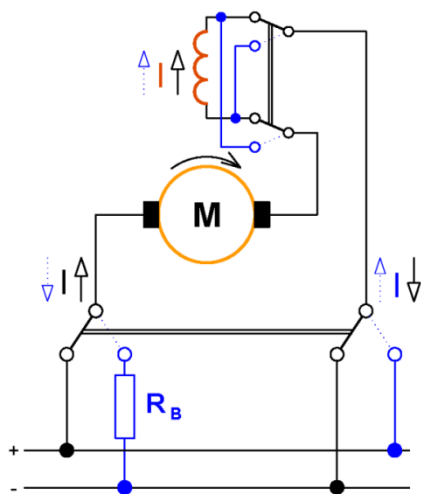
$C_2 = \frac{\Phi}{-I}$). Tato rovnice představuje přímku rovnoběžnou s osou momentu. Ve skutečnosti má však zpomalovací charakteristika tvar křivky, která nejdříve mírně a poté stále prudčeji klesá směrem k ose momentu. To je způsobeno konstantou C_2 , která se při zpomalování motoru zmenšuje.

Pracovní bod A tedy přejde z pracovní charakteristiky na charakteristiku zpomalovací do bodu A' (zanedbáme-li pokles otáček v době přepínání) a bude brzděn brzdným momentem M_B . Brzdný moment se bude zmenšovat se zmenšujícími se otáčkami dle zpomalovací charakteristiky.



Na charakteristice jsou naznačeny dvě křivky při připojení různých rezistorů ($R_{B1} > R_{B2}$) a je patrné, že menší rezistor způsobí větší brzdný moment ($M_{B2} > M_{B1}$), ale obvodem bude také procházet větší proud (mohl by způsobit poškození vinutí). Musíme tedy volit kompromis mezi velikostí brzdného momentu a brzdného proudu.

Brzdění protiproudem – Zapojíme motor na opačný chod tím, že přepólujeme napětí zdroje



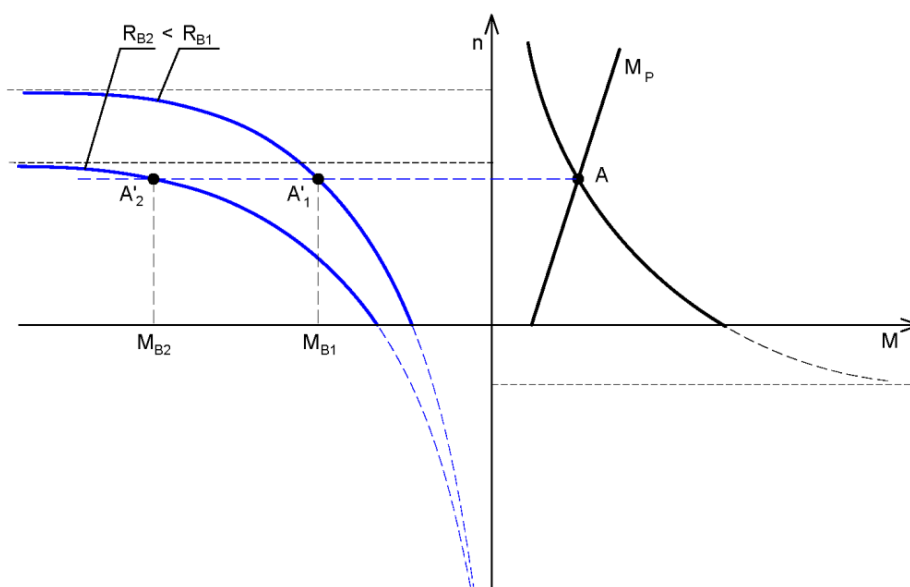
připojeného ke svorkám, přičemž velikost proudu ($I = \frac{U+U_i}{R_{ab}}$) se často zmenšuje do série zařazeným rezistorem R_B

($I = \frac{U+U_i}{R_{ab}+R_B}$) a opět musíme přepólovat i budící vinutí, aby magnetické pole hlavních pólů vytvořilo brzdný moment (snaží se roztočit motor opačně). Původní mechanická charakteristika

($\omega = \frac{U}{\sqrt{C_1 \cdot C_2} \cdot \sqrt{M_h}} - \frac{R_{ab}}{C_1 \cdot C_2}$), pak při brzdění reverzací přejde na zpomalovací charakteristiku ve tvaru

$$\omega = \frac{-U}{\sqrt{C_1 \cdot C_2} \cdot \sqrt{M_h}} + \frac{R_{ab}+R_B}{C_1 \cdot C_2} \quad (\text{znaménko } + \text{ před druhou částí})$$

rovnice je opět dáno konstantou $C_2 = \frac{\Phi}{-I}$, což je rovnice hyperboly, jejíž jednou asymptotou je osa otáček a druhou rovnoběžka s osou momentu posunutá nad tuto osu o $\frac{R_{ab}+R_B}{C_1 \cdot C_2}$.



SHRNUTÍ POJMŮ

Buzení sériové, otáčková charakteristika sériového motoru, spouštění sériového motoru, regulace otáček sériového motoru, brzdění sériového motoru.



OTÁZKY

Nakreslete a popište schéma zapojení stejnosměrného sériového motoru.

Jaký je princip činnosti stejnosměrného sériového motoru?

Nakreslete a popište otáčkovou charakteristiku stejnosměrného sériového motoru.

Jak se dají regulovat otáčky stejnosměrného sériového motoru? Vysvětlete.

Jak se brzdí stejnosměrný sériový motor? Vysvětlete.

Jaké jsou výhody a nevýhody sériového motoru?

2. ELEKTRICKÉ POHONY

Pod pojmem elektrický pohon rozumíme soubor elektromechanických vazeb a vztahů mezi elektromechanickou soustavou (motorem) a pracovním mechanismem (zátěží). Jedná-li se o točivý pohon, pak se na hřídeli motoru projevuje jeho hnací síla jako tzv. točivý hnací moment a odpor proti otáčení hřídele se projevuje jako tzv. točivý zátěžný moment. Jedná-li se o lineární pohon, pak pohyblivá část motoru vytváří hnací sílu a poháněný pracovní mechanismus vytváří proti této síle odpor, tedy zátěžnou sílu.

2.1. Obecné základy elektrických pohonů

Abychom se s elektrickými pohony seznámili v obecné rovině, musíme si nejdříve definovat základní veličiny, vztahy a přepočty mezi nimi a základní pohybové stavy.

2.1.1. Základní veličiny pohybu a vztahy mezi nimi



ČAS KE STUDIU

90 minut.



CÍL

Seznámit se (zopakovat si) s veličinami spadajícími do oblasti pohonů a naučit se je definovat a poznat vztahy mezi těmito veličinami.



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Přímočarý pohyb = pohyb po přímočaré dráze.

Otáčivý pohyb = pohyb po kruhové dráze.

Moment setrvačnosti = míra setrvačnosti tělesa při otáčivém pohybu.

Poloměr setrvačnosti = poloměr myšlené kružnice, ve které by byla soustředěna veškerá hmotnost otáčejícího se tělesa.

Moment síly = míra otáčivého účinku síly.

Klidový moment = zátěžný moment tělesa v klidu (v okamžiku rozjezdu).

Záběrný moment = moment motoru v okamžiku jeho rozjezdu.



VÝKLAD

Pohyb těles po dráze rozdělujeme podle tvaru dráhy na přímočarý, tedy pohyb po přímce a na otáčivý, tedy pohyb po kružnici. Můžeme se také setkat s jejich kombinací. Základní veličiny přímočarého pohybu jsou: dráha, rychlost a zrychlení, základní veličiny otáčivého pohybu jsou: úhel, úhlová rychlost a úhlové zrychlení (viz tabulka).

Přímočarý pohyb		Otáčivý pohyb	
Dráha	$a, b, c, d, l, s, \dots [m]$	Úhel	$\alpha, \beta, \gamma, \dots [\text{rad}]$
Rychlost	$v = \frac{ds}{dt} = \frac{\Delta s}{\Delta t} [m \cdot s^{-1}]$	Úhlová rychlost	$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta t} [\text{rad} \cdot s^{-1}]$
Zrychlení	$a = \frac{dv}{dt} = \frac{ds^2}{dt^2} = \frac{\Delta v}{\Delta t} [m \cdot s^{-2}]$	Úhlové zrychlení	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\alpha^2}{dt^2} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} [\text{rad} \cdot s^{-2}]$

Rychlost představuje dráhu, kterou těleso urazí za určitý čas, je-li ale pohyb nerovnoměrný pohybuje se těleso v každém okamžiku jinou rychlostí. Okamžitou rychlost můžeme zjistit tak, že dráhu zjišťujeme v časově co nejkratších (nekonečně krátkých) úsecích tzv. časových elementech (dt), ve kterých se těleso posune o elementární úsek dráhy ds (rychlost je za element času konstantní). Stejným způsobem určujeme i úhlovou rychlost při nerovnoměrném pohybu. Zrychlení i úhlové zrychlení je při nerovnoměrně zrychleném (zpomaleném) pohybu opět nutno počítat jako elementární změna rychlosti uskutečněná za element času. Pro rovnoměrný pohyb (přímočarý i otáčivý) můžeme výpočet rychlosti zjednodušit poměrem změny dráhy (Δs , resp. $\Delta \alpha$) za změnu času (Δt). Totéž platí pro výpočet zrychlení rovnoměrně zrychleného pohybu – poměr změny rychlosti (Δv , resp. $\Delta \omega$) a změny času (Δt).

Další veličiny, se kterými se v pohonech setkáváme, jsou: otáčky, moment síly (točivý moment), moment setrvačnosti, poloměr setrvačnosti, síla, tíha či výkon.

Otáčky	$n [\text{min}^{-1}]$	Moment setrvačnosti	$J [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$
Moment síly	$M [\text{N} \cdot \text{m}]$	Poloměr setrvačnosti	$R [m]$
Výkon	$P [W]$	Síla (tíha)	$F (G) [N]$

Otáčky n = počet otočení tělesa (hřídele) za minutu.

V praxi často používáme točivý motor pro pohon přímočarého se pohybujícího tělesa (výtah, pásový dopravník, ...), proto potřebujeme znát vztahy mezi veličinami pohybu přímočarého a otáčivého.

