

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

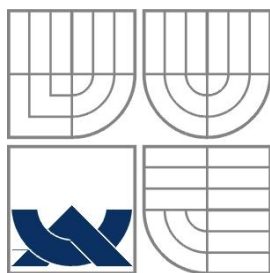
ELEKTRICKÉ STROJE – PODKLADY PRO VÝUKU V ELEKTRONICKÉ FORMĚ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

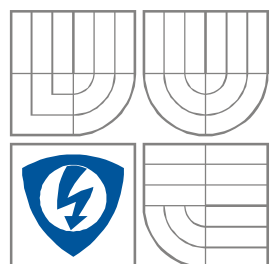
Karel Boháč

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ELEKTRICKÉ STROJE – PODKLADY PRO VÝUKU V ELEKTRONICKÉ FORMĚ

ELEKTRICAL MACHINES – EDUCATION MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

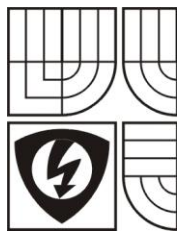
Karel Boháč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO, 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Karel Boháč

Ročník: 3

ID: 78102

Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Elektrické stroje – podklady pro výuku v elektronické formě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou a principem funkce zadaného elektrického stroje.
2. Připravte databázi řešených a neřešených příkladů.
3. V návaznosti na předchozí semestrální projekt vytvořte grafické podklady usnadňující pochopení zadané problematiky.
4. Zhodnoťte výsledky, navrhnete další postup

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.10.2007

Termín odevzdání: 06.06.2008

Vedoucí projektu: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Karel Boháč

Bytem: Odry, Kamenka 109

Narozen/a (datum a místo): 24. 06. 1985 ve Vítkově

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá

elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

disertační práce

diplomová práce

bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Elektrické stroje – podklady pro výuku v elektronické formě

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Ústav: Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Datum obhajoby VŠKP: 16. 06. 2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

tištěné formě – počet exemplářů 1

elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užit, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Závěrečná práce je zaměřena na praktický postup při výpočtu a odvozování vlastností stejnosměrných strojů. Provází čtenáře krok za krokem základními vztahy ke správnému výsledku. Jednotlivé situace jsou doplněny slovním popisem, obrázky vystihujícími aktuální stav stroje a animacemi usnadňujícími pochopení činnosti stroje.

Abstract

Semestral's Thesis is oriented on practical consecution in calculating and derivation property of direct current machines. Guide reader by point elementary relations to correct result. Separately situations are completed with word description, pictures apposite actual condition of machine and animation of machine running.

Klíčová slova

Stejnoseměrné stroje; řešené příklady; neřešené příklady; postup návrhu strojů; reakce kotvy; vinutí kotvy; indukované napětí

Keywords

Direct current machine; solved examples; unsolved examples; project consecution; armature reaction; armature winding; generated voltage

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Elektrické stroje – podklady pro výuku v elektronické formě“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

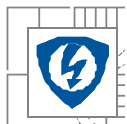
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřejovi Vítkovy, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

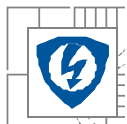


OBSAH

1 ÚVOD	7
2 VINUTÍ KOTVY	9
2.1 NÁVRH VINUTÍ	10
2.1.1 SMYČKOVÉ VINUTÍ	12
2.1.2 VLNOVÉ VINUTÍ	13
2.2 KONSTRUKČNÍ SCHÉMATA VINUTÍ	14
2.2.1 NÁHRADNÍ KOMUTÁTOROVÉ SCHÉMA.	15
2.2.2 ROZVINUTÉ SCHÉMA.....	17
2.2.3 POLYGON NAPĚTÍ.....	19
3 INDUKOVANÉ NAPĚTÍ	24
3.1 ODVOZENÍ INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ	24
3.1.1 SMYČKOVÉ VINUTÍ	27
3.1.2 VLNOVÉ VINUTÍ	28
4 REAKCE KOTVY	29
4.1 STANOVENÍ VLIVU REAKCE KOTVY	29
4.1.1 VLV REAKCE KOTVY.....	32
5 KOMUTACE	34
5.1 STANOVENÍ REAKČNÍHO NAPĚTÍ	34
5.1.1 LINEÁRNÍ KOMUTACE	36
5.2 ZLEPŠENÍ KOMUTACE	37
5.2.1 NASTAVENÍ NEUTRÁLNÍ POLOHY	38
6 ZTRÁTY A ÚČINNOST	40
6.1 STANOVENÍ ÚČINNOSTI	40
6.2 MOMENT MOTORU	41
6.2.1 SÉRIOVÝ MOTOR	42
6.2.2 DERIVAČNÍ GENERÁTOR	44
7 VLASTNOSTI STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ	46
7.1 ZÁKLADNÍ POJMY	47
7.1.1 CHARAKTERISTIKY CIZE BUZENÉHO MOTORU.....	47
7.1.2 CHARAKTERISTIKY DERIVAČNÍHO MOTORU.....	49
7.1.3 CHARAKTERISTIKY SÉRIOVÉHO MOTORU	49
7.1.4 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA SÉRIOVÉHO GENERÁTORU	50
7.1.5 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA GENERÁTORU S CIZÍM BUZENÍM	51
7.1.6 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA DERIVAČNÍHO GENERÁTORU	52
8 NEŘEŠENÉ PŘÍKLADY	54
8.1 VINUTÍ STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ	54
8.2 INDUKOVANÉ NAPĚTÍ	54

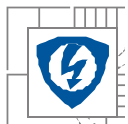


8.3 REAKCE KOTVY.....	54
8.4 KOMUTACE.....	54
8.5 ZTRÁTY A ÚČINNOST.....	55
8.6 VLASTNOSTI STROJŮ.....	55
9 ZÁVĚR.....	56
LITERATURA	57



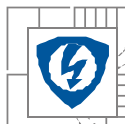
SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 01-01 ZÁKLADNÍ PRINCIPY STEJNOSMĚRNÉHO STROJE (OBRÁZEK JE CITOVÁN Z [7])	7
OBR. 02-01 PRINCIP POSPOJOVÁNÍ SÉRIOVÉHO VINUTÍ ($2P=6$; $Q=19$, $2A=2$)	9
OBR. 02-02 NÁHRADNÍ SCHÉMA SMYČKOVÉHO NEKŘÍŽENÉHO VINUTÍ	16
OBR. 02-03 NÁHRADNÍ SCHÉMA SMYČKOVÉHO KŘÍŽENÉHO VINUTÍ	16
OBR. 02-04 NÁHRADNÍ SCHÉMA VLNOVÉHO KŘÍŽENÉHO VINUTÍ	16
OBR. 02-05 ROZVINUTÉ SCHÉMA SMYČKOVÉHO VINUTÍ	17
OBR. 02-06 ROZLOŽENÍ CÍVEK NA OBVODU KOTVY	18
OBR. 02-07 ROZVINUTÉ SCHÉMA KŘÍŽENÉHO SMYČKOVÉHO VINUTÍ	18
OBR. 02-08 ROZVINUTÉ SCHÉMA VLNOVÉHO VINUTÍ	19
OBR. 02-09 VEKTOROVÁ HVĚZDICE INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ SMYČKOVÉHO VINUTÍ	20
OBR. 02-10 VEKTOROVÁ HVĚZDICE INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ VLNOVÉHO VINUTÍ	20
OBR. 02-11 NAPĚŤOVÝ MNOHOÚHELNÍK SMYČKOVÉHO VINUTÍ	21
OBR. 02-12 NAPĚŤOVÝ MNOHOÚHELNÍK SMYČKOVÉHO KŘÍŽENÉHO VINUTÍ	22
OBR. 02-13 NAPĚŤOVÝ MNOHOÚHELNÍK VLNOVÉHO VINUTÍ	23
OBR. 03-01 PRŮBĚH MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE	24
OBR. 03-02 POHYB VODIČE V MAGNETICKÉM POLI	25
OBR. 03-03 PRŮBĚH NAPĚTÍ NA LAMELÁCH KOMUTÁTORU	26
OBR. 04-01 PRŮBĚH MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE	29
OBR. 04-02 PRŮBĚH MAGNETICKÝCH SILOČAR NEZATÍŽENÉHO STROJE	30
OBR. 04-03 VYCHÝLENÍ PŮVODNÍHO SMĚRU VLIVEM PROTÉKANÉHO PROUDU KOTVOU	31
OBR. 05-01 VÝŘEZ ČÁSTÍ KOMUTÁTORU V ČASOVÉM SLEDU	34
OBR. 05-02 PRŮBĚH PROUDU LAMELOU	35
OBR. 05-03 PRŮBĚH MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE	37
OBR. 07-01 SCHÉMATICKÁ ZNAČKA KOTVY	47
OBR. 07-02 SCHÉMATICKÁ ZNAČKA BUDÍCÍHO VINUTÍ	47
OBR. 07-03 SCHÉMATICKÁ ZNAČKA POMOCNÝCH VINUTÍ	47
OBR. 07-04 CHARAKTERISTIKY CIZE BUZENÉHO MOTORU	48
OBR. 07-05 CHARAKTERISTIKY DERIVAČNÍHO MOTORU	49
OBR. 07-06 CHARAKTERISTIKY SÉRIOVÉHO MOTORU	50
OBR. 07-07 CHARAKTERISTIKA SÉRIOVÉHO DYNAMA	51
OBR. 07-08 CHARAKTERISTIKA DYNAMA S CIZÍM BUZENÍM	52
OBR. 07-09 CHARAKTERISTIKA DYNAMA S DERIVAČNÍM BUZENÍM	53



SEZNAM SOUBORŮ

SS_STROJ.XLS – ZÁLOŽKA „VINUTÍ KOTVY“	11
STAVBA_ROZ_SCH.AVI.....	19
STAVBA_POL_NAP.AVI.....	22
UI(T)/IND_NAP.M (JEHO SOUČÁSTÍ JE I MODEL „IND_NAP_MOD.MDL“).....	27
SS_STROJ.XLS – ZÁLOŽKA „INDUKOVANÉ NAPĚTÍ“	27
SS_STROJ.XLS – ZÁLOŽKA „REAKCE KOTVY“	31
REAKCE_KOTVY_0.AVI	31
KOMUTACE/KOMUTACE.M (JEHO SOUČÁSTÍ JE I MODEL „KOMUTACE_MOD.MDL“)	36
REAKCE_KOTVY_S_P_P.AVI.....	38
REAKCE_KOTVY_S_K_V.AVI	38



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

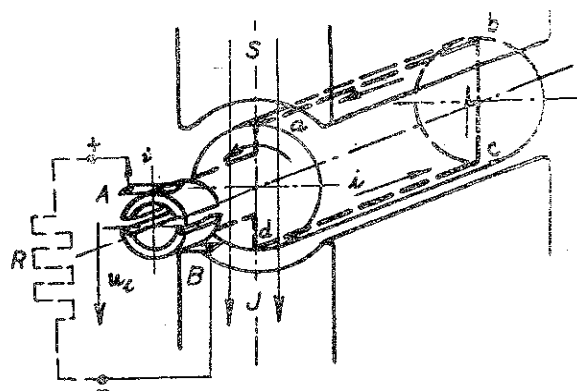
Název veličiny	Označení veličiny	Jednotka
Cívkový krok	y	„Cívková strana“
Čas	T	s
Délka	l	m
Délka oblouku	t	m
Drážkový krok	y_d	„Drážka“
Indukčnost	L	H
Konstanta motoru	c	-
Magnetická indukce	B	T
Magnetický tok	ϕ	Wb
Magnetomotorická síla	F_m	AZ
Měrný odpor	ρ	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
Moment	M	Nm
Napětí	U	V
Obecný úhel	α	°
Obecný úhel	φ	°
Odpor	R	Ω
Otáčky stroje	n	ot./min
Počet cívkových stran	$2n_c$	„Cívková strana“
Počet drážek	Q	-
Počet lamel	K	„Lamela“
počet paralelních větví	$2a$	-
Počet pólů	$2p$	-
Počet závitů	N	„Závit“
Pólový krok	y_p	„Drážka“
Proud	I	A
Průměr	D	m^2
Průměr	S	m^2
Radiální vzdálenost	δ	m



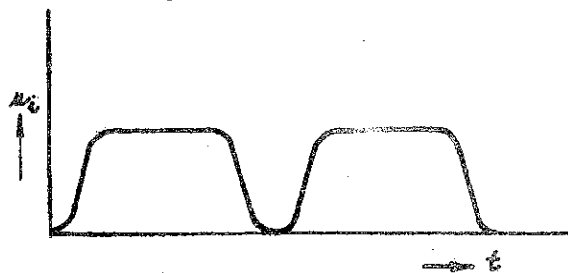
Název veličiny	Označení veličiny	Jednotka
Rozteč pólu	τ	%
Tloušťka	b	m
Účinnost	η	-
Úhlová rychlost	ω	rad·s ⁻¹
Výkon	P	W

1 ÚVOD

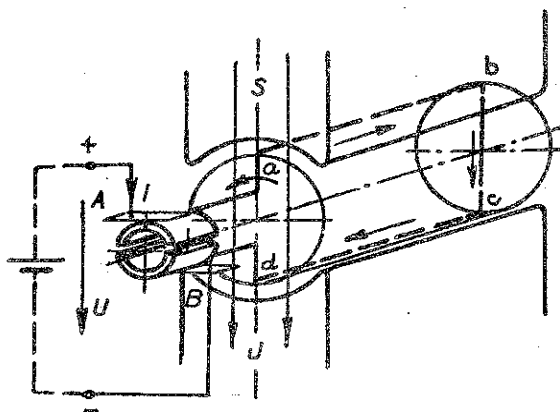
Stejnoseměrné stroje patří k nejstarším točivým elektrickým strojům. Jejich objevitelem byl vynálezce M. Faraday 1821. Drát upevněný v korku vložil do rtuťové lázně. Ve středu nádrže byl umístěn permanentní magnet, kolem kterého drát rotoval. Stále však bylo výhodnější používat parní stroje, protože nepotřebovali drahé baterie, které byly jediným zdrojem elektrické energie. V současné době se stejnosměrné stroje nahrazují asynchronními motory, ale stále existují oblasti, kde je stejnosměrný stroj nenahraditelný pro jeho přizpůsobivost výrobním nárokům současného průmyslu na automatizaci. Nejčastější využití stejnosměrných motorů je v traktích a servopohonech.



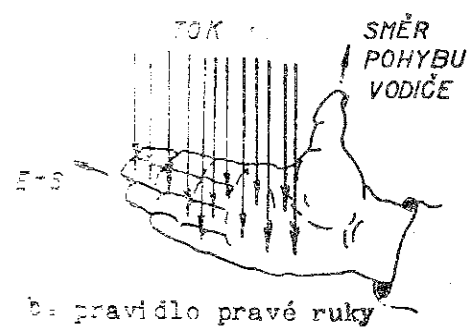
a. dynamo



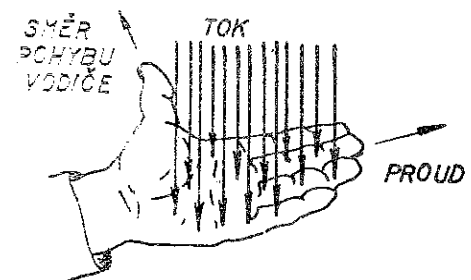
c. průběh indukovaného napětí



d. motor



b. pravidlo pravé ruky



e. pravidlo levé ruky



Obr. 01-01 Popisuje základní principy využívané při návrhu stejnosměrných strojů.

Obr. 01-01a Dynamo:

Obrázek ukazuje praktické využití pravidla pravé ruky u generátoru.

Obr. 01-01b Pravidlo pravé ruky:

Toto pravidlo používáme pro stanovení směru indukovaného napětí ve vodiči. Dlaň je otevřena směrem k severnímu pólu a palec ukazuje jakým směrem otáčíme generátorem. Prsty nám ukazují směr indukovaného napětí.

Obr. 01-01c Průběh indukovaného napětí:

Indukované napětí má pod póly konstantní velikost a mimo ně prudce klesá až k nule. Uvedený průběh nezahrnuje vliv reakce kotvy.

Obr. 01-01d Motor:

Obrázek ukazuje praktické využití pravidla levé ruky u motoru.

Obr. 01-01e Pravidlo levé ruky:

Toto pravidlo určuje směr otáčení motoru. Dlaň je opět otevřena k severnímu pólu a palec ukazuje směr otáčení, tedy směr vychýlení vodiče vlivem vzájemného působení magnetických polí buzení a vodiče. Prsty ukazují směr proudu tekoucího vodičem.

