VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VLIV VINUTÍ NA VLASTNOSTI ASYNCHRONNÍHO MOTORU
IMPACT OF WINDING ON INDUCTION MACHINE CHARACTERISTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Mgr. Vladislav Mikmek**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Martin Mach, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Mgr. Vladislav Mikmek ***ID:*** 89206
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Vliv vinutí na vlastnosti asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Podle výkresové dokumentace vytvořte model asynchronního motoru v programu pro výpočty metodu konečných prvků.
2. Analyzujte vliv provedení statorového vinutí na jmenovité charakteristiky daného asynchronního motoru.
3. Analyzujte vliv provedení statorového vinutí na ztráty daného asynchronního motoru.
4. Na základě výsledků navrhněte optimální provedení vinutí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s.

[2] PYRHONEN, J.; JOKINEN t.; HRABOVCOVÁ V. Design of rotating eletrical machines. John Wiley and Sons, 2007. ISBN 978-0-470-69516-6.

[3] BOLDEA, I. a NASAR, S. A. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-49--0004-5.

Termín zadání: 3.2.2020 ***Termín odevzdání:*** 20.5.2020

Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na analýzu vlivu statorového vinutí na vlastnosti třífázového asynchronního motoru. Po teoretickém úvodu, pojednávajícím o druzích vinutí, metodách analýzy a činiteli vinutí, jsou vysvětleny důležité nástroje analýzy i návrhu vinutí, a to Görgesův diagram a Tingleyho schéma. Právě toho je využito k návrhu všech variant vinutí pro konkrétní počet drážek statoru a zkoumán nejdříve teoretický tvar indukce ve vzduchové mezeře. Následně je přikročeno k důkladné softwarové analýze strojů s různým provedením vinutí, co se týče kroku a závitů cívky, mimo jiné za pomoci metody konečných prvků. Získané veličiny a charakteristiky veličin simulovaných strojů jsou poté srovnány číselně případně graficky. Dále jsou popsány změny zvolených vlastností při odlišných parametrech vinutí. Závěrem je vybráno optimální vinutí dle zvolených požadavků.

Klíčová slova

asynchronní motor, vinutí, Görgesův diagram, Tingleyho schéma, metoda konečných prvků

Abstract

This thesis deals with the analysis of a three-phase winding of an induction engine. After the theoretical introduction concerning different types of windings, two types of their analysis and the importance of the winding factor, two methods of analysis and design tools are explained: Görges diagram and Tingley scheme. This scheme is then used for the design of all possible variants of winding for a certain number of stator slots and the theoretical shape of magnetic field is analysed. The next step is a deeper software analysis of the engines with variants of windings with different coil pitches and number of conductors per slot. Especially the finite element method is used in this part. The obtained values and their characteristics of the simulated engines are compared numerically and graphically. Then the changes of important values for different windings are described. The optimal winding according to chosen requirements is chosen.

Keywords

induction engine, winding, Görges diagram, Tingley scheme, finite element method

Bibliografická citace

MIKMEK, Vladislav. *Vliv vinutí na vlastnosti asynchronního motoru* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125784. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Martin Mach.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vliv vinutí na vlastnosti asynchronního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 19. května 2020 ……
podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinu Machovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce.

V Brně dne: 19. května 2020 ……

podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **9**

SEZNAM OBRÁZKŮ **10**

SEZNAM TABULEK **12**

1 ÚVOD **13**

2 ASYNCHRONNÍ MOTOR, PRINCIP, ZÁKLADNÍ TERMÍNY A VELIČINY **14**

3 STATOROVÉ VINUTÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU **16**
3.1 Základní termíny, vztahy, materiály vinutí 16
3.2 Dělení střídavých vinutí 17
3.2.1 Jednovrstvá vinutí 17
3.2.2 Dvouvrstvá vinutí 18
3.3 Základy analýzy vinutí trojfázového asynchronního motoru 18
3.4 Činitel vinutí 22
3.4.1 Činitel rozlohy 23
3.4.2 Činitel zkrácení kroku 23
3.4.3 Vyloučení vyšších harmonických 24
3.5 Magnetické pole ve vzduchové mezeře a Görgesův diagram 25
3.5.1 Vlastnosti magnetického pole 25
3.5.2 Vytvoření Görgesova diagramu a vykreslení magnetického pole . 26
3.6 Tingleyho schéma 29

4 ANALÝZA VINUTÍ KONKRÉTNÍHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU **31**
4.1 Úvod k analýze a volba základních parametrů 31
4.2 Analýza pro zvolené vlastnosti vinutí 32

5 MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU, ZVOLENÉ VINUTÍ, ZMĚNY NA CÍVCE VINUTÍ A METODA ANALÝZY **39**
5.1 Vlastnosti asynchronního motoru v simulovaném modelu 40
5.2 Změny kroku vinutí a změny na cívce vinutí k analýze vlivu statorového vinutí na vlastnosti motoru 42
5.3 Hledané výsledky simulace – vlastnosti a veličiny motoru 44