Vztahy mezi rychlostí přímočarého (v) a otáčivého (ω) pohybu:

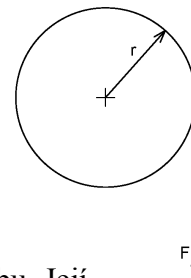
$$v = r \cdot \omega \quad \omega = \frac{v}{r}$$

Vztahy mezi otáčkami (n) a úhlovou rychlostí (jsou přímo úměrné):

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad n = \frac{60 \cdot \omega}{2 \cdot \pi}$$

Vztahy mezi rychlostí (v) a otáčkami (n):

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n}{60} \quad n = \frac{60 \cdot v}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

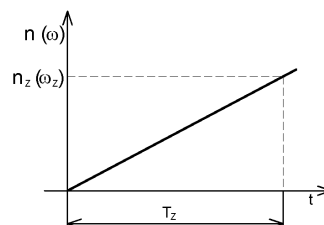


Moment síly M = míra otáčivého účinku síly. Je dán součinem síly a ramene síly $M = F \cdot r$

Moment setrvačnosti J = vyjadřuje míru setrvačnosti tělesa při otáčivém pohybu. Její velikost závisí na rozložení hmoty v tělese vzhledem k ose otáčení. Moment setrvačnosti můžeme vypočítat z geometrických rozměrů otáčejícího se tělesa, nebo měřením pomocí rozběhové či doběhové zkoušky.

Z *geometrických rozměrů* určujeme moment setrvačnosti na základě vztahu: $J = m \cdot R^2$, kde m je hmotnost rotujícího tělesa a R je tzv. poloměr setrvačnosti. Tento výpočet je možný jen u rotačních těles (setrvačnick, příruba, ...), u těles složitých tvarů je velice náročný či dokonce nemožný bez spousty zjednodušujících předpokladů.

Z *rozběhové zkoušky* určujeme moment setrvačnosti poháněného tělesa při jeho roztáčení motorem, přičemž moment motoru musí být konstantní a mnohem větší než moment zátěžný. Pak můžeme moment setrvačnosti určit ze vztahu: $J = M_m \cdot \frac{T_Z}{\omega_Z}$, kde M_m je

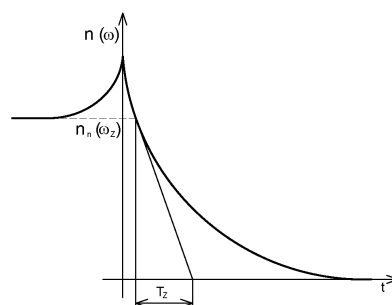


moment motoru, T_Z je čas naměřený při dosažení úhlové rychlosti zkoušky ω_Z (odpovídá otáčkám n_Z).

Při *doběhové zkoušce* se nejdříve těleso roztočí na otáčky vyšší, než jsou jmenovité (otáčky zkoušky) a poté se zařízení odpojí od energie a těleso se nechá doběhnout. Zároveň se vykresluje doběhová křivka. V bodě jmenovitých otáček vyneseme tečnu a ta nám vytne na ose času úsek T_Z , který dosadíme do vztahu pro výpočet momentu setrvačnosti:

$$J = M_T \cdot \frac{T_Z}{\omega_Z} = P_M \cdot \frac{T_Z}{\omega_Z^2}, \text{ kde } M_T \text{ je zátěžný moment tělesa, } \omega_Z$$

je úhlová rychlost zkoušky – nejčastěji při jmenovitých otáčkách motoru n_n a P_M je výkon motoru při jmenovitých otáčkách (změřený před zrychlením a vypnutím).



Poloměr setrvačnosti R = poloměr myšlené kružnice, ve které by byla soustředěna veškerá hmotnost otáčejícího se tělesa.

Výkon přímočarého pohybu P = práce W potřebná pro přesun tělesa po přímočaré dráze s , silou F za čas t : $P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot v$

Vztahy mezi výkonem P a točivým momentem M

$$P = F \cdot v = F \cdot r \cdot \omega = M \cdot \omega \quad M = \frac{P}{\omega} \quad (v = r \cdot \omega; M = F \cdot r)$$

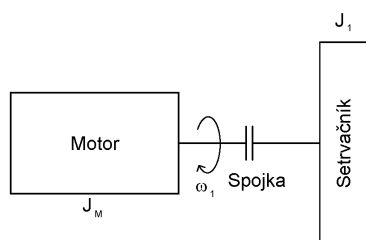
Síla F (tíha G) = vyjadřuje míru vzájemného působení těles, která se projevuje účinky statickými - deformací tělesa, nebo dynamickými - způsobuje změny pohybového stavu tělesa, je dána vztahem $F = m \cdot a$ ($G = m \cdot g$), kde m je hmotnost tělesa, a je zrychlení tělesa a g je tíhové zrychlení (závisí na geografické šířce a nadmořské výšce: na rovníku v úrovni mořské hladiny má hodnotu $g = 9,78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, na 45° šířky $g = 9,8067 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \Rightarrow g_{\text{ČR}} = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, na pólu $g = 9,832 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, na jeden metr výšky nad mořem se g snižuje o $3 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Klidový moment M_{kl} = zátěžný moment v okamžiku pohnutí tělesa: $M_{\text{kl}} = G \cdot r = m \cdot g \cdot r$

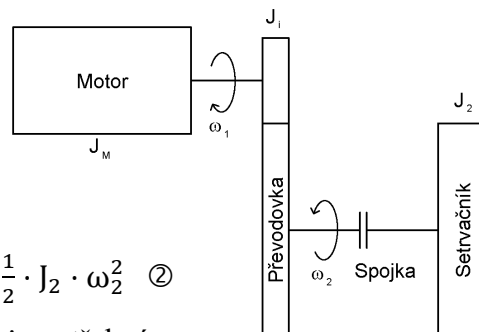
Záběrný moment M_z = moment motoru, který je schopen vyvodit v okamžiku zapnutí (má-li motor pohnout tělesem s klidovým momentem M_{kl} musí být záběrný moment motoru M_z větší $\Rightarrow M_z > M_{\text{kl}}$).

Přepočet momentu setrvačnosti při různých otáčkách

Jelikož do rovnic pohybových stavů (viz dále) můžeme dosazovat jenom momenty vztažené ke stejným otáčkám respektive ke stejné úhlové rychlosti, musíme u pohonů využívajících převod na jiné otáčky přepočítat momenty setrvačnosti na otáčky motoru.



$$W = \frac{1}{2} \cdot J_1 \cdot \omega_1^2 \quad ①$$



$$W = \frac{1}{2} \cdot J_2 \cdot \omega_2^2 \quad ②$$

Oba motory se točí stejnou úhlovou rychlostí ω_1 a energie potřebná k jejich roztočení je tedy také stejná. Energie potřebné k roztočení těles (setrvačníků) s momenty setrvačnosti J_1 a J_2 jsou dány vztahy ① a ②.

Při přepočtu momentu setrvačnosti nahrazujeme těleso s momentem setrvačnosti J_2 (při otáčkách ω_2) myšleným tělesem s momentem setrvačnosti $J_{2,1}$ k jehož roztočení na úhlovou rychlost ω_1 je potřeba stejné energie jako k roztočení J_2 na úhlovou rychlost ω_2 (podmínka rovnosti energií): $W_{2,1} = \frac{1}{2} \cdot J_{2,1} \cdot \omega_1^2 = \frac{1}{2} \cdot J_2 \cdot \omega_2^2 \Rightarrow J_{2,1} = J_2 \cdot \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 = J_2 \cdot \left(\frac{1}{i}\right)^2$, kde i je převodový poměr převodovky ($i = \frac{\omega_1}{\omega_2}$).

Přepočet točivého momentu při různých otáčkách

Obdobně jako u přepočtu momentu setrvačnosti platí, že musíme do pohybových stavů dosazovat momenty vztažené k otáčkám motoru. Musíme tedy nahradit točivý moment tělesa M_2 (při otáčkách ω_2) myšleným momentem $M_{2,1}$. K jeho roztočení na úhlovou rychlost ω_1 je potřeba stejného výkonu jako k roztočení M_2 na úhlovou rychlost ω_2 (podmínka rovnosti výkonu): $P_{2,1} = M_{2,1} \cdot \omega_1 = M_2 \cdot \omega_2 \Rightarrow M_{2,1} = M_2 \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} = M_2 \cdot \frac{1}{i}$.

Přepočet hmotnosti přímočaře se pohybujícího se tělesa na moment setrvačnosti

Posouvá-li se některá část soustavy přímočaře, pak je-li poháněna točivým motorem, musíme její pohyb přepočítat na pohyb otáčivý. Při přepočtu hmotnosti tělesa na moment setrvačnosti vycházíme z podmínky rovnosti energie (práce), tedy práce potřebné pro přivedení tělesa o hmotnosti m z klidu do přímočarého pohybu s rychlostí v . Je dána vztahem: $W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$. Práce potřebná pro přivedení tělesa o momentu setrvačnosti J z klidu do otáčivého pohybu s úhlovou rychlostí ω je dána vztahem: $W = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$. Dáme-li tyto rovnice do rovnosti, dostaneme vztah pro přepočtený moment setrvačnosti $J_{př}$: $\frac{1}{2} \cdot J_{př} \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \Rightarrow J_{př} = m \cdot \left(\frac{v}{\omega}\right)^2$.

Přepočet síly přímočarého pohybu na točivý moment

Pro přepočet síly F působící na těleso pohybující se přímočaře na točivý moment $M_{př}$ vycházíme z podmínky rovnosti výkonů: $P = F \cdot v = M_{př} \cdot \omega \Rightarrow M_{př} = F \cdot \frac{v}{\omega}$.



ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

Příklad 2.1.1.1: Vypočítejte výkon motoru potřebný pro pohon výtahu, je-li dáno: moment setrvačnosti motoru $J_m = 1,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; úhlová rychlost motoru $\omega_m = 4,14 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; moment

setrvačnosti hnacího kotouče

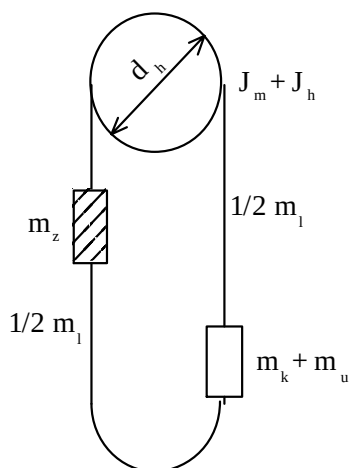
$J_{hk} = 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; dopravní rychlost kabiny $v = 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; hmotnost

kabiny $m_k = 600 \text{ kg}$; dovolené zatížení výtahu (užitečná

hmotnost) $m_u = 500 \text{ kg}$; celková hmotnost lana

$m_l = 140 \text{ kg}$; hmotnost vyvažovacího závaží $m_z = 825 \text{ kg}$. Dále

vypočítejte celkový moment setrvačnosti a točivý moment motoru.