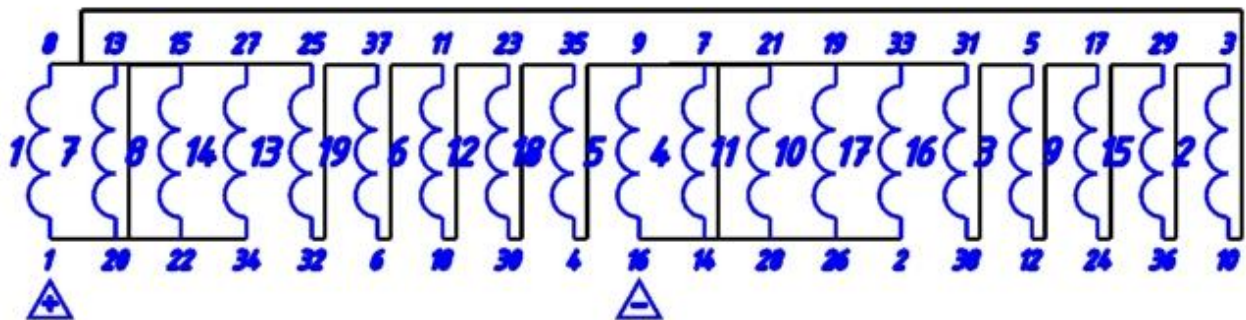
2 VINUTÍ KOTVY

Při konstrukci vinutí spojujeme všechny zúčastněné cívky do uzavřené smyčky. Toho dosáhneme využitím obecných zákonitostí platných pro všechny způsoby uložení cívek. Tyto rovnice jsou však pouhým doporučujícím postupem. Každý motor je v podstatě jedinečný a sestavený tak, aby vyhovoval podmínkám provozu. Proto i vinutí motoru je závislé na parametrech zatížení, napájení, rozměrech motoru a dalších aspektech, které budou zmíněny v následujícím textu.

Podle způsobu uložení vinutí kotvy stejnosměrného stroje rozdělujeme vinutí na sériová (vlnová), paralelní (smyčková) a sérioparalelní.

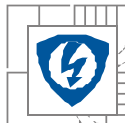
Sériové vinutí je upřednostňováno pro své nízké kolísání indukovaného napětí. Vlnové vinutí má mezi předními (i zadními) stranami dvou po sobě jdoucích cívek vzdálenost přibližně dvou pólových roztečí a tak vytvoří pouze dvě paralelní větve nezávislé na počtu pólů. Odpor vinutí je tedy složený z velkého množství cívek spojených do série a vysoký odpor znamená malý proud při daném napájecím napětí. Na základě této myšlenky můžeme domyslet, že se vlnová vinutí nehodí na malá napětí, kde bychom nedosáhly potřebného proudu a tím i výkonu.

Důkazem pro vznik právě dvou paralelních větví je následující schéma. Sběrače komutátoru zkratují skupinu cívek, které se tím přestanou účastnit vedení proudu a zbylé cívky zůstanou spojené v sérii jak jim předurčil přední, zadní a celkový krok vinutí.



Obr. 02-01 Princip pospojování sériového vinutí ($2p=6$; $Q=19$, $2a=2$)

Paralelní vinutí má cívky seřazené tak že svými začátky i konci leží vždy vedle sousedních cívek. Takto musí vzniknout $2p$ skupin drážek se stejným směrem proudu. V případě, že vytvoříme méně skupin než je počet pólů, bude docházet v některých drážkách k indukci záporného elektromotorického napětí a oslabení magnetického pole a tím i magnetomotorické síly a momentu. Vinutí kotvy tedy bude mít stejný počet paralelních větví jako je počet pólů. Proud u tohoto vinutí budou vyšší při stejném napětí jako u sériového, a proto používáme paralelní vinutí tam kde nemůžeme použít vinutí sériové. Kolísání indukovaného napětí je u paralelního vinutí podstatně vyšší, protože se v každé větvi indukuje napětí v menším počtu drážek a toto kolísající napětí se navíc spojuje paralelně k ostatním. Vlivem drobných odchylek na souměrnosti motoru vznikají v takto spojených zdrojích napětí vyrovnávací proudy, které



zvyšují jiskření na kartáčích, a proto musíme tyto proudy přesměrovat přes vyrovnávací spojky které spojují místa se stejným potenciálem podle polygonu napětí (kap. 2.2.3). Rozeznáváme vyrovnávací spojky prvního a druhého řádu. V praxi se můžeme setkat i s vyrovnávacími spojkami třetího řádu, které jsou jistou modifikací spojek druhého řádu, zlepšující výrazně indukčnost komutujících cívek.

Sérioparalelní vinutí je pouze zvláštním případem sériového vinutí. Cívky se navíjejí s takovým krokem, aby vzniklo více paralelních větví než u klasického vlnového vinutí.

Podle počtu vodičů v drážce pak vinutí rozdělujeme na jednovrstvé, dvouvrstvé, čtyřvrstvé atd.. V běžné praxi se používá převážně dvouvrstvé vinutí. Drážka je rozdělena na dvě části („vrstvy“). V dolní vrstvě ukládáme přední strany vinutí a v horní pak zadní strany vinutí. Daná návaznost však není nikterak určující a v případě složitějších vinutí se během konstrukce ukládají cívky najednou do stejných vrstev. Takové uložení má pak za následek vznik magnetické nesouměrnosti která se opět projeví vyrovnávacími proudy mezi vinutími.

S vinutím rotoru úzce souvisí i počet budících pólů. Ten roste spolu se zatížením stroje.

2.1 Návrh vinutí

Na začátku návrhu kotvy musíme stanovit vstupní parametry, které nejsou zpravidla všechny zadány, avšak lze je odvodit z daných pravidel.

Vazby mezi počtem pólů $2p$, pólovým rozestupem y_p , drážkovým krokem y_d , počtem drážek Q , počtem stran v drážce u , počtem lamel K a počtem cívkových stran $2nc$ jsou dány rovnicemi (02.01) až (02.03)

$$K = \frac{u \cdot Q}{2} \quad (02.01)$$

$$2n_c = u \cdot Q \quad (02.02)$$

$$y_d = y_p = \frac{Q}{2p} \quad (02.03)$$

Pólový krok udává, jak velká část kotvy (vyjádřená v drážkách) připadá jednomu pólu. Proto nesmí být během návrhu vlnového vinutí celým číslem, jak později odvodíme z vlastností obou vinutí. Drážkový krok vyjadřuje jakou vzdálenost (vyjádřená v drážkách) musí překonat jednotlivé cívky, aby ležela přední strana cívky pod opačným pólem než zadní. Drážkový krok tedy musí být vždy celé číslo. Drážkový krok zaokrouhlujeme podle zvoleného typu vinutí. Pro křížené vinutí zaokrouhlujeme nahoru. Vodiče pak po oběhnutí celého obvodu kotvy následují za stranami předcházejícího ukládání. U nekříženého vinutí jdou tyto cívky v cyklech před předcházejícími.

Volbou komutátorového kroku (y_k) stanovíme typ vinutí.

$$y_k = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot K \pm 2a}{2p} \quad (02.04)$$

Při návrhu můžeme zvolit mezi kříženým a nekříženým vinutím. Tato volba je ve vztahu (01.04) zastoupena znaménkem \pm . Pro křížená vinutí volíme $-$. Tato vinutí mají sice schopnost samočinně potlačit vliv reakce kotvy, avšak díky vývodům, které se kříží s ostatními vodiči cívky



(s čímž souvisí náročnější výroba) se v praktických návrzích nevyužívá. Častějších nekřížených vinutí dosáhneme použitím znaménka +. Konstanta $2a$ zde zastupuje počet paralelních větví, čímž rozhoduje o sériovém ($2a=2$), paralelním ($2a=2p$) a nebo sérioparalelním ($2 < \frac{2a}{2p} < 2p$) vinutí. ε popisuje použité uložení. Pro vlnová vinutí volíme $\varepsilon=1$ a pro smyčková vinutí $\varepsilon=0$. Rovnici (02.04) pak můžeme rozdělit na dvě nezávislé rovnice.

Pro vlnové vinutí tedy bude platit:

$$y_k = \frac{2 \cdot K \pm 2a}{2p} = \frac{2 \cdot K \pm 2}{2p} \quad (02.05)$$

A pro smyčkové:

$$y_k = \frac{\pm 2a}{2p} = \pm 1 \quad (02.06)$$

Po stanovení vstupních parametrů můžeme vypočíst parametry vinutí, kterými jsou přední cívkový krok y_2 , zadní cívkový krok y_1 a celkový krok vinutí y .

$$y_1 + y_2 = 2 \cdot u \cdot y_d \quad (02.07)$$

Přední cívkový krok vymezuje vzdálenost mezi přední stranou cívky a zadní stranou cívky předcházející. Určuje tedy vzdálenost dvou stran připojených k jedné lamelle komutátoru. Zadní cívkový krok určuje vzdálenost mezi přední a zadní stranou jedné cívky. Součet předního a zadního kroku je vždy roven dvojnásobku vodičů připadajících na jeden pól. Pro vlnová vinutí jsou si oba kroky rovny, zatímco u smyčkového vinutí je mezi nimi rozdíl celkového kroku. Celkový krok vymezuje vzdálenosti mezi předními (popřípadě i zadními) stranami sousedících cívek. Jeho velikost udává rovnice (02.08)

$$y = y_1 \pm y_2 \quad (02.08)$$

Pro vlnová vinutí použijeme znaménka +. Rovnice (02.08) se proto nezmění

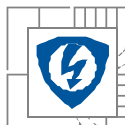
$$y = y_1 + y_2 \quad (02.08a)$$

a u smyčkového vinutí zjednoduší

$$y = 2 \quad (02.08b)$$

S návrhem vinutí kotvy vám pomůže generátor příkladů vytvořený v tabulkovém editoru v CD příloze

SS_stroj.xls – záložka „Vinutí kotvy“



2.1.1 Smyčkové vinutí

Navrhněte parametry dvouvrstvého smyčkového a nekříženého vinutí, šesti pólového stroje, pokud na jeden pól připadnou 3 drážky. V každé vrstvě je uložena jedna strana. Výsledky porovnejte s kříženým vinutím stejných parametrů.

Dáno:

$$2p = 6 \text{ (počet pólů)}$$

$$y_p = 3 \text{ (pólový rozestup)}$$

Počítat:

Q (počet drážek)

K (počet lamel)

$2n_c$ (celkový počet stran)

y_{d1} (drážkový krok)

y_1 (zadní cívkový krok)

y_2 (přední cívkový krok)

y (celkový krok)

Před vlastním výpočtem určíme vstupní parametry. Protože máme zadánu pólovou rozteč, dopočítáme ještě počet drážek, počet lamel a počet stran.

$$Q = K = 2p \cdot y_p \quad (02.09)$$

$$Q = K = 6 \cdot 3 = 18$$

$$2n_c = u \cdot Q$$

$$2n_c = 2 \cdot 18 = 36$$

Drážkový krok volíme roven pólovému rozestupu, pro uložení každého vodiče pod správný pól.

$$y_d = y_p = 3$$

Nyní můžeme vypočítat ze zadaných vstupních parametrů jakým způsobem se rozloží vinutí na obvodu kotvy. Nejprve určíme častější nekřížená vinutí. Pro smyčkové vinutí je celkový krok vždy roven 2. Z rovnice (02.07) a pravidla pro smyčkové vinutí (02.08) určíme přední a zadní krok vinutí.

$$y = 2$$

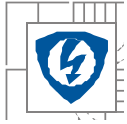
$$y_1 + y_2 = 2 \cdot u \cdot y_d \Rightarrow y_2 = 2 \cdot u \cdot y_d - y_1$$

$$\underline{y = y_1 - y_2 \Rightarrow y_1 = y_2 + y}$$

$$\underline{y_1 = 2 \cdot u \cdot y_d - y_1 + y \Rightarrow 2y_1 = 2 \cdot u \cdot y_d + y}$$

$$y_1 = u \cdot y_d + \frac{y}{2} = 2 \cdot 3 + 1 = 7$$

$$y_2 = u \cdot y_d - \frac{y}{2} = 2 \cdot 3 - 1 = 5$$



Pro křížená vinutí se změní směr chodu vinutí na obvodu kotvy. To znamená změnu celkového kroku, který bude záporný.

$$y = -2$$

$$y_1 = u \cdot y_d + \frac{y}{2} = 2 \cdot 3 - 1 = 5$$

$$y_2 = u \cdot y_d - \frac{y}{2} = 2 \cdot 3 + 1 = 7$$

2.1.2 Vlnové vinutí

Stanovte rozložení cívek na obvodu kotvy pokud známe počet drážek $Q = 18$. počet pólů stroje $2p = 4$ a očekáváme vlnové vinutí křížené, které je uloženo ve dvou vrstvách $u = 2$.

Dáno:

$$Q = 18 \text{ (počet drážek)}$$

$$2p = 4 \text{ (počet pólů)}$$

$$u = 2 \text{ (počet vrstev)}$$

Počítat:

$$y_p \text{ (pólový krok)}$$

$$K \text{ (počet lamel)}$$

$$2n_c \text{ (celkový počet stran)}$$

$$y_{d1} \text{ (drážkový krok)}$$

$$y_1 \text{ (zadní cívkový krok)}$$

$$y_2 \text{ (přední cívkový krok)}$$

$$y \text{ (celkový krok)}$$

Počet drážek musíme upravit na požadavky kříženého vlnového vinutí. Vypočteme proto pólový krok.

$$y_p = \frac{Q}{2p} = 9$$

Vyjde-li jako celé číslo, provedeme první změnu počtu drážek. A opět vypočteme. V našem případě můžeme pokračovat. Protože není plně zaručena rovnost $y_p = y_d$, změníme počet drážek směrem dolů (pro křížené vinutí).

$$y_d = \frac{Q-1}{2p} = 4,25$$

Pokud známe drážkový krok, můžeme zkontrolovat další podmínku vinutí. Stanovíme celkový krok vinutí a vydělíme jej dvěma. Celkový krok získáme z rovnic (02.07) a (02.08)

$$y = y_1 + y_2 = 2 \cdot u \cdot y_d$$

$$y = 2 \cdot 2 \cdot 4,25 = 17$$



$$\frac{y}{2} = \frac{17}{2} = 8,5.$$

Jestliže jsme nezískali lichá čísla, musíme opět změnit počet drážek a celou kontrolu zopakovat. V našem případě jsme se rozhodli zvětšit počet drážek na 19, protože snížení by vedlo opět ke špatnému výsledku.

$$Q = 19$$

$$y_p = \frac{Q}{2p} = 4,75$$

$$y_d = \frac{Q-1}{2p} = 4,5$$

$$y = 2 \cdot u \cdot y_d = 18$$

$$\frac{y}{2} = \frac{18}{2} = 9$$

Protože již máme splněny všechny podmínky, můžeme určit ostatní veličiny jako jsou počet lamel, počet cívkových stran a přední a zadní krok vinutí.

$$K = Q = 19$$

$$2n_c = u \cdot Q = 38$$

$$y_1 = y_2 = \frac{y}{2} = 9$$

Komutátorový krok není u vlnového vinutí jedna a proto jej musíme dopočítat podle vztahu (02-05). Pro případ kříženého vinutí použijeme záporné znaménko.

$$y_k = \frac{2 \cdot K \pm 2a}{2p} = \frac{2 \cdot 19 - 2}{4} = 9$$

2.2 Konstrukční schémata vinutí

Pro grafické znázornění rozložení vinutí se používají náhradní schémata. Zmíníme se o náhradním schématu vinutí (komutátorové schéma), rozvinutém schématu vinutí a polygonu napětí.

Náhradní schéma vinutí naznačuje, jak jsou jednotlivé cívky připojeny na komutátor. Ve středu zakreslíme všechny lamely komutátoru v pořadí podle komutátorového kroku. Přední stranu první cívky připojenou na první lamelu komutátoru označíme číslem jedna a zadní stranu první cívky připojíme na druhou lamelu podle zadního cívkového kroku. Totéž provedeme i s ostatními lamelami, jejichž indexy navýšíme vždy o celkový krok.

Rozvinuté schéma vinutí popisuje uložení vodičů v jednotlivých drážkách. Navíc nám ukazuje připojení sběracího ústrojí k lamelám komutátoru a uložení cívek v magnetickém poli budících pólů. Je možné je doplnit směry proudu v cívkách, ale zhorší se tím přehlednost schématu a proto je v běžném návrhu nekreslíme. Přední strany vinutí kreslíme plnou čarou a zadní pak čarou přerušovanou. Při konstrukci nejprve sestrojíme komutátor. Označíme jej vzestupně tak aby měla



každá lamela své místo. Lamely vydělíme počtem pólů a v tomto poměru přiložíme k lamelám kartáče. Na první lamelu připojíme přední stranu první cívky a k ní připojíme podle zadního kroku zadní stranu té samé cívky. Tuto zadní stranu připojíme ke komutátoru následujícímu za prvním podle komutátorového kroku a opakujeme dokud nezakreslíme všechny cívky. V závěru vydělíme počet drážek počtem pólů a v následujícím poměru rozdělíme drážky pod magnetické póly. V případě, že máme zadáno i pólové krytí α , můžeme póly umístit přesně nad žádané drážky. V opačném a tedy i našem případě předpokládáme $\alpha = 1$.