6 VÝSLEDKY PROVEDENÝCH SIMULACÍ, SROVNÁNÍ VINUTÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍHO VINUTÍ **46**
6.1 Hodnocené veličiny asynchronního motoru 46
6.1.1 Magnetická indukce 47
6.1.2 Moment motoru na hřídeli 50
6.1.3 Mechanický výkon, účinnost 53
6.1.4 Ztráty v železe 56
6.1.5 Vstupní proud 57
6.2 Výběr optimálního vinutí 59

7 ZÁVĚR **61**

POUŽITÁ LITERATURA **62**

SEZNAM PŘÍLOH **63**

PŘÍLOHA 1 **64**

PŘÍLOHA 2 **65**

PŘÍLOHA 3 **66**

PŘÍLOHA 4 **67**

PŘÍLOHA 5 **68**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

symbol	název	jednotka
d	průměr vodiče vinutí	mm
f_1	frekvence vstupního napětí	Hz
f_2	skluzová frekvence	Hz
k_d	činitel rozlohy	$-$
k_v	činitel vinutí	$-$
k_y	činitel zkrácení kroku	$-$
l	aktivní délka	m
m	počet fází	$-$
n	otáčky rotoru	min^{-1}
n_1	otáčky magnetického pole statoru	min^{-1}
n_2	otáčky magnetického pole rotoru	min^{-1}
p	měrné ztráty	$\mathrm{W.kg}^{-1}$
p	počet pólových dvojic	$-$
q	počet drážek na pól a fázi	$-$
s	skluz	$-$
t	čas	s
v	pořadí harmonické ve Fourierově rozvoji	$-$
z_Q	počet vodičů v drážce	$-$
B	magnetická indukce	T
D	průměr	mm
H	magnetická intenzita	$\mathrm{A.m}^{-1}$
I	elektrický proud	A
M	moment stroje	Nm
N	počet závitů jedné fáze	$-$
N_c	počet závitů cívky	$-$
P	výkon	W
P_v	počet vektorů hvězdice	$-$
Q	počet drážek	$-$
Q_p	pólová rozteč	$-$
Y	krok cívky vinutí	$-$
α_{el}	elektrický úhel	$^\circ$
α_{geom}	geometrický úhel	$^\circ$
α_p	úhel mezi paprsky vektorové hvězdice	$^\circ$
δ	šířka vzduchové mezery	mm
η	účinnost	$-$
ϑ	teplota	°C
κ	největší společný dělitel počtu drážek a pólových párů	$-$
ϱ	hustota	$\mathrm{kg.m}^{-3}$
σ	měrná vodivost	$\mathrm{S.m}^{-1}$
ΔM	zvlnění momentu	Nm

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3.1 Vektorová hvězdice vinutí a) Q = 24, m = 3, $2p$ = 10 a b) Q = 20, m = 3, $2p$ = 6 [2] 20
Obrázek 3.2 Vektorová hvězdice vinutí i s fázemi pro Q = 24, m = 3, $2p$ = 4 a q = 2 [2] 21
Obrázek 3.3 Postup vytvoření vektorové hvězdice, vektorů fází a cívky vinutí [6] 22
Obrázek 3.4 Napětí v drážkách cívky s a) plným a b) zkráceným krokem [2] . 24
Obrázek 3.5 Vliv jedné cívky na magnetické pole [5] 26
Obrázek 3.6 Statorové vinutí, Görgesův diagram a magnetická indukce v čase t_1 [5] 27
Obrázek 3.7 Vektorová hvězdice proudů a proudy v časech t_1 a t_2 [5] 27
Obrázek 3.8 Statorové vinutí, Görgesův diagram a magnetická indukce v čase t_2 [5] 28
Obrázek 3.9 Dvouvrstvé vinutí pro Q = 18, $2p$ = 4, $q = 1\frac{1}{2}$ a Y = 4 [5] 30
Obrázek 4.1 Dvoupólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2 32
Obrázek 4.2 Čtyřpólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2 33
Obrázek 4.3 Šestipólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2 34
Obrázek 4.4 Osmipólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2 35
Obrázek 4.5 Desetipólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2 36
Obrázek 4.6 Dvanáctipólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2 37
Obrázek 4.7 Čtrnáctipólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2 38
Obrázek 5.1 Prostředí ANSYS s příkladem modelu v programech RMxprt a Maxwell 2D 39
Obrázek 5.2 B-H křivka materiálu M800-50A 41
Obrázek 5.3 Grafická závislost měrných ztrát na indukci u materiálu M800-50A 42
Obrázek 6.1 Pole magnetické indukce v průřezu asynchronního motoru u $2p$ = 6, Y = 7, $2N_c$ = 32 48
Obrázek 6.2 Příklady radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře 49
Obrázek 6.3 Spektrální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro $2p$ = 6, Y = 6, 36 vodičů 50
Obrázek 6.4 Závislost momentu na otáčkách u šestipólových strojů 51
Obrázek 6.5 Moment metodou konečných prvků pro $2p$ = 6, Y = 6 a $2p$ = 12, Y = 3 52
Obrázek 6.6 Mechanický výkon metodou konečných prvků pro $2p$ = 6, Y = 6 a $2p$ = 12, Y = 3 54
Obrázek 6.7 Závislost vstupního proudu na otáčkách u šestipólových strojů . 58