Řešení:

Celkový moment setrvačnosti je dán součtem momentu

setrvačnosti rotujících částí a přepočteného momentu setrvačnosti přímočaré se pohybujících částí: $J_C = J_{rot} + J_{př}$

$$J_{rot} = J_m + J_{hk} = 1,5 + 2 = 3,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{př} = m_J \cdot \left(\frac{v}{\omega_m} \right)^2 = 2065 \cdot \left(\frac{1,5}{4,14} \right)^2 = 271,08 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$m_J = m_k + m_u + m_z + m_l = 600 + 500 + 825 + 140 = 2065 \text{ kg}$$

$$J_C = J_{rot} + J_{př} = 3,5 + 271,08 = \underline{274,58 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}$$

$$M_{př} = G \cdot \frac{v}{\omega_m} = m_M \cdot g \cdot \frac{v}{\omega_m} = 275 \cdot 9,81 \cdot \frac{1,5}{4,14} = \underline{977,45 \text{ Nm}}$$

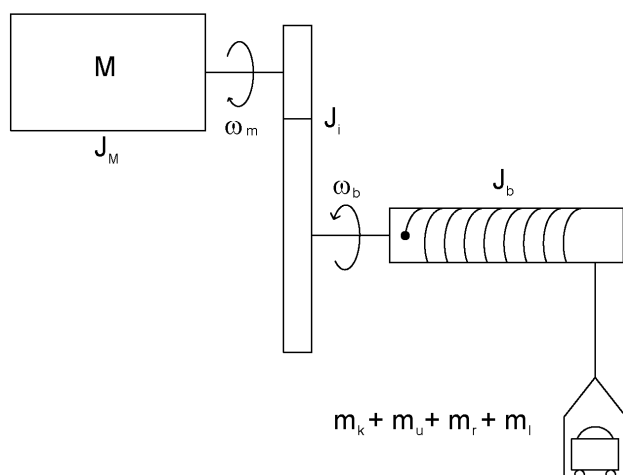
Hmotnost pro výpočet momentu (m_M) volíme jako těžší ze dvou krajních variant. První varianta představuje pohyb plné kabiny směrem vzhůru, druhá varianta představuje pohyb prázdné kabiny směrem dolů (pohyb závaží směrem vzhůru).

$$m_{M_1} = m_k + m_u + \frac{1}{2} m_l - \frac{1}{2} m_l - m_z = 600 + 500 + 70 - 70 - 825 = 275 \text{ kg}$$

$$m_{M_2} = m_z + \frac{1}{2} m_l - \frac{1}{2} m_l - m_k = 825 + 70 - 70 - 600 = 225 \text{ kg}$$

$$P_z = M_{př} \cdot \omega_m = 977,45 \cdot 4,14 = \underline{4046,64 \text{ W}} \Rightarrow \text{minimální výkon motoru } \underline{P_m = 4,1 \text{ kW}}$$

Příklad 2.1.1.2: Vypočítejte výkon motoru potřebný pro pohon jeřábu, je-li dáno: moment setrvačnosti motoru $J_m = 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; otáčky motoru jsou $n = 720 \text{ min}^{-1}$; moment setrvačnosti



převodovky $J_i = 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; převodový poměr $i = 20$; moment setrvačnosti navíjecího bubnu $J_b = 2,5 \text{ t} \cdot \text{m}^2$; rychlost pohybu kabiny $v_k = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; hmotnost kabiny $m_k = 2 \text{ t}$; dovolené zatížení jeřábu (užitečná hmotnost) $m_u = 2 \text{ t}$; hmotnost rezervy $m_r = 2,1 \text{ t}$ hmotnost jednoho metru lana $m_{lml} = 1,71 \text{ kg}$; délka lana $l = 460 \text{ m}$. Dále vypočítejte celkový moment setrvačnosti a točivý moment motoru.

$$J_C = J_{rot} + J_{př}$$

$$J_{rot} = J_m + J_i + J_{2,1} = 100 + 40 + 6,25 = 146,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{2,1} = J_b \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega_m} \right)^2 = J_b \cdot \left(\frac{1}{i} \right)^2 = 2500 \cdot \left(\frac{1}{20} \right)^2 = 6,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{pr} = m_J \cdot \left(\frac{v_k}{\omega_m} \right)^2 = 6886,6 \cdot \left(\frac{6}{75,4} \right)^2 = 43,61 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$m_J = m_k + m_u + m_r + m_l = 2000 + 2000 + 2100 + 786,6 = 6886,6 \text{ kg}$$

$$m_l = m_{lml} \cdot l = 1,71 \cdot 460 = 786,6 \text{ kg}$$

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 720}{60} = 75,4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_C = 146,25 + 43,61 = \underline{\underline{189,86 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}}$$

$$M_{pr} = G \cdot \frac{v}{\omega_m} = m \cdot g \cdot \frac{v}{\omega_m} = 6886,6 \cdot 9,81 \cdot \frac{6}{75,4} = 5375,93 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$P_m = M_{pr} \cdot \omega_m = 5375,93 \cdot 75,4 = \underline{\underline{405345,122 \text{ W} = 0,405 \text{ MW}}} \Rightarrow \text{minimální výkon motoru}$$

$$\underline{\underline{P_m = 0,41 \text{ MW}}}$$



SHRNUTÍ POJMŮ

Přímočarý pohyb, otáčivý pohyb, moment setrvačnosti, poloměr setrvačnosti, moment síly, klidový moment, záběrný moment.



OTÁZKY

Definujte moment setrvačnosti a popište postupy při jeho zjišťování.

Definujte moment síly, klidový moment a záběrný moment.



PRAKTICKÉ ÚLOHY

Vypočtete výkon motoru potřebný pro pohon výtahu, je-li dáno: moment setrvačnosti motoru $J_m = 1,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; otáčky motoru $n_m = 382 \text{ min}^{-1}$; moment setrvačnosti převodovky $J_i = 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; převodový poměr $i = 10$; moment setrvačnosti hnacího kotouče $J_{hk} = 3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; dopravní rychlost kabiny $v = 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; hmotnost kabiny $m_k = 400 \text{ kg}$; dovolené zatížení výtahu (užitečná hmotnost) $m_u = 500 \text{ kg}$; celková hmotnost lana $m_l = 120 \text{ kg}$; hmotnost vyvažovacího závaží $m_z = 800 \text{ kg}$. Dále vypočtete celkový moment setrvačnosti a točivý moment motoru.

2.1.2. Pohybové stavy



ČAS KE STUDIU

45 minut.



CÍL

Pochopit pohybové stavy a jejich obecné matematické definice.



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Rozběh = změna pohybového stavu z klidu do pohybu (otáčivého nebo přímočarého).

Zrychlování = zvyšování rychlosti pohybu (otáčivého nebo přímočarého).

Chod ustálenou rychlostí = pohyb při stálé (úhlové) rychlosti.

Stacionární chod = chod ustálenou rychlostí (moment hnací je stejný jako moment zatěžovací)

Zpomalování = snižování rychlosti pohybu (otáčivého nebo přímočarého).

Zastavení = změna pohybového stavu z pohybu do klidu (otáčivého nebo přímočarého).

Doběh = zpomalování jen vlivem tření po odpojení od zdroje elektrické energie.

Klidový stav = stav kdy se pracovní mechanismus ani motor nepohybují.



VÝKLAD

Každá elementární změna úhlové rychlosti $d\omega$ vede k elementární změně kinetické energie pohonu dW_d (soustavy motor - poháněný pracovní mechanismus). Tato změna dle zákona o zachování energie je výsledkem rozdílu elementární energie všech hnacích sil dW a elementární energie všech sil odporu pracovního poháněného mechanismu dW_{pm} :

$$dW_d = dW - dW_{pm}.$$

Uvažujeme-li tyto změny za element času dt , obdržíme pohybovou rovnici výkonové rovnováhy: $\frac{dW_d}{dt} = \frac{dW}{dt} - \frac{dW_{pm}}{dt}$ neboli: $P_d = P - P_{pm}$ a s uvažováním, že dynamický výkon

soustavy P_d charakterizuje změnu kinetické energie $P_d = \frac{dW_d}{dt} = \frac{d(\frac{1}{2}J\omega^2)}{dt} = J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt}$, pak z těchto vztahů můžeme odvodit základní pohybovou rovnici pro konstantní moment setrvačnosti: $P_d = J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = P - P_{pm} \Rightarrow J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{P}{\omega} - \frac{P_{pm}}{\omega} \Rightarrow J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_{pm}$

Rozběh a zrychlování

Rozběh je změna stavu z klidu do pohybu (platí to pro pohyb otáčivý i přímočarý – točivé resp. lineární pohony). Zrychlování je definováno jako zvyšování rychlosti pohybu (opět to platí pro otáčivé i lineární pohony).

Hnací moment je při rozběhu a zrychlování vždy větší než moment zátěžný (při rozběhu je záběrný moment motoru větší než klidový moment poháněného pracovního mechanismu, tedy $M_z > M_{kl}$): $M_h = M_{pm} + M_a$, kde M_h je moment hnací (motoru), M_{pm} je moment zátěžný (pracovního mechanismu) a M_a je moment akcelerační (zrychlovací)

$$M_a = J \cdot \varepsilon = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_h - M_{pm}.$$

Chod ustálenou rychlostí

Hnací moment je stejně velký jako zátěžný (celé soustrojí se otáčí jmenovitými otáčkami).

$M_h = M_{pm}$ (pohon pracuje v ustáleném stavu – průsečíku otáčkové charakteristiky motoru a pracovního mechanismu). Tento stav také nazýváme stacionární chod.

Zpomalování a zastavení

Zpomalování je snižování rychlosti pohybu (opět platí pro otáčivé i lineární pohony).

Zastavení je změna stavu z pohybu do klidu.

Zátěžný moment pracovního mechanismu je větší než moment hnací motoru (při zastavení zatěžovací zařízení brzdí motor na nižší otáčky, až jej úplně zastaví). Rozlišujeme tři druhy zastavení:

- Doběh - přeruší se dodávka energie k motoru ($M_h = 0$), soustrojí se nebrzdí a zastaví se jen vlivem tření. Celý zátěžný moment se stává momentem zpomalovacím: $M_{az} = M_p$.
- Zvolněné zastavení - dodávka energie se postupně snižuje a zpomalovací moment je dán rozdílem zátěžného a hnacího momentu: $M_{az} = M_p - M_h$.
- Zrychlené zastavení - hnací moment změnil svůj smysl a stává se momentem brzdícím (M_b). Zpomalovací moment je pak dán součtem tohoto brzdícího momentu a momentu zátěžného: $M_{az} = M_p + M_b$.

Klidový stav

Pracovní mechanismus ani motor se nepohybují. Moment pracovního mechanismu v klidovém stavu nazýváme klidový moment M_{kl} . Ten je dán gravitační silou všech pohyblivých částí pracovního mechanismu a ramenem páky, přes kterou budeme mechanismem pohybovat $M_{kl} = G \cdot r = m \cdot g \cdot r$.



SHRNUTÍ POJMŮ

Rozběh, zrychlování, chod ustálenou rychlostí, stacionární chod, zpomalování, zastavení, doběh, klidový stav, klidový moment.



OTÁZKY

Definujte rozběh a zrychlování (včetně matematického zápisu).

Popište způsoby zastavení.

Definujte zpomalování (včetně matematického zápisu).