Posledním ukazatelem vinutí je napěťový mnohoúhelník. Ten ukazuje kolísání indukovaného napětí. Vznikne jako vektorový součet všech po sobě jdoucích stran vinutí. Nejprve určíme elektrický úhel stroje vyjádřený jako podíl skutečného úhlu mezi dvěma sousedními drážkami a počtu pólových dvojic.

$$\alpha_d = \frac{360}{\frac{Q}{p}} = \frac{p \cdot 360}{Q} \quad (02.10)$$

Poté rozmístíme všechny zúčastněné strany vinutí podle jejich uložení v drážkách k příslušnému vektoru. Nakonec zakreslíme vektory do mnohoúhelníku napětí. Zadní strany vinutí jsou k předním stranám připojeny obráceně (začátek přední strany je připojený na komutátor, konec přední strany je připojen na začátek zadní strany a konec zadní strany zpět na komutátor). Proto i směr indukovaného napětí v zadních stranách bude mít opačný směr než ukazuje vektor napětí.

2.2.1 Náhradní komutátorové schéma.

Pro zadání z úvodních příkladů nakreslete komutátorová schémata

Dáno:

- $y_s = 2$ (celkový krok)
- $y_{1s} = 5$ (zadní cívkový krok)
- $y_{2s} = 7$ (přední cívkový krok)
- $Q_s = 18$ (počet drážek)
- $y_v = 18$ (celkový krok)
- $y_{1v} = 9$ (zadní cívkový krok)
- $y_{2v} = 9$ (přední cívkový krok)
- $Q_v = 19$ (počet drážek)

Přední stranu první cívky připojenou na první lamelu komutátoru označíme číslem jedna a zadní stranu první cívky připojíme na sousední lamelu podle zadního cívkového kroku. Tuto lamelu označíme číslem podle komutátorového kroku. Pro vlnové vinutí platí:

Druhou lamelu označíme:

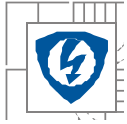
$$1 + y_k = 1 + 9 = 10$$

Zadní stranu první cívky označíme:

$$1 + y_1 = 1 + 9 = 10$$

K první lamele dále připojíme:

$$1 - y_2 = 1 - 9 = -8 = 30$$



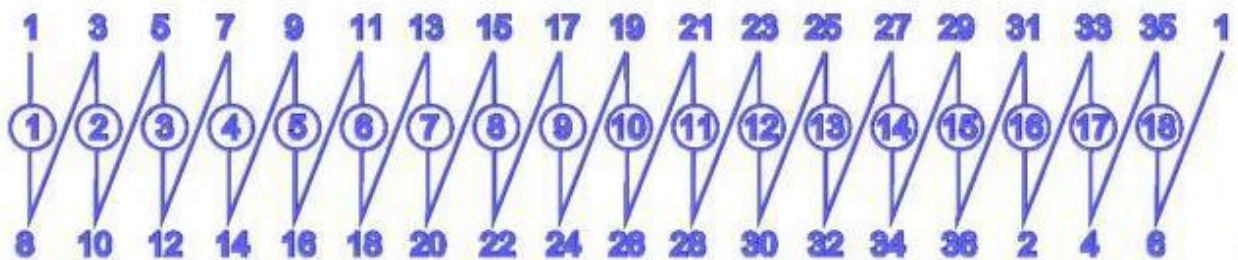
S využitím uvedeného předpisu pro první lamely označíme zbytek schématu.

Celkový krok je vzdálenost mezi sousedními předními nebo také sousedními zadními stranami.

$$1+y=1+18=19.$$

S využitím uvedeného předpisu pro první lamely označíme zbytek schématu.

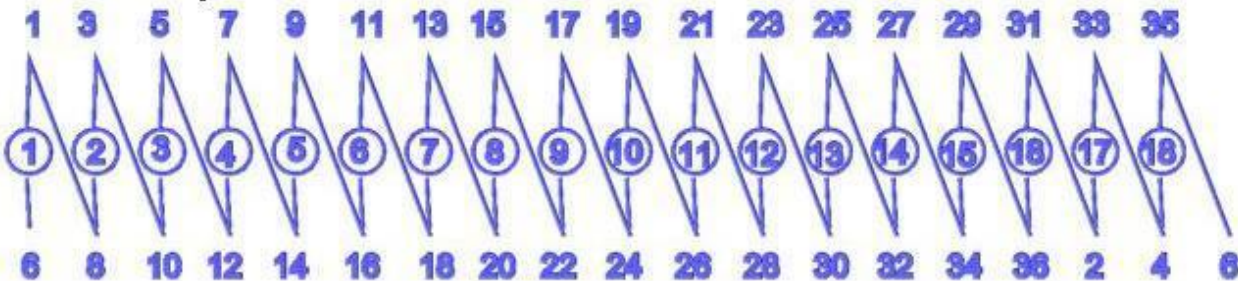
Přední strany vinutí:



Zadní strany vinutí:

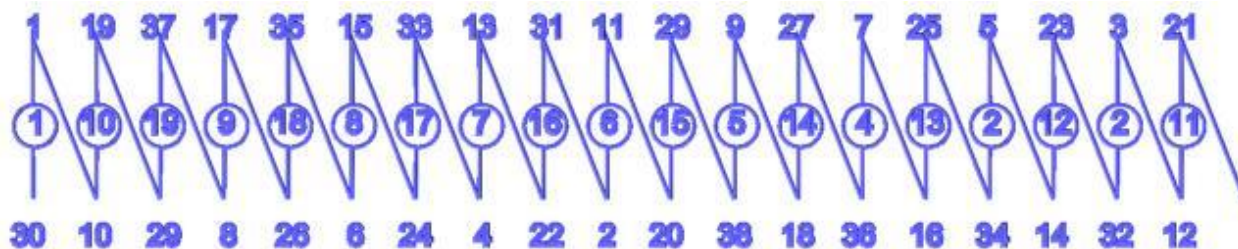
Obr. 02-02 Náhradní schéma smyčkového nekříženého vinutí

Přední strany vinutí:



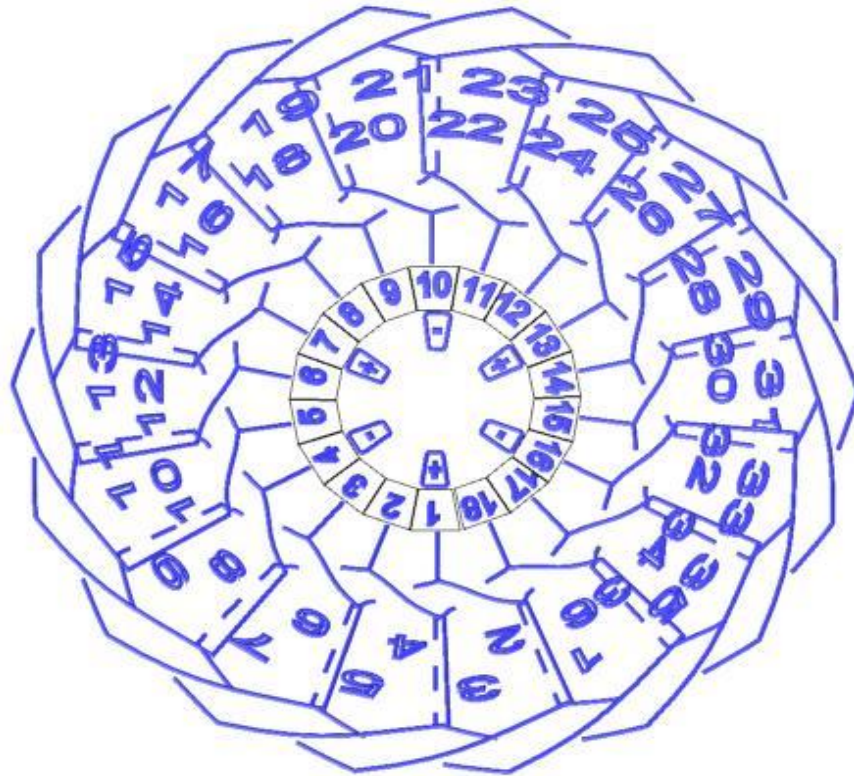
Zadní strany vinutí:

Obr. 02-03 Náhradní schéma smyčkového kříženého vinutí



Obr. 02-04 Náhradní schéma vlnového kříženého vinutí

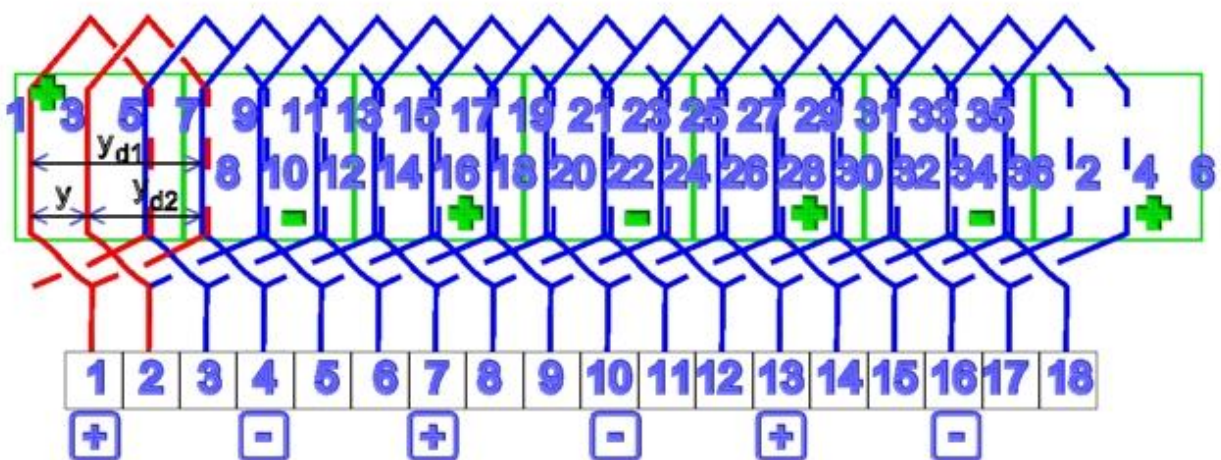
Pro přiblížení situace na vinutí můžeme rozvinuté schéma zpětně svinout, abychom viděli, že je okruh kolem kotvy uzavřený podle definovaného klíče.



Obr 02-06 Rozložení cívek na obvodu kotvy

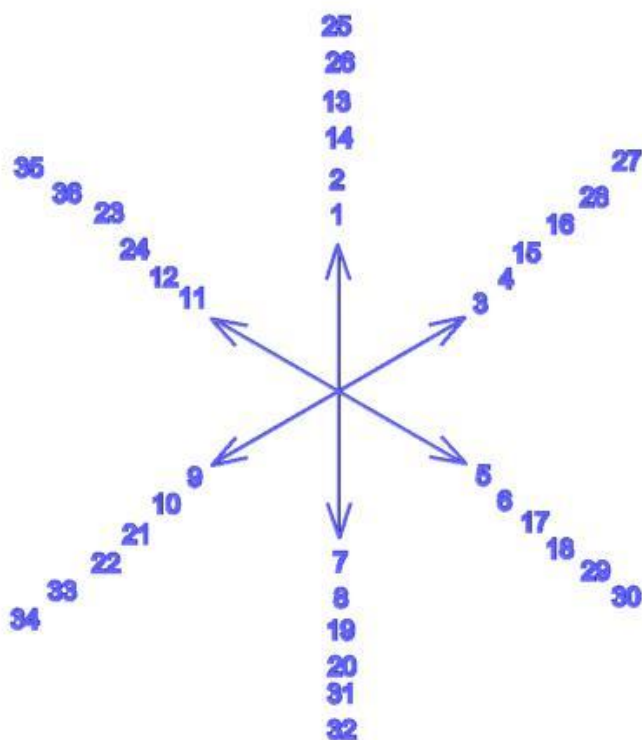
Pro křížené smyčkové vinutí získáme podobé schéma jako u nekříženého, jen zaměníme přední a zadní krok vinutí a změněme smysl komutátorového kroku.

Navržené rozvinuté schéma pak bude:



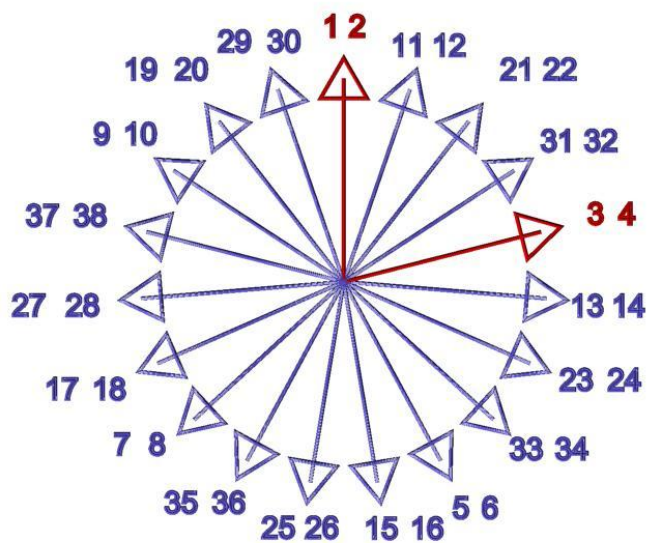
Obr. 02-07 Rozvinuté schéma kříženého smyčkového vinutí

Pro smyčkové vinutí získáme:



Obr. 02-09 Vektorová hvězdice indukovaného napětí smyčkového vinutí

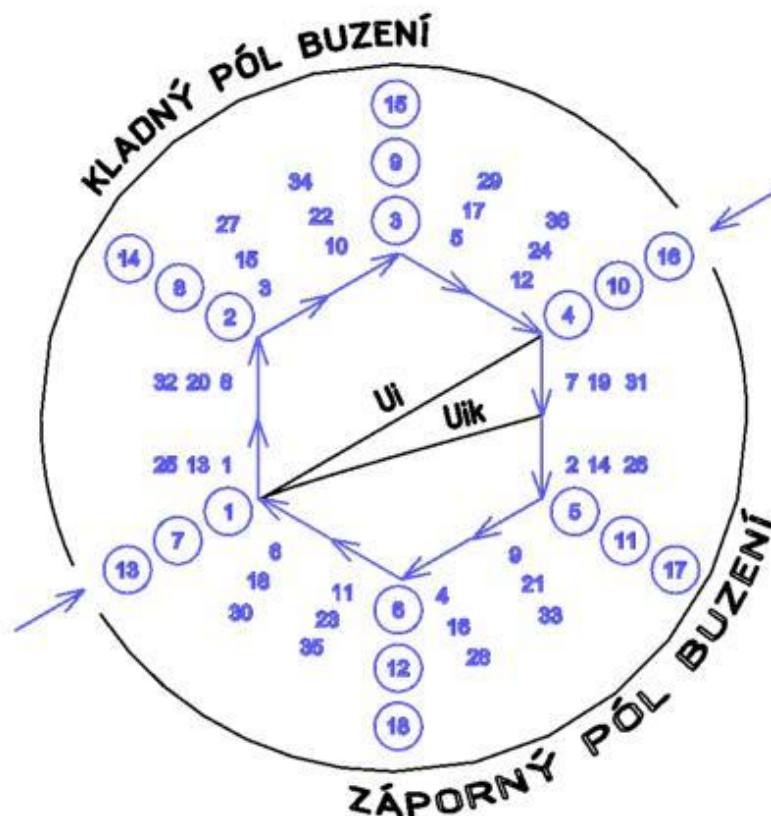
a pro vlnové:



Obr. 02-10 Vektorová hvězdice indukovaného napětí vlnového vinutí

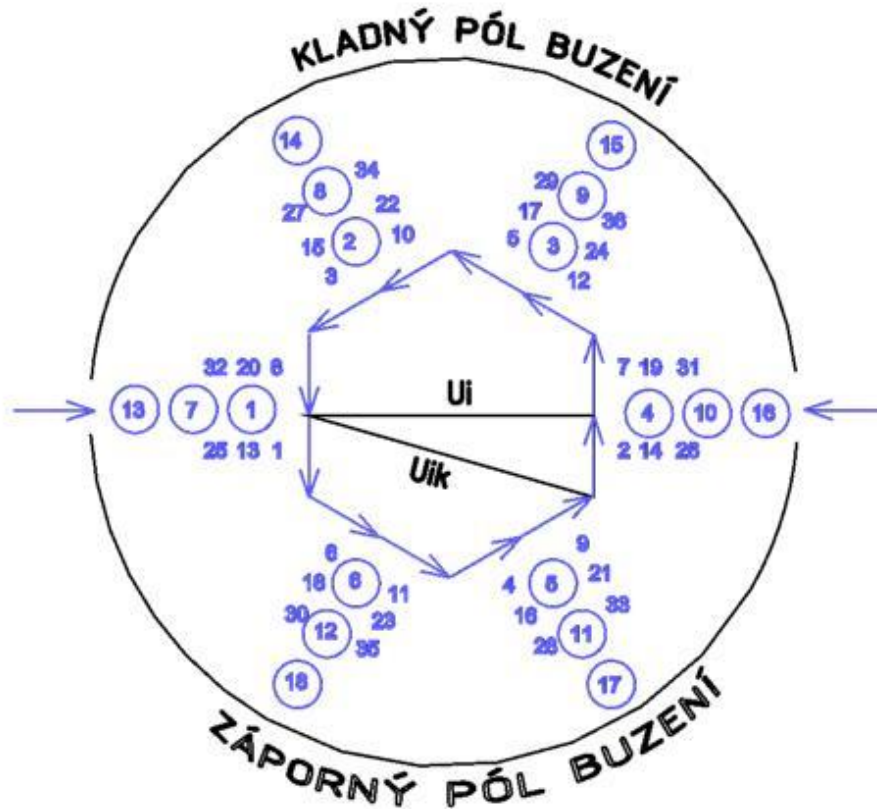
Z uvedeného je vidět podstatný rozdíl mezi smyčkovým a vlnovým vinutím. v případě smyčkového vinutí se u více pólových strojů indukuje právě v $2p$ cívkových stranách stejné napětí a proto se nám tyto drážky překrývají. U vlnového již záleží na konstrukci vinutí, ale pro naše zadání se žádné vodiče, vyjma těch uložených v jedné drážce, nepřekrývají. Celý rozdíl nám ještě více přiblíží mnohoúhelník napětí. Ten sestrojíme posouváním vektorů napětí. Přemístíme první vektor z hvězdice a k němu vybereme druhý podle zadního cívkového kroku. Za druhou stranu připojíme třetí podle předního cívkového kroku a stejně postupujeme do vyčerpání všech stran. Zadní strany vinutí jsou k předním stranám připojeny obráceně (začátek přední strany je připojený na komutátor, konec přední strany je připojen na začátek zadní strany a konec zadní strany zpět na komutátor). Proto i směr indukovaného napětí v zadních stranách bude mít opačný směr než ukazuje vektor napětí.