2.2. Definice elektrického pohonu



ČAS KE STUDIU

45 minut.



CÍL

Pochopit definici elektrického pohonu a načrtnout jeho blokové schéma.



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

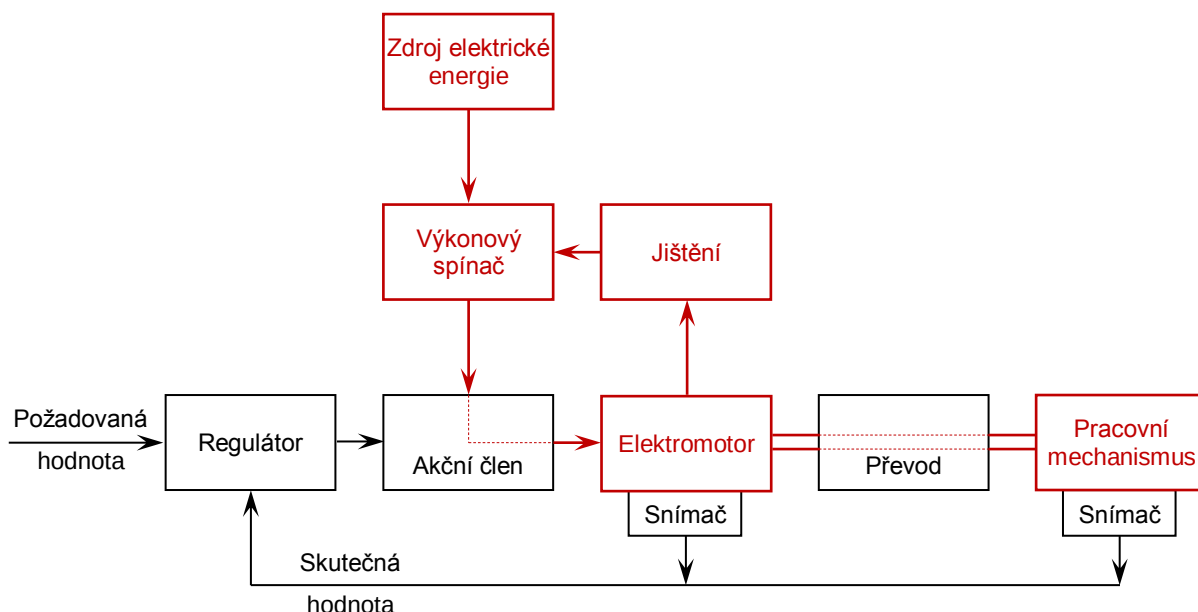
Elektrický pohon = elektromechanická vazba mezi motorem (točivým nebo lineárním) a pracovním mechanismem.

Pracovní mechanismus = zařízení, které je poháněno motorem a které proti tomuto motoru vytváří odpor.



VÝKLAD

Pod pojmem elektrický pohon rozumíme soubor elektromechanických vazeb a vztahů mezi pracovním mechanismem a elektromechanickou soustavou. Jedná-li se o točivý pohon, pak na hřídeli motoru se jeho hnací síla projevuje jako tzv. točivý hnací moment a odpor proti otáčení hřídele se projevuje jako tzv. točivý zátěžný moment (moment pracovního mechanismu).



Základní části elektrického pohonu (v obrázku jsou označeny červeně) jsou:

Elektromotor = hnací jednotka (točivý nebo lineární asynchronní, synchronní nebo stejnosměrný motor)

Pracovní mechanismus = poháněná část.

Výkonový spínač = přímý nebo dálkový spínací prvek (stiskací vypínač, sporákový vypínač, stykač, ...).

Jištění = jistící prvky (jistič – může sloužit i jako vypínač, pojistka, tepelná ochrana, ...).

Zdroj elektrické energie = stejnosměrný, střídavý jedno nebo třífázový.

Další časté části elektrických pohonů jsou:

Převod = zajišťuje spojení motoru a pracovního mechanismu (převodovka, řemenovka, spojka, ...)

Regulátor = zajišťuje regulaci pohonu – řízení otáček – nastavuje stav akčního členu (frekvenci, napětí, odpor, ...).

Akční člen = zajišťuje vlastní regulaci pohonu (frekvenční měnič, pulzní měnič, proměnný rezistor, ...).

Snímač = snímá stav pohonu – skutečnou hodnotu (otáčkoměr, snímač polohy)

Dá se říci, že v současné době je pro správný návrh elektrického pohonu zapotřebí mít ucelený přehled z oblasti elektrických strojů a přístrojů, výkonové elektroniky a zejména s nástupem moderních regulovaných pohonů jde i o obory z oblastí řídicí, automatizační a výpočetní techniky.



SHRNUTÍ POJMŮ

Elektrický pohon, pracovní mechanismus



OTÁZKY

Načrtněte blokové schéma elektrického pohonu a popište jeho jednotlivé prvky.

2.3. Výhody a nevýhody elektrických pohonů



ČAS KE STUDIU

45 minut.



CÍL

Seznámit s výhodami a nevýhodami elektrického pohonu vůči pohonům jiným a porovnat pohony stejnosměrné vůči střídavým.



VÝKLAD

Při rozhodování o použití elektrického pohonu místo pohonu jiného (se spalovacím motorem, mechanického, pneumatického nebo hydraulického) mohou rozhodnout jeho výhody a nevýhody vůči ostatním druhům pohonů.

2.3.1. Výhody elektropohonu

- dá se vyrobit prakticky pro jakýkoliv výkon (elektrické hodinky - mW, čerpadlo přečerpací elektrárny – 0,1 GW),
- můžeme vyrobit elektromotory s rozsahem momentů od mNm (hodinky) po MNm (válcovací stolice), s rozsahem otáček od jednotek otáček za minutu (cementové mlýny - 15 ot.min⁻¹) po tisíce otáček za minutu (vrtačky - 4000 ot.min⁻¹),
- není při své práci zdrojem splodin,
- má nízké ztráty naprázdno, vysokou účinnost a vysokou krátkodobou přetížitelnost,
- má dlouhou životnost (20 a více let),
- má nízkou úroveň hluku,
- je prakticky okamžitě provozuschopný, má jednoduchou obsluhu i údržbu,
- má snadnou řiditelnost a ovladatelnost; charakteristiky pohonu lze snadno přizpůsobit různým speciálním požadavkům,
- může pracovat ve všech čtyřech kvadrantech n-M diagramu (může být výhodně dobrzděn rekuperací),
- je jednoduše konstrukčně přizpůsobitelný zátěži (přírubové provedení, uchycení letmo).

2.3.2. Nevýhody elektropohonu

- je závislý na okamžité dodávce elektrické energie ze sítě. (Zálohování znamená zvýšení nákladů a hmotnosti),
- má nízký ukazatel výkon/hmotnost v porovnání s hydraulickými pohony (příčinou je především úměra výkonu s množstvím magnetického obvodu a omezení plynoucího z dovoleného oteplení izolace a tedy nutnosti účinného chlazení).

2.3.3. Srovnání stejnosměrných a střídavých pohonů (výhody a nevýhody)

Rozhodneme-li se pro použití elektrického pohonu, zbývá ještě určit, který z typů motorů použijeme. Základní trend vývoje velkých pohonů (trakce, obráběcí stroje, ...) je přechod od pohonů se stejnosměrnými motory k pohonům s motory střídavými. Hlavním zástupcem střídavých pohonů jsou asynchronní motory s kotvou nakrátko (popř. s dvojitou či vírovou klecí) – motory synchronní se moc nevyužívají pro jejich malou přetížitelnost. Univerzální komutátorové motory mohou být provozovány jak se stejnosměrným, tak i střídavým napájením, proto jejich výhody i nevýhody jsou na obou stranách a nejsou v tomto srovnání zahrnuty.

Mezi hlavní výhody střídavých (asynchronních) pohonů patří:

- menší rozměry, tedy menší zastavěný prostor, nižší hmotnost a výrobní cena motoru,
- menší moment setrvačnosti a tudíž lepší dynamika při stejném momentu motoru,
- nižší nároky na údržbu stroje,
- vyšší životnost,
- vyšší spolehlivost,
- velká proudová i momentová přetížitelnost,
- možnost konstruovat stroje s velkým výkonem (až stovky MW),
- možnost použití v agresivních prostředích a v prostředích s nebezpečím výbuchu.

Hlavní dosavadní nevýhoda střídavých pohonů – složité a drahé řízení – s rozvojem výkonové elektroniky a zejména s prudkým rozvojem výkonných mikroprocesorových systémů (v současné době zejména s použitím signálových procesorů), který má za důsledek také snižování jejich cen, v současné době prakticky ustupuje do pozadí.

Největší výhodou stejnosměrných pohonů je možnost jejich napájení z baterií nebo akumulátorů, i když i tato výhoda se ztrácí při použití střídače s regulací výstupní frekvence.



OTÁZKY

Vyjmenujte výhody a nevýhody elektrických pohonů.

Které motory se dnes používají v elektrických pohonech nejčastěji a proč?

2.4. Druhy poháněných pracovních mechanismů



ČAS KE STUDIU

45 minut.



CÍL

Seznámit se s mechanickými charakteristikami pracovních mechanismů, naučit se je načrtnout a popsat.



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Mechanická charakteristika = závislost otáček a momentu pracovního mechanismu $M = f(\omega)^x$.

Jeřábová charakteristika = zatěžovací moment pracovního mechanismu je konstantní ($x = 0$).

Kalandrová charakteristika = zatěžovací moment pracovního mechanismu je s rostoucími otáčkami rostoucí přímo úměrně ($x = 1$).

Ventilátorová charakteristika = zatěžovací moment pracovního mechanismu je s rostoucími otáčkami parabolicky rostoucí ($x = 2$).

Navíječková charakteristika = zatěžovací moment pracovního mechanismu s rostoucími otáčkami nepřímou úměrně klesá ($x = -1$).



VÝKLAD

Jak již bylo řečeno elektrický pohon je tvořen na jedné straně elektrickým motorem, na straně druhé pak daným pracovním mechanismem. Každý takovýto pracovní mechanismus je v zásadě charakterizován třemi následujícími veličinami:

- úhlovou rychlostí ω_{pm} resp. otáčkami n_{pm} (s jedním nebo dvěma směry otáčení),
- momentem pracovního mechanismu M_{pm} ,
- momentem setrvačnosti pracovního mechanismu J_{pm} .

Všechny tyto veličiny jsou vzhledem k sobě vzájemně vázány a dále ještě závisí na čase, případně na jiných veličinách.

Pro posouzení pohonu je nejdůležitější znát zatěžovací mechanickou charakteristiku pracovního mechanismu, abychom ji mohli porovnat s otáčkovou charakteristikou motoru.

Mechanická charakteristika pracovního mechanismu je závislost zatěžovacího momentu a úhlové rychlosti (otáček) a je dána empirickým vztahem:

$$M_p = M_{kl} + (M_{pm_n} - M_{kl}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^x.$$

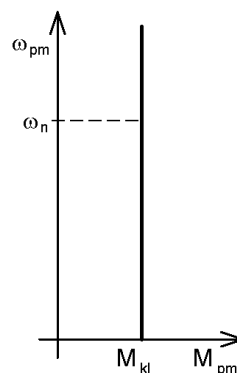
Podle tvaru této charakteristiky můžeme pracovní mechanismy také rozdělovat. V tomto textu uvádím jen čtyři základní charakteristiky vycházející z hodnoty, kterou nabývá mocnitel x . Jedná se o charakteristiku jeřábovou ($x = 0$), kalandrovou ($x = 1$), ventilátorovou ($x = 2$) a navíječkovou ($x = -1$).

2.4.1. Jeřábová charakteristika pracovních mechanismů ($x = 0$)

Tvar této charakteristiky je popsán rovnicí, pokud za mocnitel x dosadíme nulu:

$$M_p = M_{kl} + (M_{pm_n} - M_{kl}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^0 = M_{kl} + (M_{pm_n} - M_{kl}) \cdot 1 = M_{pm_n}$$

Po úpravě vidíme, že zatěžovací moment je konstantní. Matematicky tuto rovnici můžeme vyjádřit jako rovnici $x = \text{konst.}$, což je rovnice přímky rovnoběžné s osou y (ω). Tato charakteristika se nazývá **Jeřábová** a setkáme se s ní u jeřábů, výtahů, vrátků, těžních strojů, lanovek, dopravníků či drtiček.

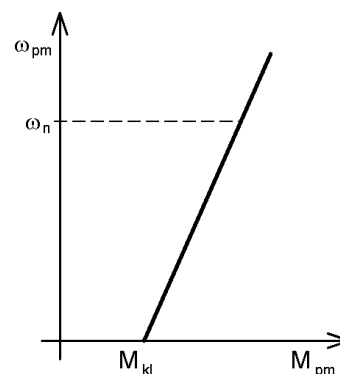


2.4.2. Kalandrová charakteristika pracovních mechanismů ($x = 1$)

Tvar této charakteristiky je popsán rovnicí, pokud za mocnitel x dosadíme jedničku:

$$\begin{aligned} M_p &= M_{kl} + (M_{pm_n} - M_{kl}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^1 = M_{kl} + (M_{pm_n} - M_{kl}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) = \\ &= M_{kl} + \frac{(M_{pm_n} - M_{kl})}{\omega_n} \cdot \omega \end{aligned}$$

Úpravou dostaneme rovnici přímé úměry mezi momentem a úhlovou rychlostí. Matematicky: $x = \text{konst.}_1 + \text{konst.}_2 \cdot y$, což je rovnice přímky, která protíná osu x (M) v konst._1 (M_{kl}) a svírá s ní úhel, jehož tangenta je rovna $\text{konst.}_2 \left(\frac{M_{pm_n} - M_{kl}}{\omega_n}\right)$. Tato charakteristika se nazývá **Kalandrová** a vykazují ji např. textilní stroje, kalandry, nebo míchačky.



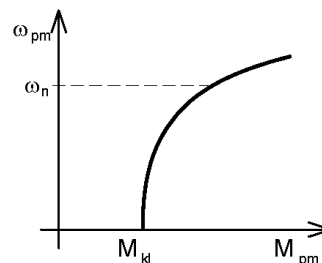
2.4.3. Ventilátorová charakteristika pracovních mechanismů ($x = 2$)

Tvar této charakteristiky je popsán rovnicí, pokud za mocnitel x dosadíme dvojku:

$$M_p = M_{kl} + (M_{pm_n} - M_{kl}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 = M_{kl} + \frac{(M_{pm_n} - M_{kl})}{\omega_n^2} \cdot \omega^2.$$

Po úpravě se jedná o závislost momentu na druhé mocnině úhlové rychlosti. Matematicky můžeme obecně psát:

$x = \text{konst.}_1 + \text{konst.}_2 \cdot y^2$, což je rovnice paraboly, která protíná osu x (M) v konst._1 (M_{kl}) a je podél osy x . Tato charakteristika se nazývá **Ventilátorová** - ventilátory, odstředivá čerpadla, kompresory, nebo vrtule.



2.4.1. Navíječková charakteristika pracovních mechanismů ($x = -1$)

Tvar této charakteristiky je popsán rovnicí, pokud za mocnitel x dosadíme minus jedničku:

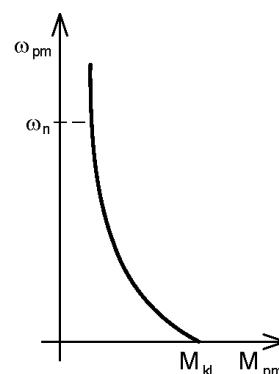
$$M_p = M_{kl} + (M_{pm_n} - M_{kl}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^{-1} = M_{kl} + (M_{pm_n} - M_{kl}) \cdot \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right) = M_{kl} + \frac{(M_{pm_n} - M_{kl}) \cdot \omega_n}{\omega}$$

Po úpravě je zřejmé, že se jedná o nepřímo úměrnou závislost momentu na úhlové rychlosti (ω je ve jmenovateli zlomku). Matematicky:

$$x = \text{konst.}_1 + \frac{\text{konst.}_2}{y}, \text{ což je rovnice hyperboly, která protíná osu } x \text{ (} M \text{)}$$

v konst._1 (M_{kl}) a blíží se ose y (ω) – osa y (ω) je jednou asymptotou, druhou asymptotou je rovnoběžka s osou x (M) posunutá pod tuto osu

o $\text{konst.}_2 \cdot ((M_{pm_n} - M_{kl}) \cdot \omega_n)$. Tato charakteristika se nazývá **Navíječková** a vykazují ji soustruhy, frézy, vrtačky a navíječky.



SHRNUTÍ POJMŮ

Mechanická charakteristika, jeřábová charakteristika, kalandrová charakteristika, ventilátorová charakteristika, navíječková charakteristika.



OTÁZKY

Načrtněte a popište charakteristiky pracovních mechanismů (jeřábovou, kalandrovou, ventilátorovou a navíječkovou).

2.5. Statická stabilita pohonů



ČAS KE STUDIU

45 minut.



CÍL

Seznámit se s posuzováním pohonu porovnáním otáčkových charakteristik motorů s mechanickými charakteristikami pracovních mechanismů, naučit se rozpoznat staticky stabilní a nestabilní pracovní bod.



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Statická stabilita = posouzení schopnosti pohonu zůstat ve stacionárním chodu i při změnách otáček.

Stacionární bod = průsečík otáčkové charakteristiky motoru s mechanickou charakteristikou pracovního mechanismu.

Staticky stabilní stav = schopnost pohonu vrátit se do stacionárního bodu i při změně otáček (snížení i zvýšení).

Staticky nestabilní stav = neschopnost pohonu vrátit se do stacionárního bodu při změně otáček.



VÝKLAD

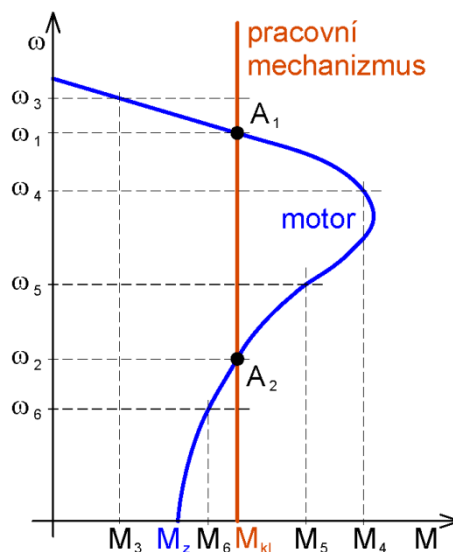
Chod ustálenou rychlostí nazýváme též stacionárním chodem a platí pro něj rovnost hnacího a zátěžného momentu ($M_h = M_{pm}$). Jedná se tedy, o průsečík otáčkové charakteristiky hnacího motoru a zatěžovací charakteristiky pracovního mechanismu, tzv. stacionární bod. Z průběhu obou charakteristik se pak dá usoudit, zda je pohon v tomto stacionárním bodu stabilní či nikoliv. O staticky stabilním stavu mluvíme tehdy, udrží-li si tento stav (vrátí se do něj) i při změnách otáček, a pokud si tento stav neudrží, mluvíme o pohonu staticky nestabilním.

Pro vysvětlení statické stability či nestability pohonu jsem vybral porovnání asynchronního motoru a pracovního mechanismu s jeřábovou charakteristikou (zátěžný moment je konstantní $= M_{kl}$). V obrázku se obě charakteristiky protínají ve dvou bodech A_1 a A_2 při otáčkách ω_1 resp. ω_2 (klidový moment pracovního mechanismu M_{kl} je větší než záběrný moment motoru

M_z , proto by se musel motor nejdříve roztočit bez zátěže a teprve po roztočení by se přes spojku připojil pracovní mechanismus – nejdříve po dosažení otáček ω_2).

Stacionární bod A_1 : Soustava se otáčí úhlovou rychlostí ω_1 , dojde-li k náhlému zvýšení úhlové rychlosti, soustava přejde do oblasti nad ω_1 (např. na ω_3). V této oblasti je zatěžovací moment pracovního mechanismu (M_{kl}) větší než hnací moment motoru (M_3) a soustava bude brzděna zpět na úhlovou rychlost ω_1 . Dojde-li ke snížení úhlové rychlosti pod ω_1 (např. na ω_4) bude hnací moment motoru (M_4) větší než zatěžovací moment pracovního mechanismu (M_{kl})

a soustava se roztočí zpět na úhlovou rychlost ω_1 . Jelikož se soustava při zvýšení i při snížení úhlové rychlosti (otáček) ustálí zpět ve stacionárním bodu A_1 (při úhlové rychlosti ω_1), říkáme, že stacionární bod A_1 je bodem staticky stabilním a soustava pracující v tomto bodě je staticky stabilní.



Stacionární bod A_2 : Soustava se otáčí úhlovou rychlostí ω_2 , dojde-li ke zvýšení úhlové rychlosti nad ω_2 (např. na ω_5), bude hnací moment motoru (M_5) větší než zatěžovací moment pracovního mechanismu a soustava bude roztáčena dál (až na úhlovou rychlost ω_1 , kdy se ustálí ve stacionárním bodě A_1). Dojde-li ke snížení úhlové rychlosti pod ω_2 (např. na ω_6), bude zatěžovací moment pracovního mechanismu (M_{kl}) větší než hnací moment motoru (M_6) a soustava bude zpomalovat, až se zastaví (motor se může přehřát a zničit – musí zareagovat ochrana). Jelikož se soustava při zvýšení ani při snížení úhlové rychlosti neustálí zpět ve stacionárním bodu A_2 , říkáme, že stacionární bod A_2 je bodem staticky nestabilním a soustava pracující v tomto bodě je staticky nestabilní.