V polygonu pro smyčková vinutí je znázorněna každá důležitá část motoru pro přiblížení jeho vlastností. Jak už jsme naznačili, budou se nám některé vodiče překrývat. Ze stejného důvodu jako tomu bylo u cívkových stran se nám překryjí nejen lamely komutátoru (čísla v kruhu) a sběrací kartáče (naznačené šipkami u lamel), ale i póly buzení. Stroj se tedy chová jako paralelní spojení $2p$ stejných zdrojů. Indukované napětí tedy nebude velké, protože napětí zůstane s rostoucím počtem pólů prakticky stejné. Výrazný rozdíl bude v proudu kotvy, který bude narůstat.



Obr. 02-11 Napěťový mnohoúhelník smyčkového vinutí

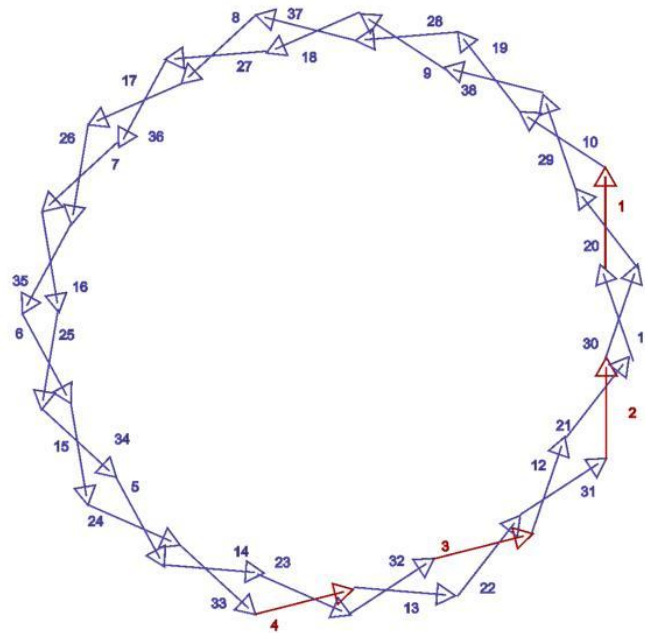
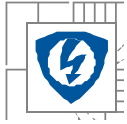
U kříženého smyčkového vinutí vycházíme ze stejné vektorové hvězdice jako u nekříženého, jen jsou spojeny jiné cívky podle opačného komutátorového kroku. To má za následek otočení směru vektorů v napěťovém mnohoúhelníku. Rozložení stran přitom zůstane stejné a proto se změní velikosti indukovaného napětí. Jak ukazuje obr. 02-11.



Obr. 02-12 Napěťový mnohoúhelník smyčkového kříženého vinutí

Polygon napětí vlnového vinutí už nenakreslíme stejně podrobně. Důležité je pro něj, že se stejně jako ve vektorové hvězdici žádné vodiče nepřekrývají což dá vzniknout soustředným kružnicím v počtu pólových dvojic. Způsob jak poskládat polygon napětí je demonstrován právě na složitějším vlnovém vinutí v CD příloze

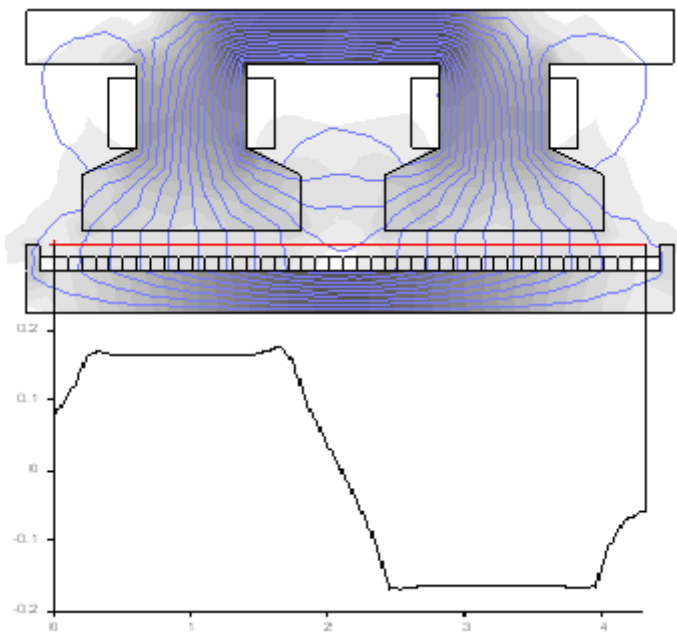
Stavba_pol_nap.avi.



Obr. 02-13 Napěťový mnohoúhelník vlnového vinutí

3 INDUKOVANÉ NAPĚTÍ

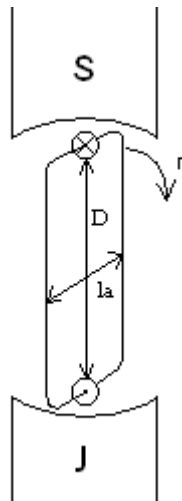
Stejnoseměrný motor je konstruován tak, že jeho budící vinutí tvoří stálé magnetické pole a otáčející se kotva, působením komutátoru vytváří střídavé pole. Průběh magnetického indukce pod budícím polem připomíná svým tvarem lichoběžníkový průběh. Jednoduše ji naznačuje následující obrázek. Je na něm vidět jak vypadá průběh magnetické indukce pod dvěma budícími póly. Ve skutečnosti je magnetická indukce ovlivněna spoustou faktorů, které budeme uvažovat později.



Obr. 03-01 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře

3.1 Odvození indukovaného napětí

Jak vyplývá z Faradayova indukčního zákona (03.01), vzniká změnou magnetického toku v čase elektromotorické napětí. V následujícím textu se pokusíme aplikovat tento zákon na stejnosměrný stroj. Mějme uzavřenou smyčku vloženu mezi dvěma magnety jak ukazuje obr. 03-02. Ta se v poli pohybuje otáčkami „n“.



Obr. 03-02 Pohyb vodiče v magnetickém poli

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (03.01)$$

Protože můžeme předpokládat stálou magnetickou indukci pod póly, upravíme Faradayův indukční zákon na tvar:

$$U_i = -\frac{d(B \cdot S)}{dt} = -\frac{B \cdot d(S)}{dt} \quad (03.02)$$

$$U_i = -\frac{B \cdot dS}{dt} = -\frac{B \cdot (dl_a \cdot x)}{dt} = -\frac{B \cdot l_a \cdot dx}{dt} \quad (03.03)$$

S je průmětnou cívky do roviny kolmé k ose pólů. Délka pólů je stálá. Mění se druhá strana průmětny x .

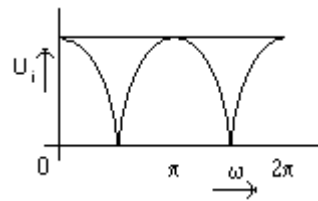
V upravené rovnici je l_a aktivní délkou vodiče v magnetickém poli a $\frac{dx}{dt}$ časová změna vzdálenosti na ose kolmé k ose pólů.

$$x = D \cdot \sin(\omega t) \quad (03.04)$$

$$U_i = -\frac{B \cdot l_a \cdot D \cdot d(\sin(\omega t))}{dt} \quad (03.05)$$

$$U_i = -B \cdot l_a \cdot \omega \cdot D \cdot \cos(\omega t) \quad (03.06)$$

V případě, že bychom měli pouze jedinou cívku (o dvou stranách vinutí), indukovalo by se v kotvě značně nestabilní napětí. Jeho průběh je naznačen na obr. 01-03.



Obr.03-03 Průběh napětí na lamelách komutátoru

Na kotvě však není uložena pouze jediná cívka, ale je na obvodu rozloženo více cívek v drážkách jak jsme určovali během návrhu vinutí. Proto se nám napětí ustálí s nepatrnou odchylkou na maximální hodnotě. Navíc jsou jednotlivé cívky spojené do série, a proto se dílčí napětí sečtou. Přepočítáme-li navíc úhlovou rychlost na častěji zadávané otáčky získáme:

$$U_i = -B \cdot l_a \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot D \cdot n_c : B = \frac{\Phi}{S_b} = \frac{\Phi}{l_a \cdot \pi \cdot D} \quad (03.07)$$

$$U_i = -\Phi \cdot \frac{n}{60} \cdot 2n_c \quad (03.08)$$

Ve skutečnosti jsme právě připravily značně idealizovaný model, protože počítáme se stejným povrchem pro budící póly i kotvu. Skutečný stroj má povrch budících pólů menší než je povrch kotvy, aby se magnetická indukce uzavírala obvodem kotvy a ne jen mezi póly navzájem. Proto Tento rozdíl je označený veličinou alfa, která je poměrnou veličinou mezi oběma povrchy. Její velikost se pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,8.

$$\alpha = \frac{S_b}{S_a} [-; m^2, m^2] \quad (03.09)$$

$$B = \frac{\Phi}{\frac{S_a}{\alpha}} = \alpha \cdot \frac{\Phi}{l_a \cdot \pi \cdot D} \quad (03.10)$$

Tato změna povrchu se projeví změnou magnetického toku, takže vzorec indukovaného napětí zůstane stejný.

$$U_i = -\Phi \cdot \frac{n}{60} \cdot 2n_c \quad (03.11)$$

Záporné znaménko v rovnici je pouze informativního charakteru a proto jej neuvažujeme. Komutátor rozdělí cívky na dvě paralelní, čímž jim sníží celkové napětí na polovinu. Rozšířením na obecný počet pólových dvojic, bude indukované napětí nepřímo úměrné počtu pólových dvojic. Ze vzorce pro derivaci platí, že je indukované napětí přímo úměrné počtu pólových dvojic, protože se zkrátí čas potřebný pro překonání celého cyklu. Výsledný tvar pro indukované napětí je:

$$U_i = \Phi \cdot \frac{2n_c \cdot n}{60} \cdot \frac{2p}{2a} \quad (03.12)$$



Průběh indukovaného napětí se s rostoucím počtem vodičů na obvodu kotvy bude stále více blížit konstantnímu průběhu. Jakým způsobem kolísá indukované napětí v závislosti na čase při různých parametrech, přiblíží model vytvořený v programu Matlab Simulink v CD příloze

Ui(t)/Ind_Nap.m (jeho součástí je i model „Ind_Nap_Mod.mdl“)

Rovnici můžeme také zkráceně napsat ve tvaru

$$U_i = c \cdot \Phi \cdot \omega \quad (03.14)$$

Kde

$$c = \frac{2n_c}{2\pi} \cdot \frac{2p}{2a} \quad (03.15)$$

Jako pomocník s výpočty indukovaného napětí a věcí s ním spojených poslouží generátor příkladů vytvořený v tabulkovém editoru v CD příloze

SS_stroj.xls – záložka „Indukované napětí“

3.1.1 Smyčkové vinutí

Stanovte konstantu motoru. Vinutí kotvy je smyčkové s 304 cívkovými stranami. Jak velké napětí naměříme na kartáčích, roztočíme-li 8 pólový stejnosměrný stroj 1250 otáčkami za minutu je-li velikost magnetické indukce 0,12 T a povrch kotvy 0,25 m² s pólovým krytím 0,78. V každé cívice je navinuto 6 závitů.

Dáno:

$$2n_c = 2 \cdot 304 = 608$$

$$n = 1250 \text{ ot./min}$$

$$S_{Fe} = 0,25 \text{ m}^2$$

$$\alpha = 0,78$$

$$2p = 2a = 8$$

$$B = 0,12 \text{ T}$$

Počítat:

U_i (indukované napětí)

c (konstanta motoru)

Z rovnice určíme konstantu motoru

$$c = \frac{2n_c}{2\pi} \cdot \frac{2p}{2a} = \frac{608}{2\pi} \cdot \frac{8}{8} = 96,77$$

Pro výpočet indukovaného napětí potřebujeme navíc znát magnetický tok a úhlovou rychlost



$$\Phi = \frac{B \cdot S_{Fe}}{\alpha} = \frac{0,12 \cdot 0,25}{0,78} = 0,0385 \text{ Wb}$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2\pi \cdot 1250}{60} = 130,9 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$U_i = c \cdot \Phi \cdot \omega = 96,77 \cdot 0,0385 \cdot 130,9 = 487,68 \text{ V}$$

3.1.2 Vlnové vinutí

Pro podobné zadání jako u předcházejícího příkladu stanovte konstantu motoru a indukované napětí. Tentokrát je vinutí vlnové a počet drážek se zvýšil na 305.

Dáno:

$$2n_c = 2 \cdot 305 = 610$$

$$n = 1250 \text{ ot./min}$$

$$S_{Fe} = 0,25 \text{ m}^2$$

$$\alpha = 0,78$$

$$2p = 8$$

$$2a = 2$$

$$B = 0,12 \text{ T}$$

Počítat:

U_i (indukované napětí)

c (konstanta motoru)

$$c = \frac{2n_c}{2\pi} \cdot \frac{2p}{2a} = \frac{610}{2\pi} \cdot \frac{8}{2} = 387,08$$

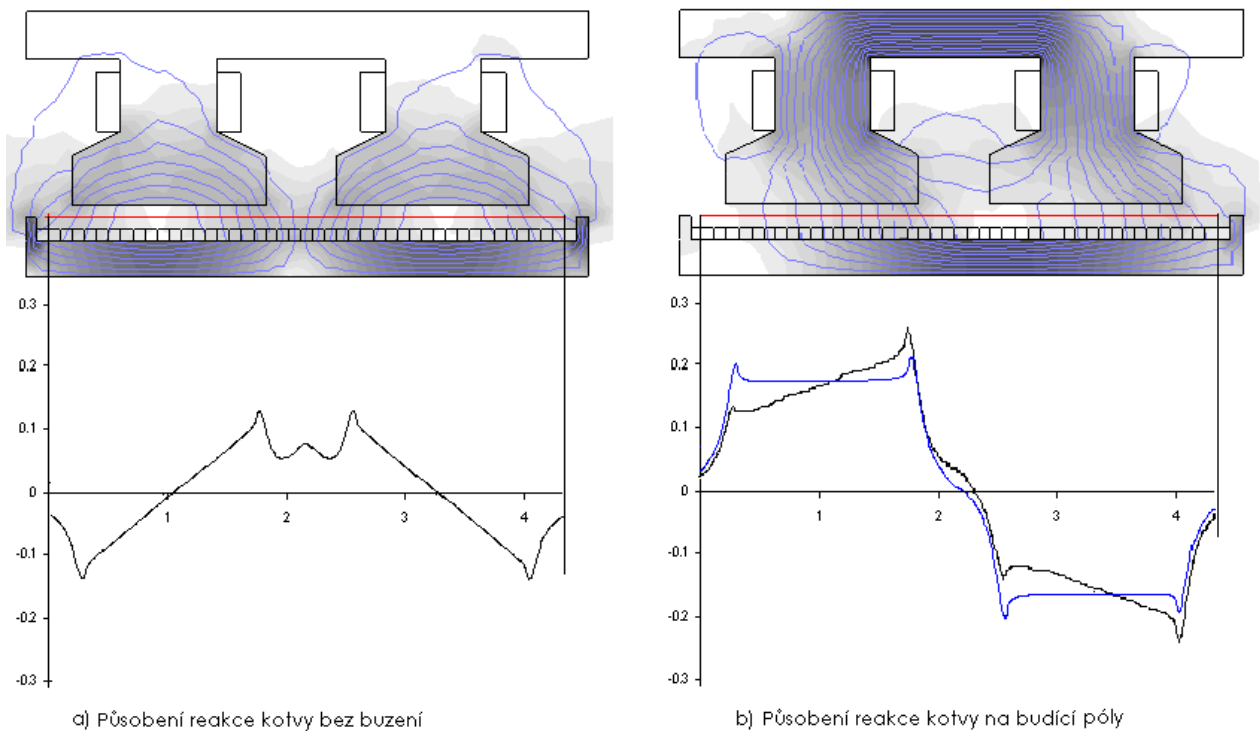
$$\Phi = \frac{B \cdot S_{Fe}}{\alpha} = \frac{0,12 \cdot 0,25}{0,78} = 0,0385 \text{ Wb}$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2\pi \cdot 1250}{60} = 130,9 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$U_i = c \cdot \Phi \cdot \omega = 387,08 \cdot 0,0385 \cdot 130,9 = 1950,75 \text{ V}$$

4 REAKCE KOTVY

Vlivem průchodu proudu se v okolí vodičů kotvy vytváří magnetické pole. Toto pole se sčítá s magnetickým polem budících pólů a natáčí jej. Situaci pod póly naznačuje následující obrázek. Na obrázku a je zachycen průběh magnetické indukce vytvořené proudem tekoucího vinutím kotvy. Na obrázku b je původní průběh magnetické indukce bez zatížení znázorněný modrou a k němu je černou přidán výsledný průběh zatíženého stroje.



Obr.04-01 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře

4.1 Stanovení vlivu reakce kotvy

Pro stanovení velikosti reakce kotvy potřebujeme znát magnetomotorické napětí buzení a kotvy. Jeho velikost se pro zjednodušení udává v ampér závitech na pól. Přímou z jednotky můžeme stanovit magnetomotorické napětí buzení.

$$F_{mb} = N_b \cdot I_b$$

Magnetomotorické napětí kotvy bude složitější, protože musíme přepočítat počet závitů a proud kotvy na jeden pól. Proto vydělíme počet vodičů obvodu kotvy počtem pólů a proud počtem paralelních větví.

$$F_{ma} = \frac{n_c \cdot I_a}{2p \cdot 2a} \quad (04.01)$$

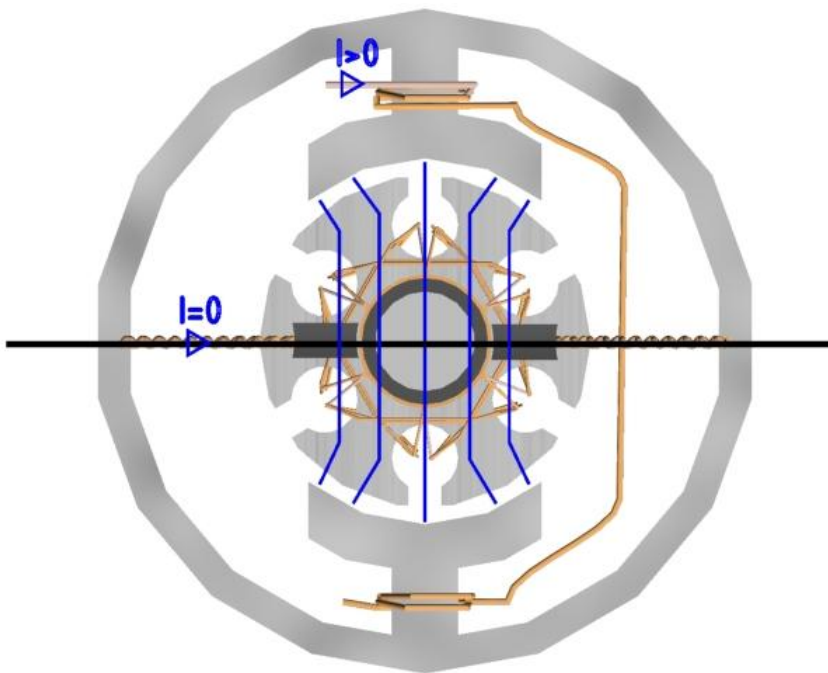
Další důležitou složkou ovlivňující magnetické pole je magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře.

$$F_{mv} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot B \quad (04.02)$$

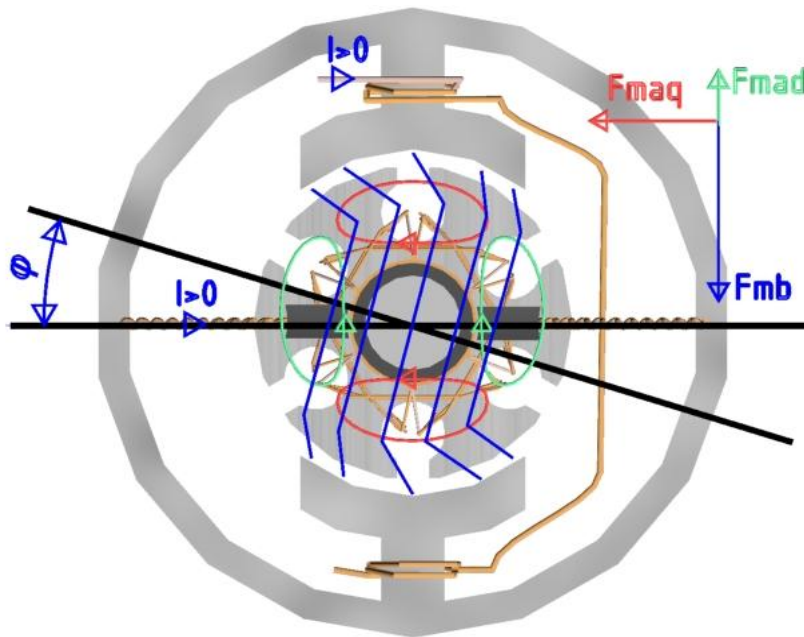
$$F_{mb} = F_{ma} + F_{mv} \quad (04.03)$$

V případě natočení kartáčů se reakce kotvy uplatňuje ve dvou částech kotvy. První je zakryta póly a nazývá se magnetizační účinek reakce kotvy nebo také příčná reakce kotvy. Působí kolmo na magnetické pole budících pólů a natáčí jej. Druhá část je způsobena vodiči mimo působení budících pólů a působí ve směru magnetických siločar, čímž zvyšuje velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Nazývá se demagnetizační účinek reakce kotvy a uplatňuje se ve vodičích, které nejsou překryty póly. Tyto vodiče leží na rozmezí úhlu 2φ , kde φ je úhel natočení neutrální polohy ve směru otáčení u generátoru a proti směru otáčení u motoru. Zadaný mechanický úhel musíme nejprve přepočítat na elektrický podle (02.10) demagnetizační proto, že se zvýšením magnetické indukce zvýší sycení železa a vzrostou i magnetické ztráty.

$$\varphi_{el} = \varphi \cdot \frac{p \cdot 360}{Q} \quad (02.10)$$



Obr. 04-02 Průběh magnetických siločar nezatiženého stroje



Obr. 04-03 Vychýlení původního směru vlivem protékaného proudu kotvou.

Podélná reakce kotvy (působí ve směru magnetických siločar), je vyjádřen magnetomotorickým napětím v nebuzené části motoru, tedy mimo hlavní póly podle upraveného vztahu (04-14).

$$2\varphi_e = (1 - \alpha) \cdot 360 \quad (04.05)$$

$$F_{mad} = \frac{2\varphi_{el}}{360} \cdot \frac{n_c \cdot I_a}{2p \cdot 2a} \quad (04.06)$$

Magnetizační účinek, kterému říkáme příčná reakce kotvy (působí kolmo na magnetické siločáry a natáčí je), je vyvolán druhou částí vodičů kotvy a proto platí:

$$F_{maq} = \left(360 - \frac{2\varphi_{el}}{360} \right) \cdot \frac{n_c \cdot I_a}{2p \cdot 2a} \quad (04.07)$$

Generátor příkladů na výpočty vlivu reakce kotvy je vytvořený v tabulkovém editoru v CD příloze

SS_stroj.xls – záložka „Reakce kotvy“

Animace sledující změnu natočení magnetické neutrály v závislosti na proudu kotvy je vytvořena pomocí 3D Studio MAX a FEM v CD příloze

Reakce_kotvy_0.avi

Stěžejní částí jsou snímky magnetických siločar v pozadí videa. v levém horním rohu je vypočítán úhel mezi magnetickou neutrálou a kolmicí k ose pólu. V pravém horním rohu je soupis veličin a legenda popisující aktuální sycení magnetických částí. V levém dolním rohu je aktuální stav velikosti proudu kotvou vyjádřeného jako podíl k proudu buzení. v pravém dolním rohu je průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře od stavu φ_0 (červený trojúhelník) ve směru hodinových ručiček. Uprostřed je pomocí zelených trojúhelníků naznačena velikost



magnetické indukce. Animace nepopisuje žádný skutečný případ, ale pouze vazby a proto je velikost jednotlivých uvedených (i neuvedených) veličin nepodstatná.

4.1.1 Vliv reakce kotvy

Stanovte, pro šesti pólový sériový generátor pracující při 220V a 110A vliv reakce kotvy. Velikost indukovaného napětí ve vinutí kotvy je 250V. Vinutí kotvy je smyčkové s 440-ti cívkovými stranami. Určete počet závitů kompenzačního vinutí, překrývají-li budící póly 70% povrchu kotvy. Počet závitů budícího vinutí je 80. Průměr kotvy předpokládejte 25 cm a délku kotvy 40 cm. Odhadněte velikost vzduchové mezery pod hlavními póly. Stroj otáčíme konstantními otáčkami 500 ot./min. Kartáče jsou natočeny pod okraje pólů.

Dáno:

$$2p = 6$$

$$U = 220 \text{ V}$$

$$I = 110 \text{ A}$$

$$2n_c = 440$$

$$D = 0,25 \text{ m}$$

$$L_{FE} = 0,4 \text{ m}$$

$$U_i = 260 \text{ V}$$

$$N_b = 80$$

$$n = 500$$

$$\alpha = 0,7$$

Počítat:

F_{mad} (magnetomotorická síla demagnetizační-podélná)

F_{maq} (magnetomotorická síla magnetizační-příčná)

δ (délka vzduchové mezery pod hlavními póly)

Pro výpočet magnetomotorické síly potřebujeme znát velikost magnetického toku. Tu získáme ze vzorce pro indukované napětí.

Pro

$$U_i = c \cdot \Phi \cdot \omega$$

platí:

$$c = 2 \cdot n_c \cdot \frac{2p}{2a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} = 440 \cdot \frac{6}{6} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} = 70,028$$

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

Pak magnetický tok bude mít velikost

$$\Phi = \frac{U_i}{c \cdot \omega} = \frac{260}{70 \cdot 52,36} = 0,071 \text{ Wb}$$



Magnetickou indukci určíme z upraveného vztahu (04-17)

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Plochu, kterou působí pól na vodiče kotvy stanovíme jako násobek pólového krytí, průměru připadajícího jednomu pólu a délky vodiče pod pólem.

$$S = \alpha \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot l_{Fe} = 0,7 \cdot \frac{\pi \cdot 0,25}{6} \cdot 0,4 = 0,0366 \text{ m}^2$$

$$B = \frac{0,071}{0,036} = 1,97 \text{ T}$$

Magnetomotorické napětí kotvy:

$$F_{ma} = \frac{2n_c \cdot I_a}{2p \cdot 2a} = \frac{440 \cdot 110}{6 \cdot 6} = 672,22 \text{ AZ}$$

Magnetomotorické napětí buzení je zadáno přímo v závitech na pól, proto nemusíme toto napětí dělit počtem pólů.

$$F_{mb} = N_b \cdot I_b = 80 \cdot 110 = 8800 \text{ AZ}$$

Když teď dosadíme do rovnice (04-19) můžeme snadno vyjádřit δ

$$F_{mb} = F_{ma} + F_{mv} \Rightarrow F_{mv} = F_{mb} - F_{ma}$$

$$F_{mv} = 8800 - 672 = 8128 \text{ AZ}$$

$$\delta = \frac{F_{mv}}{B} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r = \frac{8128}{1,97} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 = 5,26 \text{ mm}$$

$$2\varphi_e = (1 - \alpha_p) \cdot 360 = (1 - 0,78) \cdot 360 = 108^\circ$$

Demagnetizační účinek, neboli také podélná reakce kotvy:

$$F_{mad} = \frac{2\varphi_{el}}{360} \cdot 672 = \frac{108}{360} \cdot 672 = 201,6 \text{ AZ}$$

Naopak magnetizační účinek reakce kotvy:

$$F_{maq} = \left(360 - \frac{2\varphi_{el}}{360}\right) \cdot 672 = \left(360 - \frac{108}{360}\right) \cdot 672 = 470,4 \text{ AZ}$$

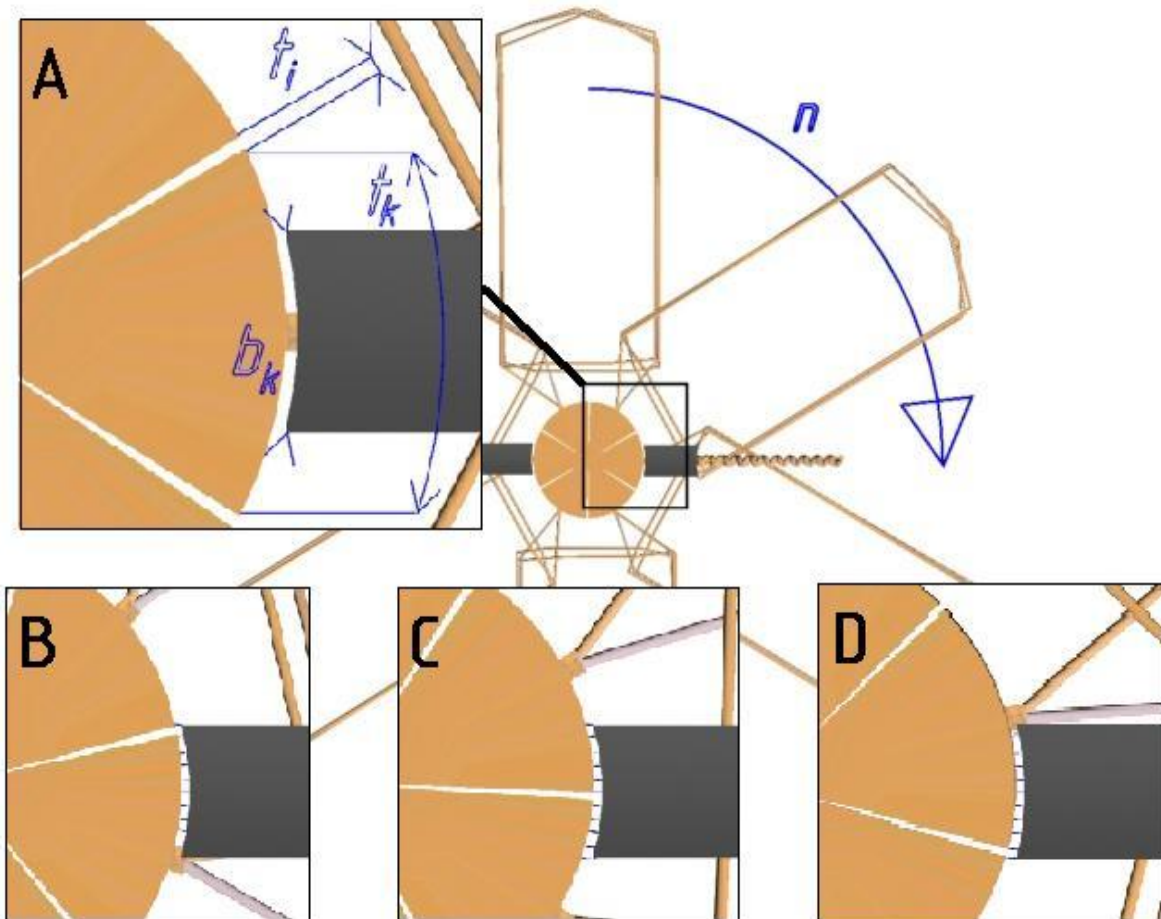
5 KOMUTACE

Během komutace dochází ke zkratování komutující cívky, ve které se vlivem otáčivého pohybu indukují reakční napětí. Toto napětí způsobuje ztráty výkonu ohříváním kartáčů a v horším případě i jiskření a opalování povrchu komutátoru, čímž se výrazně sníží životnost celého stroje. Proto je naším cílem omezit toto napětí na minimum.

5.1 Stanovení reakčního napětí

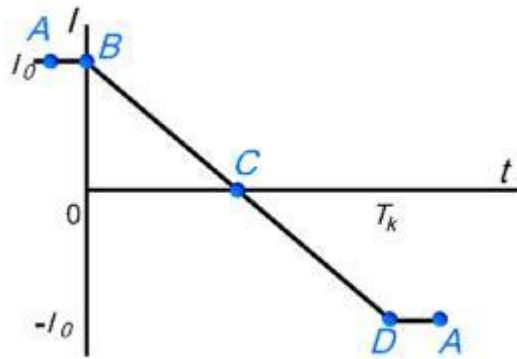
Velikost reakčního napětí vychází z diferenciální rovnice cívky.

$$U_R = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (05.01)$$



Obr. 05-01 Výřez částí komutátoru v časovém sledu

Průběh proudu, který se indukují v cívce závisí na přechodovém odporu komutátoru a sběracího kartáče. V ideálním případě získáme lineární komutaci, které říkáme odporová. Proudová hustota je po celém povrchu komutátoru stejná a proud lineárně přechází z kladné do záporné (popřípadě naopak)



Obr 05-02 průběh proudu lamelou

Obr. 05-02 ukazuje jakým způsobem se bude měnit proud na lamelách komutátoru v závislosti na čase a obr. 05-01 poloha kartáčů ve specifických časech. Okamžik „A“ ukazuje, že se neindukuje žádné napětí, protože derivace proudu je také nulová. V okamžiku „B“ dojde k prvnímu spojení dvou lamel, a proud začne lineárně klesat. „C“ je časem, ve kterém dochází ke změně polarity proudu. U lineární komutace odpovídá jedné polovině celkové doby komutace T_k . Komutace končí v čase T_k tedy v bodu „D“. V tomto čase opouští první lamela kartáče a vedení se účastní pouze druhá lamela. Tento okamžik je také rozhodující pro vznik jiskření. Maximální přístupná hodnota tohoto napětí se pohybuje mezi 18 až 40 volty a závisí na prostředí a použití kompenzačního a komutačního vinutí.