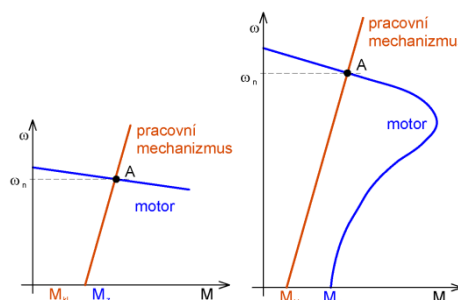
SHRNUTÍ POJMŮ

Statická stabilita, stacionární bod, staticky stabilní stav, staticky nestabilní stav.



OTÁZKY

Na obrázcích vysvětlíte pochody při zvýšení i snížení otáček (úhlové rychlosti) oproti otáčkám stacionárního bodu (ω_n) a rozhodnete, zda je tento bod (A) bodem staticky stabilním či nestabilním.



2.6. Druhy zatížení



ČAS KE STUDIU

45 minut.



CÍL

Seznámit se s jednoduššími druhy zatížení (trvalé neproměnné i proměnné, krátkodobé a přerušované zatížení).



POJMY K ZAPAMATOVÁNÍ

Trvalé zatížení = provoz při stálém neproměnném nebo stálém proměnném zatížení trvajícím tak dlouho, že se motor oteplí na hodnotu ustáleného oteplení.

Trvalé neproměnné zatížení = trvalé zatížení konstantní zátěží.

Trvalé proměnné zatížení = trvalé zatížení, mění-li se zatížení v určitých cyklech zátěží.

Krátkodobé zatížení = provoz při neproměnném zatížení trvajícím natolik krátkou dobu, že se motor neoteplí na hodnotu ustáleného oteplení a poté vždy následuje období klidu natolik dlouhé, že motor ochladne až na teplotu okolí.

Přerušované zatížení = provoz složený z období zatížení a z období klidu, přičemž v obdobích zatížení motor nedosáhne ustáleného oteplení a v obdobích klidu se motor nestihne ochladit na teplotu okolí.



VÝKLAD

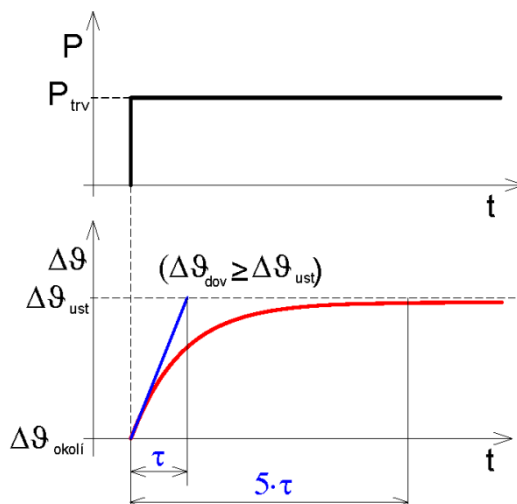
Zvláštnost návrhu elektrického pohonu spočívá také v tom, že elektrické motory mají velkou přetížitelnost a proto můžeme za určitých podmínek použít motor s menším výkonem než je zatěžovací výkon poháněného zařízení. Úkolem projektanta je zvolit pro dané poháněné zařízení vhodný motor, který bude právě plně využit.

Pro správnou volbu motoru se podle doby činnosti motoru a podle velikosti dodávaného výkonu rozlišují různé druhy zatížení (v tomto textu popisují jen tři základní druhy zatížení: trvalé, krátkodobé a přerušované).

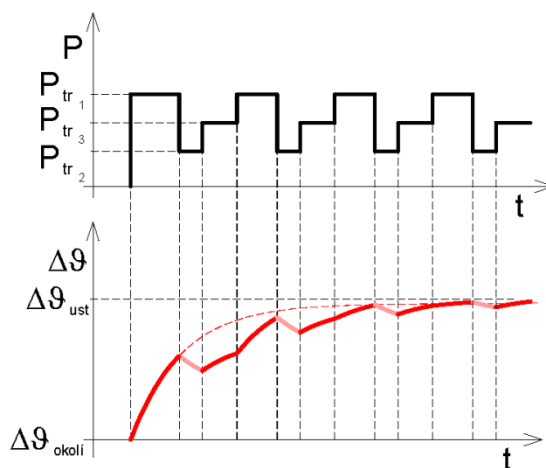
2.6.1. Trvalé zatížení

Je to provoz při stálém neproměnném nebo stálém proměnném zatížení, při kterém se motor oteplí na hodnotu ustáleného oteplení (veškeré ztráty v motoru se přeměňují na teplo).

Pod pojmem trvale neproměnné zatížení nalezneme zatížení motoru konstantní zátěží P_{tr} , které trvá tak dlouho, že se motor (exponenciálně) ohřeje na hodnotu ustáleného oteplení. Oteplení motoru je dáno vztahem: $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{ust} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$, kde $\Delta\vartheta_{ust}$ je hodnota ustáleného oteplení a τ je časová oteplovací konstanta motoru (10 min až 2 hod). Hodnota τ je v grafickém vyjádření dána jako vzdálenost mezi počátkem oteplovací charakteristiky a průsečíkem tečny (modrá) nakreslené v tomto počátku s hodnotou ustáleného oteplení. Hodnota $5 \cdot \tau$ pak představuje dobu, za kterou již motor dosáhne ustáleného oteplení (více jak 99 % - $3 \cdot \tau$ představuje 95 %, $4 \cdot \tau$ pak cca 98 %).

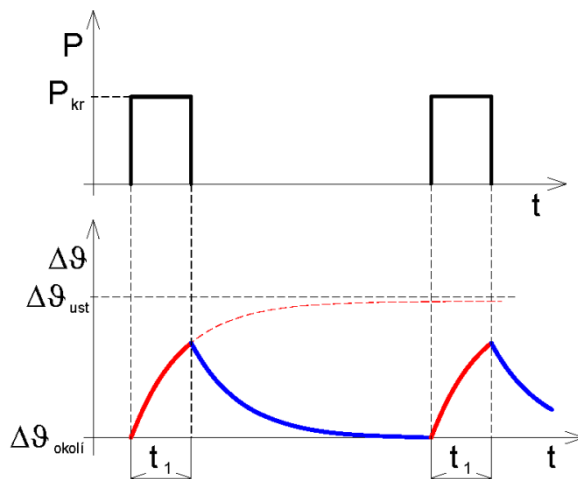


Trvale proměnné zatížení je složeno z cyklů, které se skládají z úseků s různým zatížením (P_{tr1} , P_{tr2} , P_{tr3}). Při trvale proměnném zatížení se podle hodnoty zatížení motor zahřívá rychleji či pomaleji nebo dokonce se mírně ochlazuje (při zmenšení zatížení), ale je v provozu tak dlouho, že teplota motoru postupně dosáhne ustáleného oteplení.



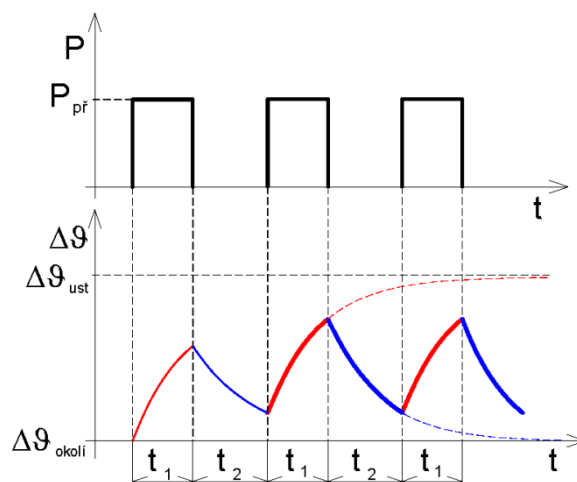
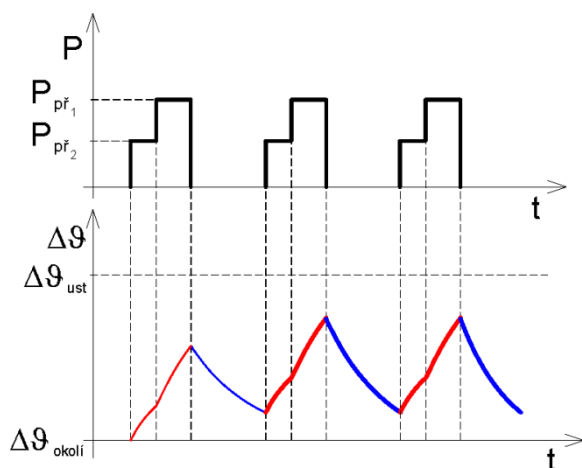
2.6.2. Krátkodobé zatížení

Je to provoz při neproměnném zatížení P_{kr} trvajícím po stanovenou dobu (t_1), která je natolik krátká, že se motor nestihne oteplít na hodnotu ustáleného oteplení a poté vždy následuje období klidu natolik dlouhé, že se motor ochladí až na teplotu okolí (teprve poté se může znovu zatížit).



2.6.3. Přerušované zatížení

Je to provoz složený z jednotlivých opakujících se cyklů, přičemž každý z cyklů se skládá z období zatížení a z období klidu. Tato období jsou však natolik krátká, že v obdobích zatížení se motor neoteplí na hodnotu ustáleného oteplení a v obdobích klidu se motor nestihne ochladit až na teplotu okolí (první oteplovací křivka respektuje ohřev z teploty okolí, v dalších cyklech už se



motor ohřívá a ochlazuje stejně).

Zatěžovací cykly nemusí být zatěžovány konstantně, ale mohou se skládat z různých zatížení. Při menším zatížení se motor zahřívá pomaleji, při větším rychleji.



SHRNUTÍ POJMŮ

Trvalé zatížení, trvalé zatížení proměnné a neproměnné, krátkodobé zatížení, přerušované zatížení.



OTÁZKY

Definujte trvalé proměnné zatížení, načrtněte příklad zatížení a oteplovací charakteristiku.

Definujte krátkodobé zatížení, načrtněte příklad zatížení a oteplovací charakteristiku.

Definujte přerušované zatížení, načrtněte příklad zatížení a oteplovací charakteristiku.

2.7. Volba velikosti motorů

Vlastní volba elektrického motoru pro daný pohon vychází z druhu zatížení a podle způsobu řízení otáček. Potřebný výkon motoru se počítá vždy tak, aby oteplení vzniklé ztrátami motoru nikdy nepřekročilo hodnotu dovoleného oteplení motoru respektive jeho izolace (při překročení dovolené teploty izolace o deset stupňů se sníží její životnost až o padesát procent) a zároveň tak, aby motor nebyl zbytečně velký.

2.7.1. Volba motoru pro trvalé zatížení



ČAS KE STUDIU

70 minut.