Předpokládáme-li časový počátek komutace v 0s (Obr.05-01B), bude konec v okamžiku T_k (Obr.05-01D). Proud se lineárně mění od $+I$ po $-I$.

$$U_R = L \cdot \frac{2I}{T_k} \quad (05.02)$$

Dobu komutace můžeme určit z obvodové rychlosti pohybující se lamely komutátoru.

$$v = \pi \cdot D_K \cdot \frac{n}{60} \quad (05.03)$$

K tomu ale potřebujeme znát obvodovou délku kartáče přiléhajícího ke komutátoru, která je pro naše zadání rovna šířce lamely.

$$b_k = t_K = \frac{\pi \cdot D_k}{K} - t_i \quad (05.04)$$

Doba komutace je tedy podílem dráhy kterou se lamela s kartáčem dotýkají a rychlosti pohybu lamely.

$$T_K = \frac{b_k - t_i}{v} \quad (05.05)$$



5.1.1 Lineární komutace

Určete reakční napětí komutující cívky. Stejnoseměrný stroj má 52 komutátorových segmentů. Proud tekoucí jedním závitem kotvy je 20A. Průměr komutátoru je 10cm a každý segment je od sousedního oddělený izolací tloušťky 1mm. Jmenovité otáčky stroje jsou 1500 ot./min. Kartáč sběracího ústrojí překrývá celou lamelu komutátoru.

Dáno:

$$\begin{aligned}K &= 36 \\D_K &= 0,1 \text{ m} \\t_i &= 0,001 \text{ m} \\n &= 1500 \text{ ot./min} \\I &= 20 \text{ A}\end{aligned}$$

Počítat:

$$U_r \text{ (Reakční napětí)}$$

Nejprve stanovíme obvodovou rychlost povrchu komutátoru.

$$v = \pi \cdot D_K \cdot \frac{n}{60} = \pi \cdot 0,1 \cdot \frac{1500}{60} = 7,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Dále stanovíme tloušťku kartáče, která se rovná tloušťce lamely.

$$b_k = t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{K} - t_i = \frac{\pi \cdot 0,1}{36} - 0,001 = 7,7 \text{ mm}$$

Teď už nám zbývá určit poslední neznámou a to dobu komutace

$$T_K = \frac{b_k - t_i}{v} = \frac{0,0077 - 0,001}{7,85} = 0,85 \text{ ms}$$

Nyní můžeme dosadit do upravené diferenciální rovnice.

$$U_R = L \cdot \frac{2I}{T_k} = 0,0003 \cdot \frac{2 \cdot 20}{0,00085} = 14,1 \text{ V}$$

Další způsoby komutace jsou přístupné v generátoru průběhů reakčního napětí vytvořeného v programu Matlab Simulink v CD příloze

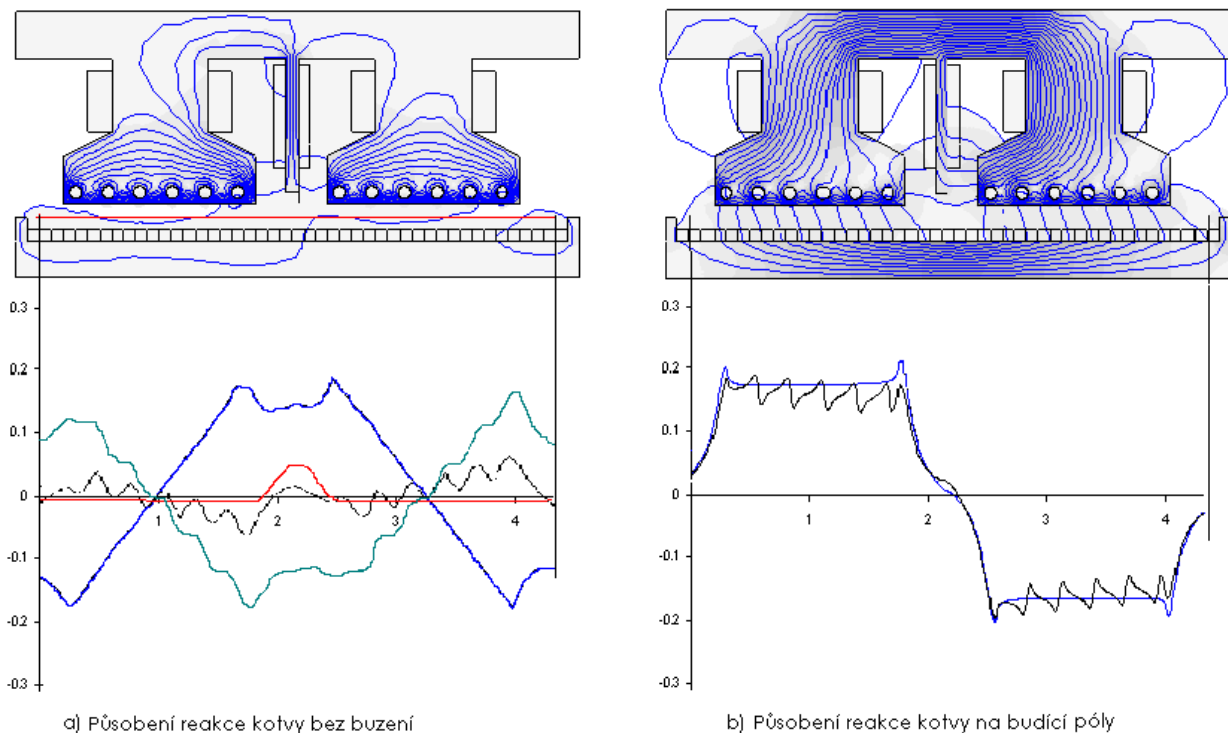
Komutace/Komutace.m (jeho součástí je i model „Komutace_Mod.mdl“)

Model sleduje pohyb kartáče na komutátoru a z jednoduché diferenciální rovnice odečítá velikosti reakčního napětí a proudu kotvy. Jeho funkce je spíše informativního charakteru, protože nedovolí velikosti šířky kartáče převýšit šířku lamely a také pracuje v ideálním režimu bez jiskření, ztrát a nesouměrností.

5.2 Zlepšení komutace

Už jsme zmínili, že proud indukovaný na cívce nemá ve skutečnosti lineární průběh. V našem případě nebereme ohledy na sycení železa během magnetizace a zároveň předpokládáme, že se kartáče nachází v magnetické neutrále. Také předpokládáme, že změna proudové hustoty na povrchu lamely je lineárně závislá na pohybu kartáče nad komutátorem. Přesnější informace k tomuto problému jsou uvedeny v knize Profesora Jana Bašty v kapitole 7.1 [1]. Nepříznivý vliv komutace se dá zmírnit použitím kříženého vinutí, kde se v komutující cívce indukují na každé straně vinutí opačné směry reakčního napětí. Dalším způsobem jak toto napětí omezit je natočení kartáčů do tzv. „neutrální polohy“, kde je nejmenší možný magnetický tok. Toto natočení se však používá pouze pro malé výkony. Vlivem natočení kartáčů totiž dochází k posunutí i v diferenciální rovnici pro indukované napětí, čímž snížíme jeho velikost, a zvýšíme kolísání napětí, které zapříčiní nestabilní chod stroje (kap.3.1). Navíc je natočení neutrální polohy pro každé zatížení jiné, protože je i jiný vliv reakce kotvy. Neutrální poloha kartáčů je kolmá k ose magnetických siločar. Proto ji můžeme určit stejně jako vliv reakce kotvy, jen budeme vycházet z výsledného pole celého stroje.

Dalším způsobem jak omezit vznik reakčního napětí je přiložení opačného pole. Toho dosáhneme použitím komutačního vinutí, nebo kompenzačního vinutí. V obou vinutích se vytváří magnetomotorické napětí opačné k magnetizačnímu magnetomotorickému napětí kotvy, čímž se obě napětí vyruší.



Obr. 05-03 Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Na obr. 05-03a jsou znázorněny všechny vstupující složky. Modře je znázorněn průběh reakce kotvy, červeně vliv komutačního vinutí a zeleně kompenzačního vinutí. Součet zúčastněných vlivů je zaznamenán černou barvou. Na obrázku b je černě výsledný průběh magnetické indukce a modře průběh magnetické indukce nezatíženého stroje. Z průběhu je zřejmé, že je má každé



vinutí na starost jinou část reakce kotvy a k ní musíme při návrhu přihlížet. Kompenzační vinutí odbourává magnetizační reakci kotvy. Proto bude platit v následujících rovnicích $F_m = F_{maq}$. Komutační vinutí odbourává demagnetizační reakci, a proto bude platit $F_m = F_{mad}$. Opět vystačíme s aplikací vlastností elektrického obvodu na magnetický. Pro magnetomotorické napětí pomocného vinutí bude platit:

$$F_{mpv} = F_m + F_{mv} \quad (05.06)$$

Magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře již známe z odvozování reakce kotvy.

$$F_{mv} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot B \quad (05.07)$$

Počet závitů pomocného vinutí získáme zpětně z definice magnetomotorického napětí.

$$N_{pv} = \frac{F_{pv}}{I} \quad (05.08)$$

Animace sledující změnu natočení magnetické neutrály v závislosti na proudu kotvy, s použitím pomocných pólů je vytvořena pomocí 3D Studio MAX a FEMM v CD příloze

Reakce_kotvy_s_P_P.avi

A animace sledující změnu natočení magnetické neutrály v závislosti na proudu kotvy, s použitím kompenzačního vinutí je vytvořena pomocí 3D Studio MAX a FEMM v CD příloze

Reakce_kotvy_s_K_V.avi

5.2.1 Nastavení neutrální polohy

Pro zadání z příkladu v kapitole 4.1 určete jak musíme natočit kartáče sběracího ústrojí, abychom dosáhli nejpříznivějších podmínek pro komutaci

Dáno:

$$F_{mad} = 201,6 \text{ AZ}$$

$$F_{maq} = 470,4 \text{ AZ}$$

$$F_{mb} = 8800 \text{ AZ}$$

$$2p = 6$$

Počítat:

$$\beta \text{ (obecný úhel natočení)}$$

Stačí nám vypočítat výsledné natočení magnetických siločar nejprve v náhradním dvoupólovém stroji, protože jsou i velikosti magnetomotorických napětí jsou počítány pod jedním pólem. Z toho co víme o magnetomotorickém napětí vytvoříme pravoúhlý trojúhelník a vypočítáme úhel svírající osa pólů s přeponou.

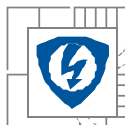
$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{F_{maq}}{F_{mb} + F_{mad}} = \frac{470,4}{8800 + 201,6} = 0,435$$



$$\beta' = 23,5$$

Toto natočení by bylo výsledkem pro dvou pólový stroj, ale náš stroj je šesti pólový a proto tento úhel vydělíme počtem pólových dvojic.

$$\beta = \frac{\beta'}{p} = 7.83$$



6 ZTRÁTY A ÚČINNOST

Stejně jako v ostatních zařízeních i ve stejnosměrném stroji vznikají ztráty. Ty se rozdělují na ztráty elektrické, mechanické a magnetické. Ztráty elektrické vznikají na elektrických prvcích obvodu. Patří zde ztráty na budícím vinutí, vinutí kotvy, kompenzačním vinutí a vinutím pomocných pólů. Ty určujeme jako násobek odporu dané části a druhé mocniny proudu, který jím protéká.

6.1 Stanovení účinnosti

Odpor kotvy určíme jako paralelní kombinací $2a$ větví, složených z y_d do série zapojených cívek o N závitů. Odpor jednoho závitu bude:

$$R_N = \rho \cdot \frac{l_N}{S_N} \quad (06.01)$$

Drážkový krok stanovíme úpravou vztahů (02.04) a (02.01).

$$y_{d1} = \frac{Q}{2p} \quad (06.02)$$

Odpor jedné paralelní větve stanovíme jako součin počtu všech závitů v jedné větvi a jejich dílčích odporů.

$$R_p = R_N \cdot N \cdot y_{d1} \quad (06.03)$$

Počet paralelních větví je u smyčkového vinutí roven počtu pólů.

$$2a = 2p \quad (06.04)$$

Výsledný odpor kotvy vychází z paralelní kombinace sériových větví.

$$R_a = \frac{R_p}{2a} \quad (06.05)$$

Sloučením vztahů (06.01) až (06.05) získáme rovnici kterou následně upravíme:

$$R_a = \frac{\rho \cdot \frac{l_N}{S_N} \cdot N \cdot \frac{Q}{2p}}{2a} = \rho \cdot N \cdot \frac{l_N}{S_N} \cdot \frac{Q}{2p \cdot 2a} \quad (06.06)$$

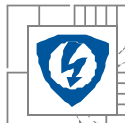
Odpor budícího vinutí je dán $2p$ cívkami s N závity stejně jako odpor kompenzačního vinutí a odpor pomocných pólů.

$$R_b = R_N \cdot N \cdot 2p \quad (06.07)$$

Při sériovém zapojení generátoru je proud kotvy roven budícímu proudu a odebíranému proudu. Proto stanovíme celkový odpor generátoru a podle Ohmova zákona tyto proudy vypočteme.

$$R_s = R_a + R_b + R_z \quad (06.08)$$

$$\Delta P = I^2 \cdot R \quad (06.09)$$



Mechanické ztráty vznikají na točivých částech stroje a jsou uváděny jako podíl výstupního momentu (pro motor je to motor na hřídeli a generátor elektrický moment) a vstupního (pro motor je to elektrický moment a generátor moment na hřídeli).

$$\eta_m = \frac{M_2}{M_1} \quad (06.10)$$

Magnetické ztráty se vyjadřují podílem magnetických ztrát a elektrických. Velikost tohoto poměru se pohybuje od 0,3 do 0.6.

$$\Delta\eta_{mag} = \frac{\Delta P_{mag}}{\Delta P_{el}} \quad (06.11)$$

Celková účinnost je dána podílem vstupujícího výkonu a výstupního. U motoru je vstupním výkonem výkon na svorkách daný napájecím napětím a napájecím proudem a výstupním mechanický výkon na hřídeli. U generátoru je tomu naopak.

Podle obecných vzorců pro výkon stanovíme příkon, výkon a účinnost motoru.

$$P_2 = \frac{M}{\omega} \quad (06.12)$$

$$P_1 = U \cdot I_z \quad (06.13)$$

$$\eta_s = \frac{P_2}{P_1} \quad (06.14)$$

Celkové ztráty jsou dány součtem všech dílčích ztrát.

6.2 Moment motoru

Při odvozování momentu motoru vycházíme ze síly, kterou působí vzájemná interakce polí vodiče kotvy a buzení. Tato síla tlačí před sebou vodič do energeticky nižší oblasti.

Na jeden vodič délky l a magnetickém poli působí síla:

$$F_1 = B \cdot I \cdot l \quad (06.15)$$

Na obvodu kotvy je celkem $2n_c$ vodičů a α z nich leží současně v magnetickém poli. Zároveň je proud kotvy rozdělený na $2a$ paralelních větví.

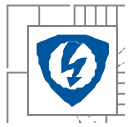
$$F_1 = B \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot l_{Fe} \cdot \alpha \cdot 2n_c \quad (06.16)$$

Vynásobením této síly s ramenem na kterém působí získáme točivý moment. Ramenem je zde poloměr kotvy.

$$M = \frac{D}{2} \cdot F = \frac{D}{2} \cdot B \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot l_{Fe} \cdot \alpha \cdot 2n_c \quad (06.17)$$

Magnetický tok je dán magnetickou indukcí pod budícím pólem.

$$\Phi = B \cdot S = B \cdot l_{Fe} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2 \cdot 2p} \cdot \alpha \quad (06.18)$$



Vyjádřením magnetické indukce a dosazením do rovnice momentu získáme výsledný tvar pro moment motoru.

$$B = \frac{2 \cdot 2p \cdot \Phi}{l_{Fe} \cdot 2 \cdot \pi \cdot D \cdot \alpha} \quad (06.19)$$

$$M = \frac{D}{2} \cdot \frac{2 \cdot 2p \cdot \Phi}{l_{Fe} \cdot 2 \cdot \pi \cdot D \cdot \alpha} \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot l_{Fe} \cdot \alpha \cdot 2n_c = \frac{2p \cdot 2n_c}{2a \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \Phi \cdot I_a \quad (06.20)$$

Rovnici můžeme dále upravit použitím již odvozené konstanty motoru

$$c = \frac{2p \cdot 2n_c}{2a \cdot 2 \cdot \pi} \quad (06.21)$$

$$M = c \cdot \Phi \cdot \omega \quad (06.22)$$

6.2.1 Sériový motor

Stanovte moment stejnosměrného sériového motoru napájeného stejnosměrným napětím 260 V. Motor je čtyř-pólový a má 294 cívkových stran. Otáčí se 1500 otáčkami za minutu. Dále pak vypočítejte ztráty elektrické v jednotlivých prvcích obvodu předpokládáte-li odpor budícího vinutí 0,013Ω, odpor kompenzačního vinutí 0,01Ω, a odpor pomocných pólů 0,02Ω. Úbytek napětí na kartáčích je 2V. Vinutí kotvy je vlnové, vyrobeno z mědi o průřezu 16mm² a má 4 závity. Průměrná délka jednoho závitu je 1,2m.