CÍL

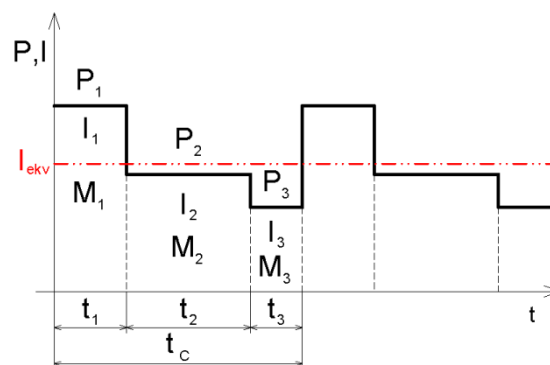
Seznámit se s postupem výpočtu potřebného výkonu motoru při trvalém neproměnném i proměnném zatížení.



VÝKLAD

Je-li motor zatížen **trvale neproměnným zatížením**, je výpočet velice jednoduchý, neboť výkon motoru musí být minimálně roven výkonu pracovního mechanismu ($P_m \geq P_{pm}$).

Při **trvale proměnném zatížení** musíme nejdříve toto zatížení přepočítat na tzv. ekvivalentní trvalé neproměnné zatížení a z něj pak určíme velikost potřebného minimálního výkonu motoru ($P_m \geq P_{p_{mekv}}$). Podmínkou přepočtu je, aby oteplení od vypočteného ekvivalentního zatížení bylo stejné jako oteplení od skutečného trvale proměnného zatížení (větší zatížení zahřívá více, menší méně).



V každém motoru vznikají ztráty přeměňující se na teplo, tyto ztráty jsou buď nezávislé na zatížení (značíme je ΔP_k), což jsou ztráty v železe (hysterezní a vířivými proudy) a ztráty třením nebo ztráty závislé na zatížení (ΔP_j), což jsou ztráty ve vinutí (Jouleovo teplo).

Ztráty při skutečném trvalém proměnném zatížení jsou v každém časovém úseku ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$) dány součtem ztrát závislých na zatížení a nezávislých na zatížení:

$$\Delta W = t_1 \cdot (\Delta P_k + \Delta P_{j_1}) + t_2 \cdot (\Delta P_k + \Delta P_{j_2}) + t_3 \cdot (\Delta P_k + \Delta P_{j_3}) + \dots + t_n \cdot (\Delta P_k + \Delta P_{j_n}),$$

jelikož ztráty závislé na zatížení představují Jouleovo teplo dané vztahem $Q = R \cdot I^2 \cdot t$, můžeme rovnici upravit na tvar:

$$\Delta W = t_1 \cdot \Delta P_k + t_1 \cdot R \cdot I_1^2 + t_2 \cdot \Delta P_k + t_2 \cdot R \cdot I_2^2 + t_3 \cdot \Delta P_k + t_3 \cdot R \cdot I_3^2 + \dots + t_n \cdot \Delta P_k + t_n \cdot R \cdot I_n^2,$$

vytkneme-li ΔP_k nebo R dostaneme:

$$\Delta W = \Delta P_k \cdot (t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n) + R \cdot (t_1 \cdot I_1^2 + t_2 \cdot I_2^2 + t_3 \cdot I_3^2 + \dots + t_n \cdot I_n^2),$$

tedy ztráty při skutečném trvalém proměnném zatížení vypočteme ze vztahu:

$$\Delta W = \Delta P_k \cdot t_c + R \cdot (t_1 \cdot I_1^2 + t_2 \cdot I_2^2 + t_3 \cdot I_3^2 + \dots + t_n \cdot I_n^2)$$

Ztráty při myšleném ekvivalentním neproměnném zatížení bychom vypočetli ze vztahu:

$$\Delta W = t_c \cdot (\Delta P_k + \Delta P_{j_{ekv}}) \text{ a po úpravě dostaneme: } \Delta W = t_c \cdot \Delta P_k + t_c \cdot R \cdot I_{ekv}^2$$

Jelikož chceme skutečné proměnné zatížení nahradit myšleným ekvivalentním zatížením, můžeme z podmínky rovnosti obou energetických ztrát vypočíst ekvivalentní proud:

$$\Delta W = t_c \cdot \Delta P_k + t_c \cdot R \cdot I_{ekv}^2 = \Delta P_k \cdot t_c + R \cdot (t_1 \cdot I_1^2 + t_2 \cdot I_2^2 + t_3 \cdot I_3^2 + \dots + t_n \cdot I_n^2)$$

$$t_c \cdot R \cdot I_{ekv}^2 = R \cdot (t_1 \cdot I_1^2 + t_2 \cdot I_2^2 + t_3 \cdot I_3^2 + \dots + t_n \cdot I_n^2)$$

$$I_{ekv}^2 = \frac{t_1 \cdot I_1^2 + t_2 \cdot I_2^2 + t_3 \cdot I_3^2 + \dots + t_n \cdot I_n^2}{t_c}$$

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{t_1 \cdot I_1^2 + t_2 \cdot I_2^2 + t_3 \cdot I_3^2 + \dots + t_n \cdot I_n^2}{t_c}}$$

Nemá-li být motor přetěžován, musí být jeho jmenovitý proud větší nebo minimálně roven vypočtenému ekvivalentnímu proudu.

Potřebný minimální výkon motoru se pak vypočte jako součin napětí a ekvivalentního proudu (při použití stejnosměrného motoru): $P_m = U \cdot I_{ekv}$, popř. napětí a činné složky ekvivalentního proudu (při použití střídavého motoru): $P_m = U \cdot I_{ekv} \cdot \cos \varphi$

Při návrhu pohonu často vycházíme ze zadaného zatížení vyjádřeného pomocí grafu zatěžovacích momentů, musíme proto při výpočtu výkonu motoru vycházet z přepočteného ekvivalentního momentu. A jelikož je točivý moment u stejnosměrných motorů s cizím buzením a derivačních a u asynchronních motorů úměrný proudu ($M \approx I$), počítáme jeho velikost stejným způsobem, jakým se počítá velikost ekvivalentního proudu (je-li zadáno zatížení proudové):

$$M_{ekv} = \sqrt{\frac{t_1 \cdot M_1^2 + t_2 \cdot M_2^2 + t_3 \cdot M_3^2 + \dots + t_n \cdot M_n^2}{t_c}}$$

Výkon motoru je pak dán součinem ekvivalentního momentu a otáček motoru: $P_m = M_{ekv} \cdot \omega_n$

Pokud se otáčky ss motorů řídí buzením, musíme do výpočtu ekvivalentního momentu místo jednotlivých momentů dosadit zvětšený moment: $M'_k = M_k \cdot \frac{\omega_k}{\omega_n}$.

U ss motorů sériových je moment úměrný druhé mocnině proudu ($M \approx I^2$), proto se vztah pro výpočet velikosti ekvivalentního momentu upraví na tvar:

$$M_{ekv} = \frac{t_1 \cdot M_1 + t_2 \cdot M_2 + t_3 \cdot M_3 + \dots + t_n \cdot M_n}{t_c}$$

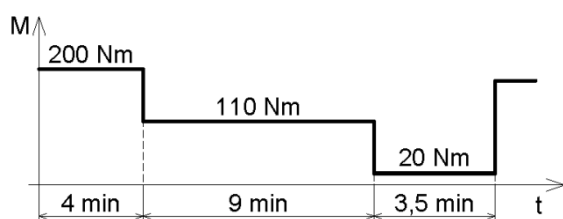
Výkon motoru je pak opět dán součinem ekvivalentního momentu a otáček (uhlové rychlosti) motoru:

$$P_m = M_{ekv} \cdot \omega_n.$$



ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

Příklad 2.7.1.1: Vypočítejte výkon stejnosměrného cize buzeného motoru pro pohon zařízení s trvalým proměnným cyklem dle obrázku, otáčky motoru jsou 500 min^{-1} . Řízení otáček je prováděno změnou napětí na rotoru.



Vypočteme ekvivalentní moment:

$$M_{ekv} = \sqrt{\frac{t_1 \cdot M_1^2 + t_2 \cdot M_2^2 + t_3 \cdot M_3^2}{t_c}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 200^2 + 9 \cdot 110^2 + 3,5 \cdot 20^2}{4 + 9 + 3,5}} \doteq 128 \text{ Nm}$$

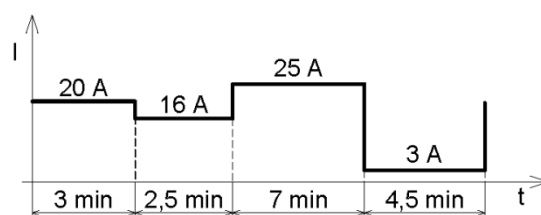
$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 500}{60} = 52,36 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$P_m = M_{ekv} \cdot \omega = 128 \cdot 52,36 = 6702,08 \text{ W} \Rightarrow \text{zvolili bychom motor s výkonem 7 kW.}$$

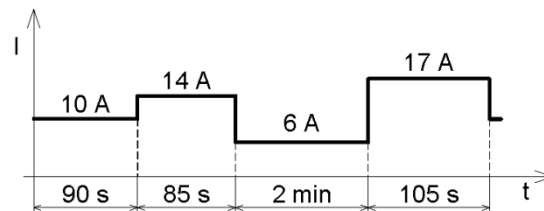


PRAKTICKÉ ÚLOHY

Úloha 2.7.1.1: Vypočítejte výkon stejnosměrného cize buzeného motoru pro pohon zařízení s trvalým proměnným cyklem dle obrázku, otáčky motoru jsou 750 min^{-1} . Řízení otáček je prováděno změnou napětí na rotoru.



Úloha 2.7.1.2: Vypočítejte výkon stejnosměrného cize buzeného motoru pro pohon zařízení s trvalým proměnným cyklem dle obrázku, motor je připojen ke zdroji napětí 120 V. Řízení otáček je prováděno změnou napětí na rotoru.



Úloha 2.7.1.3: Pro stejný trvale proměnný cyklus jako v úloze 2.8.1.2 vypočítejte výkon tentokrát stejnosměrného sériového motoru pro pohon zařízení, motor je připojen ke zdroji napětí 120 V. Řízení otáček je prováděno změnou napětí na rotoru.



OTÁZKY

Jaký je obecný postup při výpočtu výkonu motoru schopného pracovat v trvalém proměnném zatížení?

2.7.2. Volba motoru pro přerušované zatížení



ČAS KE STUDIU

20 minut.



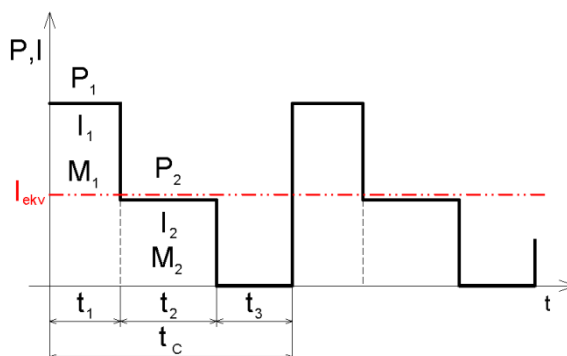
CÍL

Seznámit se s postupem výpočtu potřebného výkonu motoru při přerušovaném zatížení.