Dáno

$$U = 260 \text{ V}$$

$$2n_c = 4 \cdot 294 = 1176$$

$$n = 1500 \text{ ot./min}$$

$$l_N = 1,2 \text{ m}$$

$$S_N = 16 \text{ mm}^2$$

$$R_B = 0,013 \text{ } \Omega$$

$$R_{pp} = 0,02 \text{ } \Omega$$

$$\Phi = 0,00391 \text{ Wb}$$

Počítat

M (moment)

P_e (elektrické ztráty)

P_a (ztráty ve vinutí kotvy)

P_b (ztráty budícího vinutí)

P_{pp} (ztráty ve vinutí pomocných pólů)

P_{kv} (ztráty v kompenzačním vinutí)

P_k (ztráty na kartáčích)



Nejprve určíme vstupní veličiny potřebné k výpočtu ztrát a momentu. První je odpor vinutí kotvy.

$$R_a = \rho \cdot \frac{l_N}{S_N} \cdot \frac{n_c}{(2a)^2} = 0,0178 \cdot \frac{1,2}{16} \cdot \frac{1176}{2^2} = 0,196 \Omega$$

Dalším je indukované napětí

$$U_i = \frac{\Phi \cdot 2 \cdot n_c \cdot n}{60} \cdot \frac{2p}{2a} = \frac{0,0039 \cdot 1176 \cdot 1500}{60} \cdot \frac{4}{2} = 229,32 \text{ V}$$

A nakonec proud tekoucí kotvou.

$$I_a = \frac{(U - U_i - U_k)}{R_a + R_b + R_k + R_{pp}} = \frac{(260 - 229,32 - 2)}{0,196 + 0,013 + 0,01 + 0,02} = 120 \text{ A}$$

Nyní můžeme stanovit výkonové ztráty na jednotlivých částech stroje.

Ztráty na vinutí kotvy:

$$\Delta P_a = R_a \cdot I_a^2 = 0,196 \cdot 120^2 = 2822,4 \text{ W}$$

Ztráty na budícím vinutí:

$$\Delta P_b = R_b \cdot I_a^2 = 0,013 \cdot 120^2 = 187,2 \text{ W}$$

Ztráty na pomocných pólech:

$$\Delta P_{pp} = R_{pp} \cdot I_a^2 = 0,02 \cdot 120^2 = 288 \text{ W}$$

Ztráty na kompenzačním vinutí:

$$\Delta P_{kv} = R_k \cdot I_a^2 = 0,01 \cdot 120^2 = 144 \text{ W}$$

Ztráty na komutátoru:

$$\Delta P_k = \Delta U_k \cdot I_a = 2 \cdot 120 = 240 \text{ W}$$

Celkové elektrické ztráty:

$$\Delta P_e = \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_{pp} + \Delta P_{kv} + \Delta P_k = 2822,4 + 187,2 + 288 + 144 + 240 = 3741 \text{ W}$$

Moment motoru bude:

$$M = \frac{U_i \cdot I_a}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = 60 \cdot \frac{229,32}{2 \cdot \pi \cdot 1500} \cdot 120 = 176,19 \text{ Nm}$$



6.2.2 Derivační generátor

Stanovte účinnosti derivačního generátoru, připojeného k zátěži $1\text{k}\Omega$. Generátor je šesti-pólový s nekříženým smyčkovým vinutím o 18-ti drážkách. Otáčíme jím rychlostí 500 otáček za minutu. Vinutí kotvy je vyrobeno z mědi o průřezu $0,5\text{mm}^2$ s 10 závity. Průměrná délka jednoho závitu je 600 mm. Budící vinutí má odpor $100\ \Omega$ a vytváří magnetický tok o velikosti 10mWb . Generátor napájí zátěž $1\text{k}\Omega$.

Dáno

$$\begin{aligned}2p &= 6 \\ Q &= 18 \\ n &= 500\text{ot}/\text{min}-1 \\ l_N &= 0,6\text{m} \\ S_N &= 0,5\text{mm}^2 \\ R_B &= 100\Omega \\ N &= 10Z \\ R_Z &= 1000\Omega \\ \Phi &= 0,01\text{Wb}\end{aligned}$$

Počítat

$$\begin{aligned}P_1 &(\text{příkon derivačního generátoru}) \\ P_2 &(\text{výkon derivačního generátoru}) \\ \eta &(\text{účinnost derivačního generátoru})\end{aligned}$$

Z tabulek určíme měrný odpor mědi a vypočteme odpor vinutí kotvy.

$$\rho = 0,0178\Omega \cdot \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$$

$$R_a = \rho \cdot N \frac{l_N}{S_N} \cdot \frac{Q}{(2p)^2} = 0,0178 \cdot 10 \frac{0,6}{0,5} \cdot \frac{18}{(6)^2} = 0,107\Omega$$

Pro indukované napětí potřebujeme znát počet stran, který následně dosadíme do rovnice pro indukované napětí.

$$2n_c = 2 \cdot Q \cdot N = 2 \cdot 18 \cdot 10 = 360 \text{ vodičů}$$

$$U_i = \frac{\Phi \cdot 2n_c \cdot n}{60} \cdot \frac{2p}{2a} = \frac{0,01 \cdot 360 \cdot 500}{60} \cdot \frac{6}{6} = 30\text{V}$$

Protože je u dynama jediným zdrojem kotva, která generuje indukované napětí můžeme snadno vypočítat proud kotvy z celkového odporu v obvodu kotvy. Pro derivační dynamo platí:

$$R = R_a + \frac{R_b \cdot R_Z}{R_b + R_Z} = 0,1068 + \frac{100 \cdot 1000}{100 + 1000} = 91,02\Omega$$

$$I_a = \frac{U_i}{R} = \frac{30}{91,02} = 0,33\text{A}$$

Pro výpočet svorkového napětí musíme znát ještě úbytek na odporech zapojených do série s kotvou. Z našeho zadání vyplývá, že je takovým odporem je pouze odpor kotvy.



$$U_a = I_a \cdot R_a = 0,326 \cdot 1,068 = 0,11\text{V}$$

$$U_z = U_i - U_a = 30 - 0,348 = 29,89\text{V}$$

Mechanický příkon, který dodáváme generátoru je:

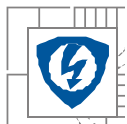
$$P_1 = U_i \cdot I_a = 30 \cdot 0,33 = 9,9\text{W}$$

Elektrický výkon, který dodáváme z generátoru zátěži je:

$$P_2 = \frac{U_z^2}{R_z} = \frac{29,89^2}{1000} = 0,9\text{W}$$

Celková účinnost tedy bude:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{0,9}{9,9} = 0,091$$



7 VLASTNOSTI STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ

Vlastnosti stejnosměrných strojů nejlépe vystihují jeho charakteristiky. U dynamu sledujeme závislost svorkového napětí na zatěžovacím proudu. Nazýváme ji zatěžovací charakteristika. Sleduje se při konstantních otáčkách stejně jako magnetizační charakteristika, která je dána závislostí svorkového napětí na budícím proudu. U motoru sledujeme změnu rychlosti při konstantním buzení. Závislost rychlosti otáčení na proudu nazýváme rychlostní (otáčkovou) charakteristikou. Momentová charakteristika zase popisuje závislost momentu na proudu. Spojením těchto charakteristik můžeme vytvořit mechanickou charakteristiku, tedy závislost momentu na rychlosti otáčení.

Vlastnosti stejnosměrných strojů závisí na způsobu připojení budícího vinutí k ostatním částem stroje. Budeme-li budící vinutí napájet z cizího zdroje, vytvoříme stroj s cizím buzením. Připojíme-li budící vinutí paralelně vytvoříme derivační stroj a spojíme-li budící vinutí do série s kotvou, vznikne sériový stroj. Navinutím více cívek na budící pól můžeme tyto možnosti různě kombinovat. V takovém případě mluvíme o kompaudovaném stroji.

Cize buzený stroj si žádá vlastní napájecí zdroj a proto se s ním v praxi setkáme jen zřídka. Protože je jeho buzení připojeno mimo obvod kotvy, může stroj pracovat nezávisle na zatížení. Jako generátor pracuje stejně jako zdroj napětí s vysokým vnitřním odporem. V případě motoru nám budou otáčky motoru jen mírně klesat s rostoucím proudem.

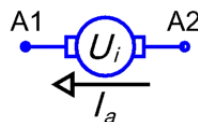
Charakteristiky derivačního stroje jsou podobné stroji s cizím buzením. Zatěžovací charakteristika je zpočátku podobná cize buzenému generátoru, avšak při určité velikosti proudu přejde generátor do nestabilní oblasti a již dále neporoste, ale naopak začne klesat. Generátor se tímto sám ochrání před zkratovým proudem. Tento jev je způsoben paralelním spojením buzení se zátěží. Při malém proudu do zátěže bude odpor budícího vinutí větší než odpor zátěže a proto bude buzení generovat přibližně konstantní napětí. Jakmile klesne odpor zátěže pod kritickou mez, bude budící proud tak malý, že už nebude schopný dále budit napětí a obvodem začne protékat zbytkový proud způsobený zbytkovým napětím – svorkové napětí však bude nulové. Derivační motor Je má charakteristiky stejné jako cize buzený motor, protože můžeme předpokládat, že napájecí zdroj bude dodávat stálý proud jak obvodu kotvy, tak i buzení.

Sériový generátor se prakticky nevyužívá, protože nedokáže dodávat konstantní napětí aby mohl být adekvátním zdrojem místo derivačního nebo cize buzeného dynamu. Nehodí se ani jako regulační zdroj, protože jsou jeho zatěžovací charakteristiky značně nelineární. Posledním místem, kde se mohly uplatnit byla trakce, kde se využívaly pro brzdění přepólováním motoru. Zde je však postupně nahrazují třífázové motory. Mechanická charakteristika sériového motoru je podobná hyperbole. Proto můžeme říci, že s klesajícím momentem (zatížením) prudce rostou otáčky. Odtud vyplývá, že nesmíme motor odlehčit, protože se nám roztočí a hrozí mu mechanické poškození.

Kompaudované stroje jsou výjimečné svými vlastnostmi, protože můžeme poskládat potřebné průběhy charakteristik tak jak potřebujeme. Vyhneme se tím všech nepříjemností spojených s dílčími stroji jako jsou nebezpečí poškození sériového motoru odlehčením, nebo nepříznivého účinku zkratového proudu u cize buzeného generátoru. Navíc můžeme vhodným nastavením poměru buzení docílit stabilnější zatěžovací charakteristiky.

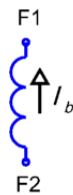
7.1 Základní pojmy

Při výpočtu vycházíme z obvodového schématu typického pro požadovaný stroj. Pro kreslení obvodových schémat byly stanoveny způsoby označení jednotlivých částí stroje. Pro označení se používá písmeno označující část stroje a číslo určující začátek a konec části. Proud v takto označeném schématu teče od dvojky k jedničce. Kotva je považována za hlavní část obvodu a kreslí se ve schématech podle obrázku 00-00. Označuje se písmenem „A“. V některých případech je schéma ještě doplněno směrem otáčení kotvy

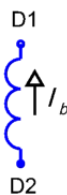


Obr. 07-01 Schématická značka kotvy

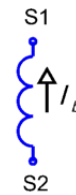
Další důležitou částí je buzení, které kreslíme kolmo na kotvu a značíme jej písmeny „D“, „S“ a „F“. Každé písmeno zastupuje jiný způsob připojení buzení ke zdroji napětí.



a) cizí buzení



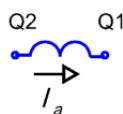
b) derivační buzení



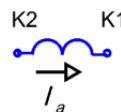
c) sériové buzení

Obr. 07-02 Schématická značka budícího vinutí

V případě, že je ve stroji použito pomocných pólů a nebo kompenzačního vinutí, označíme je písmeny „Q“ a „K“. protéká jimi stejný proud jako kotvou a proto budou ležet vodorovně se schématickou značkou kotvy.



a) pomocné póly



b) kompenzační vinutí

Obr. 07-03 Schématická značka pomocných vinutí

7.1.1 Charakteristiky cize buzeného motoru

Nakreslete rychlostní a momentovou charakteristiku obecného stejnosměrného motoru s cizím buzením. Při výpočtu zanedbejte vliv reakce kotvy a přesycení železa. Předpokládejte, že se jedná o běžný stroj bez pomocného a kompenzačního vinutí.

Počítat:

$$n=f(I_b)$$

$$M=f(n)$$



Pro nakreslení charakteristiky musíme najít vztah mezi otáčkami a proudem. K tomu použijeme Kyrchhoffovy zákony.

$$U = U_i + R_a \cdot I_a \quad (07.01)$$

$$U_i = c \cdot \Phi \cdot \omega \quad (07.02)$$

Sloučíme rovnice (07.01) a (07.02)

$$U = c \cdot \Phi \cdot \omega + R_a \cdot I_a \quad (07.03)$$

a odtud vyjádříme otáčky motoru:

$$U - (R_a + R_b) \cdot I_a = \frac{c \cdot \Phi \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (07.04a)$$

Magnetický tok můžeme považovat za konstantní, protože je proud buzením pro všechna zatížení stejný.

$$n = 60 \cdot \frac{U - R_a I_a}{c \cdot \Phi \cdot 2 \cdot \pi} \quad (07.04)$$

Moment motoru je dán jako podíl výkonu k úhlové rychlosti. Výkon je násobkem napětí a proudu kotvy. Po úpravách získáme

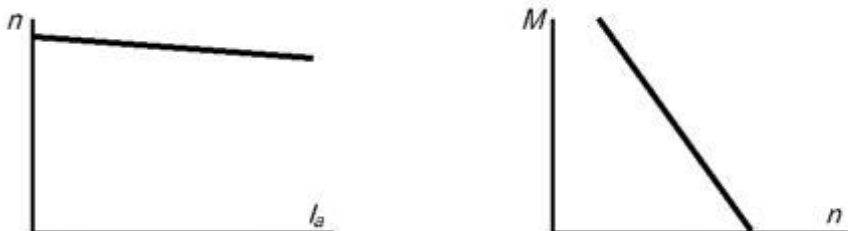
$$M = \frac{U_i \cdot I_a}{\omega} = c \cdot \Phi \cdot I_a \quad (07.05)$$

Sloučením vztahu (07.04) a (07.05) stanovíme závislost momentu na otáčkách.

$$M = c \cdot \Phi \cdot I_a \quad (07.06)$$

$$I_a = \frac{U - c \cdot \Phi \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot R_a} \quad (07.07)$$

$$M = c \cdot \Phi \cdot \frac{U - c \cdot \Phi \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot R_a} = \frac{c \cdot \Phi \cdot U - c^2 \cdot \Phi^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot R_a} \quad (07.08)$$



Obr 07-04 Charakteristiky cize buzeného motoru

7.1.2 Charakteristiky derivačního motoru

Nakreslete rychlostní a momentovou charakteristiku obecného stejnosměrného sériového motoru. Při výpočtu zanedbejte vliv reakce kotvy a přesycení železa. Předpokládejte, že se jedná o běžný stroj bez pomocného a kompenzačního vinutí.

Počítat:

$$n=f(I_b)$$

$$M=f(n)$$

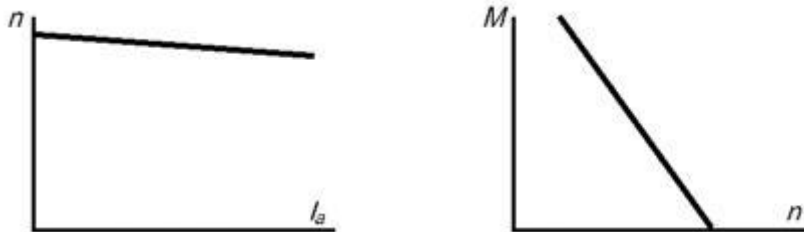
Protože ve většině výpočtů neznáme magnetický tok, použijeme ekvivalentního přepočtu z lineární závislosti magnetického toku na budícím proudu.

$$\Phi = k \cdot I_b \quad (07.09)$$

Buzení je připojeno k napájecímu napětí a proto je možné jej považovat za konstantní. Proto budou charakteristiky derivačního motoru přibližně stejné jako u cize buzeného.

$$n = 60 \cdot \frac{U - R_a \cdot I_a}{c \cdot \Phi \cdot 2 \cdot \pi} \quad (07.10)$$

$$M = \frac{c \cdot \Phi \cdot U - c^2 \cdot \Phi^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot R_a} \quad (07.11)$$



Obr 07-05 Charakteristiky derivačního motoru

7.1.3 Charakteristiky sériového motoru

Nakreslete rychlostní a momentovou charakteristiku obecného stejnosměrného sériového motoru. Při výpočtu zanedbejte vliv reakce kotvy a přesycení železa. Předpokládejte, že se jedná o běžný stroj bez pomocného a kompenzačního vinutí.

Počítat:

$$n=f(I_b)$$

$$M=f(n)$$

Opět musíme stanovit rovnici elektrického obvodu, sloučit ji s rovnicí pro indukované napětí a vyjádřit rovnici pro otáčky motoru.

$$U = U_i + R_a \cdot I_a + R_b \cdot I_a \quad (07.12)$$

$$U - (R_a + R_b) \cdot I_a = c \cdot \Phi \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (07.13)$$

$$n = 60 \cdot \frac{U - (R_a + R_b) \cdot I_a}{c \cdot \Phi \cdot 2 \cdot \pi}$$

$$n = 60 \cdot \frac{U - (R_a + R_b) \cdot I_a}{c \cdot k \cdot I_a \cdot 2 \cdot \pi} = 60 \cdot \frac{U}{c \cdot k \cdot I_a \cdot 2 \cdot \pi} - 60 \cdot \frac{R_a + R_b}{c \cdot k \cdot 2 \cdot \pi}$$

Protože ve většině výpočtů neznáme magnetický tok, použijeme ekvivalentního přepočtu z lineární závislosti magnetického toku na budícím proudu.

$$\Phi = k \cdot I_a$$

$$n = 60 \cdot \frac{U - (R_a + R_b) \cdot I_a}{c \cdot k \cdot I_a \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot U}{c \cdot k \cdot I_a \cdot 2 \cdot \pi} - 60 \cdot \frac{R_a + R_b}{c \cdot k \cdot 2 \cdot \pi}$$

Momentovou charakteristiku získáme dosazením za proud kotvy.

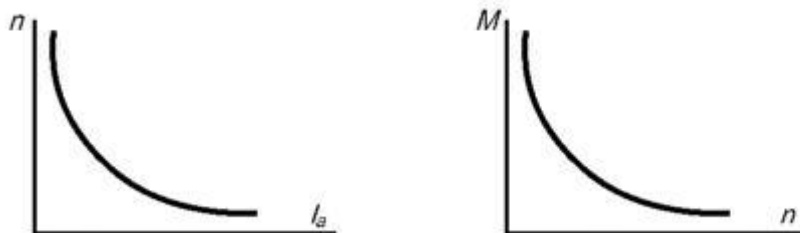
$$M = \frac{U_i \cdot I_a}{\omega} = c \cdot \Phi \cdot I_a = c \cdot k \cdot I_a \cdot I_a \quad (07.14)$$

Sloučíme rovnice momentu a otáček abychom získaly závislost momentu na otáčkách.

$$M = c \cdot \Phi \cdot I_a^2 \quad (07.15)$$

$$I_a = \frac{U}{c \cdot k \cdot n + R_a + R_b} \quad (07.16)$$

$$M = c \cdot \Phi \cdot \left(\frac{U}{c \cdot k \cdot n + R_a + R_b} \right)^2 \quad (07.17)$$



Obr 07-06 Charakteristiky sériového motoru

7.1.4 Zatěžovací charakteristika sériového generátoru

Určete zatěžovací charakteristiku obecného stejnosměrného generátoru. Při výpočtu zanedbejte vliv reakce kotvy a přesycení železa. Předpokládejme, že se jedná o běžný stroj bez pomocného a kompenzačního vinutí.

Počítat:

$$U = f(I_a)$$

Stejně jako u motoru musíme stanovit rovnici obvodu. Na rozdíl od motoru bude indukované napětí zdrojem a napětí na svorkách výsledkem činnosti generátoru..

$$U_i = U + R_a \cdot I_a + R_b \cdot I_a \quad (07.17)$$

$$U_i = c \cdot \Phi \cdot \omega \quad (07.18)$$

začneme sloučením rovnic (07.17) a (07.18)

$$c \cdot \Phi \cdot \omega = U + R_a \cdot I_a + R_b \cdot I_a \quad (07.19)$$

a odtud vyjádříme napětí na zátěži:

$$U = c \cdot \Phi \cdot \omega - (R_a + R_b) \cdot I_a \quad (07.20)$$

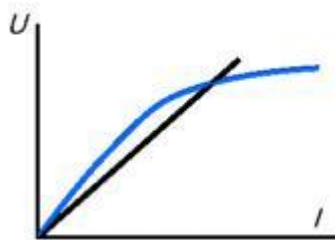
Magnetický tok nahradíme proudem kotvy podle rovnice:

$$\Phi = k \cdot I_a \quad (07.21)$$

$$U = c \cdot k \cdot I_a \cdot \omega - (R_a + R_b) \cdot I_a \quad (07.22)$$

Pro sériový motor platí, že se rovná proud zátěži proudu kotvy a proto je výsledná závislost dána:

$$U = (c \cdot k \cdot \omega + R_a + R_b) \cdot I_z \quad (07.23)$$



Obr 07-07 Charakteristika sériového dynama

Černý průběh ukazuje vypočítané napětí a modrý charakteristiku skutečného stroje.

7.1.5 Zatěžovací charakteristika generátoru s cizím buzením

Určete zatěžovací charakteristiku obecného stejnosměrného generátoru s cizím buzením. Při výpočtu zanedbejte vliv reakce kotvy a přesycení železa. Předpokládejte, že se jedná o běžný stroj bez pomocného a kompenzačního vinutí.

Počítat:

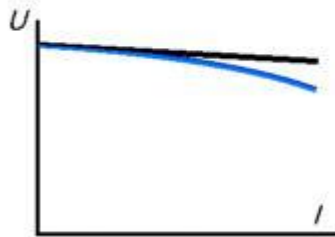
$$U = f(I_z)$$

Rovnice napětí platná pro cize buzené dynamo:

$$U_i = U + R_a \cdot I_a \quad (07.24)$$

Proud zátěži se rovná proudu kotvou a proto platí:

$$U = U_i - R_a \cdot (I_z) \Rightarrow U = U_i - R_a \cdot I_z \quad (07.25)$$



Obr 07-08 Charakteristika dynamu s cizím buzením

Černý průběh ukazuje vypočítané napětí a modrý charakteristiku skutečného stroje.

7.1.6 Zatěžovací charakteristika derivačního generátoru

Určete zatěžovací charakteristiku obecného stejnosměrného derivačního generátoru. Při výpočtu zanedbejte vliv reakce kotvy a přesycení železa. Předpokládejme, že se jedná o běžný stroj bez pomocného a kompenzačního vinutí. Předpokládejte konstantní magnetický tok

Počítat:

$$U=f(I_z)$$

Rovnice napětí platná pro derivační dynamo:

$$U_i = U + R_a \cdot I_a \quad (07.26)$$

Proud kotvy se rozděluje mezi zátěž a buzení. Proto pro proud zátěží platí:

$$I_z = I_a - I_b \quad (07.27)$$

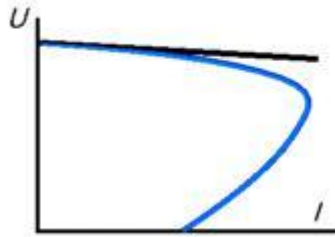
Proud buzením získáme jako podíl napětí na svorkách a odporu buzení. Pro napětí na svorkách tedy platí:

$$I_b = \frac{U}{R_b} \quad (07.28)$$

$$I_z = I_a - \frac{U}{R_b} \Rightarrow I_a = I_z + \frac{U}{R_b} \quad (07.29)$$

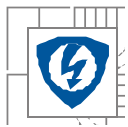
$$U = U_i - R_a \cdot \left(I_z + \frac{U}{R_b} \right) \Rightarrow U = R_b \cdot \frac{U_i - R_a \cdot I_z}{R_b + R_a} \quad (07.30)$$

$$U = \frac{R_b \cdot U_i}{R_b + R_a} - \frac{R_b \cdot R_a \cdot I_z}{R_b + R_a} \quad (07.31)$$



Obr 07-09 Charakteristika dynamu s derivačním buzením

Černý průběh ukazuje vypočítané napětí a modrý charakteristiku skutečného stroje. Při výpočtu jsme nemuseli uvažovat vliv změny budícího proudu. Tohoto jevu můžeme částečně dosáhnout přesycením obvodu.



8 NEŘEŠENÉ PŘÍKLADY

8.1 Vinutí stejnosměrných strojů

Př.01-01 Navrhněte dvouvrstvé smyčkové nekřížené vinutí čtyřpólového stroje, pokud pod každým pólem leží 8 drážek, zatímco mimo něj leží dvě drážky.

$$(y_1=15, y_2=17, y=2, y_k=1)$$

Př.01-02 Navrhněte dvouvrstvé vlnové nekřížené vinutí šesti pólového stroje, pokud pod každým pólem leží 9 drážek.

$$(Q=56, y_1=17, y_2=17, y=34, y_k=17)$$

Př.01-03 Navrhněte dvouvrstvé nekřížené smyčkové vinutí čtyřpólového stroje, má-li kotva dvacet drážek.

$$(y_1=11, y_2=9, y=2, y_k=1)$$

Př.01-04 Určete přední a zadní krok vlnového nekříženého vinutí čtyřpólového stroje má-li kotva 25 drážek.

$$(y_1=13, y_2=13)$$

Př.01-05 Určete počet pólů vinutí, známe-li přední a zadní cívkový krok $y_2=9$, $y_1=7$. Kotva má 40 drážek a celkový krok je 2.

$$(2p=10)$$

8.2 Indukované napětí

Př.02-01 Vypočítejte velikost indukovaného napětí čtyřpólového stroje se smyčkovým vinutím, má-li kotva 18 drážek a otáčí se 600 otáčkami za minutu a je buzeno 5,3mWb.

$$(U_i=1,908V)$$

Př.02-02 Určete konstantu osmi-pólového stroje s 440 cívkovými stranami. Vinutí je vlnové.

$$(c=280,11)$$

8.3 Reakce kotvy

Př.03-01 Určete natočení magnetického pole vlivem reakce kotvy v sériovém motoru, je-li napájen napětím 200V a zatížený indukovaným napětím 160V. součet odporů v sériové větvi je 0,5Ω. Pod jedním pólem je na kotvě uloženo 43 cívek ve smyčce se 4 závitů. 10 pólů překrývá 65% obvodu kotvy.

$$(\varphi=0,195)$$

8.4 Komutace

Př.04-01 Určete velikost reakčního napětí, je-li tloušťka lamely 12,4mm, tloušťka izolace mezi lamelami 3,8mm a kartáč sběracího ústrojí je o 85% větší než lamela. Komutátor má průměr 0,23m a otáčí se 1500 otáčkami. Cívkou o indukčnosti 1,5 mH prochází proud 15 A



$$(U_r = 20,987V)$$

Př.04-02 Určete tloušťku kartáče, je-li potřebná velikost reakčního napětí 15V. Tloušťka izolace mezi lamelami 2,3mm. Komutátor se otáčí 1200 otáčkami. Cívkou o indukčnosti 0,003H prochází proud 15 A. Komutátor má průměr 15cm.

$$(b_k \geq 21,2mm)$$

8.5 Ztráty a účinnost

Př.05-01 Stanovte ztráty a účinnost stejnosměrného derivačního motoru napájeného 250V. Indukované napětí má velikost 220V. Odpor budicího vinutí je 150Ω a odpor kotvy $0,23\Omega$. Motor se otáčí rychlostí 500 otáček za minutu.

$$(\Delta P_a = 3912,8W, \Delta P_b = 416,67W, \eta = 0,869)$$

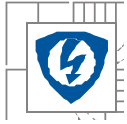
8.6 Vlastnosti strojů

Př.06-01 Jak se změní moment sériového motoru, klesnou-li otáčky z 1200 ot./min. o 25%. Konstanta stroje je 1,252, magnetický tok je konstantní 65,3mWb, odpor buzení $0,25\Omega$ a odpor kotvy $0,13\Omega$. Motor napájíme napětím 350V

$$\left(\frac{M_2}{M_1} = \frac{747,152}{225,576} = 3,31 \right)$$

Př.06-02 Jak se změní moment sériového motoru, zvýšíme-li napětí z 120V na 150V. Konstanta stroje je 1,273, magnetický tok je konstantní 18,3mWb, odpor buzení $0,159\Omega$ a odpor kotvy $0,23\Omega$. Otáčky stroje zůstanou konstantní, 500 otáček za minutu.

$$\left(\frac{M_2}{M_1} = \frac{466,81}{284,46} = 1,64 \right)$$



9 ZÁVĚR

Čtenář této práce musí mít základní vědomosti o zmiňované problematice, bez kterých uvidí pouze vzorce se stručným popisem. V příkladech jsou shrnuty základní vztahy mezi stroji a jejich vzájemné provázání. Jednotlivé příklady spolu vytváří dokonalý souhrn rad a návodů jak nejučinněji zvládnout výpočet stejnosměrných strojů od počátečních úvah o způsobu napájení, přes konstrukci vinutí, až k finálnímu zatěžování. Všechny příklady jsou idealizovány pro studijní účely. Mezi hlavní ideální vlastnosti patří konstantní magnetický odpor v železných částech. Ten je, na rozdíl od námi uvažovaného, pro každou hodnotu magnetické indukce jiný v závislosti na nasycení železa. Nemá smysl vyjmenovávat zde všechny rozdíly ideálního a skutečného stroje. O těch důležitějších se zmiňuji v textu a ostatní jsou buď příliš složité, či naopak až příliš samozřejmé, jako například výpočet s průměrnou délkou jednoho závitů.

Text se opírá o základní předpoklady pro kvalitní návrh a funkční konstrukci elektrické a magnetické části stroje. Jsou zde uvedeny základní rozdíly mezi základními druhy strojů. Kompaundované stroje neuvádím, protože je jejich výpočet složitější než u ostatních strojů, avšak se nijak neodlišuje přístupem ani vzorci. K samému závěru je podle členění kapitol připravený soubor neřešených příkladů pro ověření úspěšného zvládnutí všech předešlých témat.

To vše je doplněno názornými obrázky. Ty vyčleňují potřebnou část stroje s naznačeným problémem, aby nedocházelo ke zbytečným chybám nejen ve výpočtu, ale hlavně v pochopení situace. Většina postupů je navíc zakomponována do krátkých videí, které jsou součástí práce a mají za úkol jednoznačně ukázat „co s čím“, očím nezkušeného nováčka v tomto oboru.

Nejvíce pozornosti věnuji základu návrhu stejnosměrných strojů, kterým je podle mého mínění návrh vinutí kotev. V něm jsou ukázány základní vazby ve vinutí potřebné ke zvládnutí dalších kapitol. součástí vinutí kotev je i pomocník při výpočtech, který má za úkol upozornit na neřešitelné situace. Druhou stěžejní částí je indukované napětí, které je další nedílnou součástí všech navazujících kapitol. Proto je v práci uvedeno detailní odvození tohoto napětí a mimo ni naznačení změny indukovaného napětí v čase v závislosti na parametrech kotvy. Tento soubor generuje průběh indukovaného napětí během jednoho otočení rotoru. I část reakce kotvy obsahuje postupy při odvozování tohoto jevu a je doplněna animací, která sleduje směr reakčního toku v závislosti na budícím proudu. Třetí částí je komutační napětí a způsoby jeho snížení i zde jsou videa, sledující natočení magnetické neutrály v závislosti na budícím proudu. Ostatní kapitoly se pak přímo zaměřují na vlastní návrh elektrické části stejnosměrných strojů.

K dokumentu je přiřazeno celkem 8 souborů. Soubory jsou zvýrazněny a připraveny ke spuštění přímo z dokumentu.



LITERATURA

- [1] BAŠTA, J.: Teorie elektrických strojů. Československá akademie věd, Praha 1956
- [2] HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., JANOUŠEK, L.: Elektrické stroje v teorii a příkladech. Žilinská univerzita, Edis 1998
- [3] CHLÁDEK, J., LAMMERANER, J.: Elektrické stroje na stejnosměrný proud. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1957
- [4] MĚŘIČKA, J., ZOUBEK, J.: Elektrické stroje, Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1965
- [5] MRAVEC, R.: Elektrické stroje a přístroje, I. Elektrické stroje. SNTL, Praha 1982
- [6] MRAVEC, R.: Elektrické stroje a přístroje, III. Navrhovanie elektrických točivých strojov. ALFA, Bratislava 1975
- [7] POKORNÝ, K.: Vinutí kotev stejnosměrných strojů. Vysoké učení technické v Brně, Brno 1971
- [8] THERAJA, B.L., THERAJA, A.K.: Electrical technology