VÝKLAD

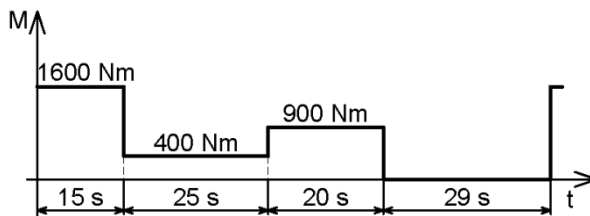
Pro přerušované zatížení je výpočet výkonu motoru úplně stejný jen do celkové doby musíme započítat i všechna období klidu (stejně je i odvození výpočtu). Při výpočtu tedy přepočteme skutečné přerušované zatížení na zatížení ekvivalentní a z něj pak vypočteme potřebný výkon motoru (pro druhy motorů platí stejná pravidla jako u trvalého proměnného zatížení).





ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

Příklad 2.7.2.1: Vypočítejte výkon stejnosměrného derivačního motoru pro pohon zařízení s cyklem dle obrázku, jmenovitá úhlová rychlost motoru je $6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. Řízení otáček je prováděno napětím.



Řešení:

Vypočteme ekvivalentní moment:

$$M_{\text{ekv}} = \sqrt{\frac{t_1 \cdot M_1^2 + t_2 \cdot M_2^2 + t_3 \cdot M_3^2}{t_c}} = \sqrt{\frac{15 \cdot 1600^2 + 25 \cdot 400^2 + 20 \cdot 900^2}{89}} = 811,435 \text{ N} \cdot \text{m}$$

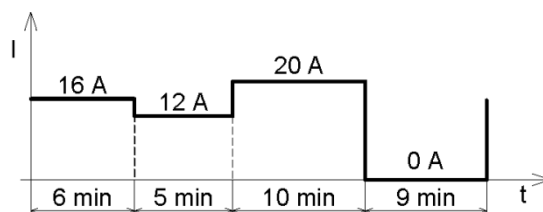
$$t_c = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 15 + 25 + 20 + 29 = 89 \text{ s}$$

$$P_m = M_{\text{ekv}} \cdot \omega = 811,435 \cdot 6 = 4868,61 \text{ W} \Rightarrow \text{zvolili bychom motor s výkonem 5 kW.}$$

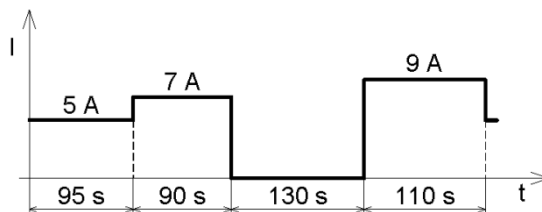


PRAKTICKÉ ÚLOHY

Úloha 2.7.2.1: Vypočítejte výkon stejnosměrného cize buzeného motoru pro pohon zařízení s přerušovaným zatížením dle obrázku, otáčky motoru jsou 750 min^{-1} . Řízení otáček je prováděno změnou napětí na rotoru.



Úloha 2.7.2.2: Vypočítejte výkon stejnosměrného cize buzeného motoru pro pohon zařízení s přerušovaným zatížením dle obrázku, motor je připojen ke zdroji napětí 80 V. Řízení otáček je prováděno změnou napětí na rotoru.



Úloha 2.7.2.3: Pro stejné přerušované zatížení jako v úloze 2.8.2.2 vypočítejte výkon tentokrát stejnosměrného sériového motoru pro pohon zařízení, motor je připojen ke stejnému zdroji napětí 80 V. Řízení otáček je prováděno změnou napětí na rotoru.



OTÁZKY

Jaký je obecný postup při výpočtu výkonu motoru schopného pracovat v přerušovaném zatížení?

2.7.3. Volba motoru pro krátkodobé zatížení



ČAS KE STUDIU

25 minut.



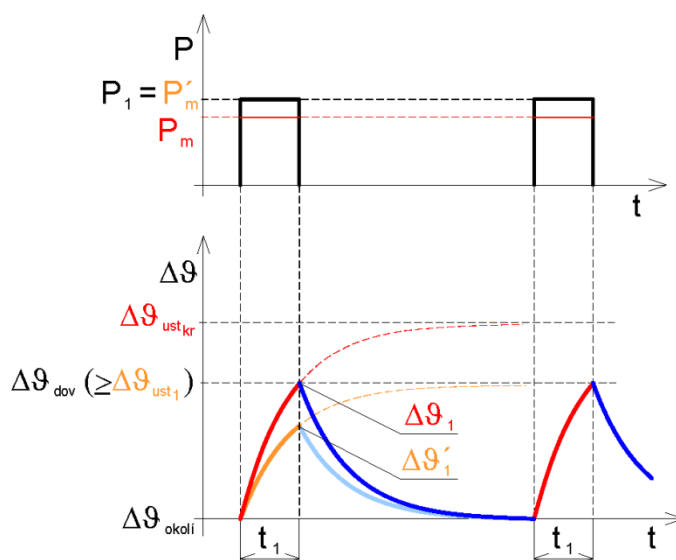
CÍL

Seznámit se s postupem výpočtu potřebného výkonu motoru při přerušovaném zatížení.



VÝKLAD

Jak je patrné z obrázku, kdybychom zvolili výkon motoru stejný jako potřebný krátkodobý výkon ($P'_m = P_1$), motor by se za dobu provozu t_1 ohřál jen o teplotu $\Delta\theta'_1$ a nedosáhl by dovoleného oteplení, nebyl by tedy plně využit. Je proto výhodnější zvolit menší motor s výkonem P_m , který bude po dobu provozu t_1 přetěžován. Jeho oteplení v čase t_1 ($\Delta\theta_1$) dosáhne právě hodnoty dovoleného oteplení ($\Delta\theta_1 = \Delta\theta_{dov}$) a dle definice krátkodobého zatížení bude následovat doba natolik dlouhá, že se motor ochladí až na teplotu okolí (teprve pak může být znovu krátkodobě zatěžován).



($\Delta\theta_{ust1}$ = ustálené oteplení, kterého by dosáhl motor s výkonem P'_m , kdyby pracoval při trvalém zatížení;
 $\Delta\theta_{ustkr}$ = ustálené oteplení, kterého by dosáhl motor s výkonem P_m , kdyby pracoval při trvalém zatížení)

Chceme-li vypočíst výkon motoru, který by byl dostatečný a zároveň plně využitý pro použití ke krátkodobému zatížení, vycházíme z jeho teplotního a výkonového přetížení.

Teplotní přetížení:

$$p_\theta = \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta'_1} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}} \quad \left\{ \text{oteplení obecně: } \Delta\theta = \Delta\theta_{ust} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right); \text{ pak: } \frac{\Delta\theta'_1}{\Delta\theta_1} = 1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}} \right\}.$$

Výkonové přetížení:

$$p_P = \frac{P_1}{P_m}.$$

Jelikož ztráty ve vinutí jsou úměrné druhé mocnině proudu ($R \cdot I^2$) a výkon je úměrný proudu ($U \cdot I$) můžeme napsat vztah mezi výkonovým a teplotním přetížením ve tvaru:

$$p_P = \sqrt{p_\theta}.$$

Při určování výkonu motoru dostatečného pro krátkodobý chod postupujeme takto:

① vypočítáme činitel teplotního přetížení: $p_\theta = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}}$

② vypočítáme činitel výkonového přetížení: $p_P = \sqrt{p_\theta}$

③ vypočítáme potřebný výkon: $P_m = \frac{P_1}{p_P}.$



ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

Příklad 2.7.3.1: Vypočítejte, jaký jmenovitý výkon musí mít motor (z řady 4, 5, 6, 7, a 8 kW), zatížený krátkodobě výkonem 10 kW po dobu 60 minut. Oteplovací časová konstanta navrhované řady motorů je 120 minut.

Řešení:

① vypočítáme činitel teplotního přetížení:

$$p_\theta = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{60}{120}}} = 2,5$$

② vypočítáme činitel výkonového přetížení:

$$p_P = \sqrt{p_\theta} = \sqrt{2,5} = 1,58$$

③ vypočítáme potřebný výkon:

$$P_m = \frac{P_1}{p_P} = \frac{10 \cdot 10^3}{1,58} = 6329,114 \text{ W} \Rightarrow \text{volíme motor o výkonu 7 kW.}$$

Příklad 2.7.3.2: Vypočítejte jaké teplotní přetížení má stejnosměrný motor s výkonem 800 W, který zatěžujeme v krátkodobém zatížení po dobu 30 minut proudem 20 A. Napětí zdroje je 100 V.

Řešení:

Vypočteme elektrický výkon, jakým je motor v krátkodobém zatížení zatěžován:

$$P_1 = U \cdot I = 100 \cdot 20 = 2\,000 \text{ W}$$

Vypočteme výkonové přetížení:

$$p_P = \frac{P_1}{P_m} = \frac{2\,000}{800} = 2,5$$

Nakonec vypočteme přetížení teplotní:

$$p_{\theta} = p_p^2 = 2,5^2 = 6,25$$



PRAKTICKÉ ÚLOHY

Úloha 2.7.3.1: Vypočítejte, jaký jmenovitý výkon musí mít stejnosměrný cize buzený motor (z řady 1, 2, 3, 4 a 5 kW), zatížený krátkodobě proudem 10 a po dobu 90 minut. Motor je připojen na napětí 130 V. Oteplovací časová konstanta navrhované řady motorů je 120 minut.

Úloha 2.7.3.1: Vypočítejte jaké teplotní přetížení má stejnosměrný sériový motor s výkonem 200 W, který zatěžujeme v krátkodobém zatížení po dobu 30 minut výkonem 300 W.



OTÁZKY

Jaký je obecný postup při výpočtu výkonu motoru právě využitého při krátkodobém zatížení?

POUŽITÁ LITERATURA:

- [1] ŘÍHA, Josef. *Elektrické stroje a přístroje*. Praha: SNTL, 1986, str. 246-253, 289-266.
- [2] ČERMÁK, Tomáš. *Elektrické pohony*. Ostrava: VŠB, 1982, str. 7-47.
- [3] NEBORÁK, Ivo. *Elektrické regulované pohony II: pro kombinované a distanční studium*. Ostrava: VŠB, 2005, str. 2-3.

ROBOTI

VE ŠKOLE PRO PRAKTICKOU VÝUKU, MOTIVACI I ZÁBAVU

CZ.1.07/1.1.24/01.0066



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

ELEKTRICKÉ STROJE - POHONY

Ing. Petr VAVŘIŇÁK