Obrázek 6.8 Vstupní proud metodou konečných prvků pro $2p = 6$, $Y = 6$, 36 vodičů 59
Obrázek 7.1 Příklady jednovrstvých soustředných vinutí [8], [9] 64
Obrázek 7.2 Příklady jednovrstvých vinutí s cívkami o stejném kroku [8], [9] 65
Obrázek 7.3 Příklady dvouvrstvých vinutí [8], [9] 66

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3.1 Činitel zkrácení kroku pro $Y = 5$ a $Q_p = 6$ 24
Tabulka 3.2 Tingleyho schéma pro $Q = 18$, $2p = 4$, $q = 1\frac{1}{2}$ [8] 29
Tabulka 4.1 Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 2$, $q = 7\frac{1}{2}$, $Y = 18$ 32
Tabulka 4.2 Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 4$, $q = 3\frac{3}{4}$, $Y = 9$ 33
Tabulka 4.3 Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 6$, $q = 2\frac{1}{2}$, $Y = 6$ 33
Tabulka 4.4 Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 8$, $q = 1\frac{7}{8}$, $Y = 4$ 34
Tabulka 4.5 Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 10$, $q = 1\frac{1}{2}$, $Y = 3$ 35
Tabulka 4.6 Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 12$, $q = 1\frac{1}{4}$, $Y = 3$ 36
Tabulka 4.7 Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 14$, $q = 1\frac{1}{14}$, $Y = 2$ 36
Tabulka 5.1 Magnetická indukce, měrné ztráty a magnetická intenzita materiálu M800-50A [12] 41
Tabulka 6.1 Přehledné srovnání základních veličin simulovaných strojů 46
Tabulka 6.2 Srovnání sycení ASM motoru při jmenovitých otáčkách pro různá vinutí 47
Tabulka 6.3 Hodnoty momentů a jejich zvlnění u simulovaných strojů s různým vinutím 51
Tabulka 6.4 Srovnání mechanických výkonů a účinností simulovaných strojů v obou programech 53
Tabulka 6.5 Veličiny simulovaných strojů v programu RMxprt při jmenovitém výkonu 55
Tabulka 6.6 Tabulka ztrát v železe pro simulované asynchronní motory 56
Tabulka 6.7 Hodnoty vstupního proudu u simulovaných strojů 57
Tabulka 6.8 Hodnoty původních a optimálních vinutí simulovaných asynchronních motorů 60
Tabulka 7.1 Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 2$, $q = 7\frac{1}{2}$ 67
Tabulka 7.2 Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 4$, $q = 3\frac{3}{4}$ 67
Tabulka 7.3 Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 6$, $q = 2\frac{1}{2}$ 67
Tabulka 7.4 Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 8$, $q = 1\frac{7}{8}$ 67
Tabulka 7.5 Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 10$, $q = 1\frac{1}{2}$ 68
Tabulka 7.6 Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 12$, $q = 1\frac{1}{4}$ 68
Tabulka 7.7 Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 14$, $q = 1\frac{1}{14}$ 68

1 Úvod

Asynchronní stroje zabírají v elektrotechnice, technice obecně i lidské společnosti významné a nezastupitelné místo. Snaha o zvyšování kvality těchto strojů do budoucnosti je tedy snahou důležitou a ve výsledcích výhodnou; analýza vinutí v ní hraje jistě velmi výraznou roli. Tato práce, zaměřená na trojfázové vinutí asynchronního motoru, se zabývá problematikou statorového vinutí a jeho významným vlivem v první řadě na magnetické pole ve vzduchové mezeře a následně na fungování stroje jako celku.

V prvních třech kapitolách diplomové práce jsou vysvětleny základní termíny a veličiny analýzy i návrhu asynchronního motoru a jeho statorového vinutí. Probrána jsou různá specifika odlišných druhů vinutí a popsány dva hlavní typy analýzy vinutí, a to z pohledu indukovaného napětí a tvaru magnetického pole. Je vysvětlen vztah mezi vinutím a tvarem magnetické indukce ve vzduchové mezeře a Görgesovým diagramem, popsána jeho konstrukce. Rovněž je rozebrán význam činitele vinutí a jeho dílčích činitelů, kapitolu zakončuje důležité pojednání o Tingleyho schématu, které slouží pro návrh vinutí s potřebnými parametry.

Následuje čtvrtá kapitola, která pro zvolený počet drážek statoru vyjmenovává všechny možné varianty třífázového vinutí co se týče počtu pólů, a to pro vinutí se stejným krokem dvouvrstvého typu. K návrhu vinutí bylo použito Tingleyho schématu a každé takto navržené vinutí bylo zanalyzováno pomocí tvaru Görgesova diagramu a tvaru magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro dva odlišné časy resp. úhly. Vinutí jsou porovnána a je ke každému přidána i informace o činiteli vinutí až po jedenáctou harmonickou. To proto, aby i číselně mohlo být srovnáno to, co bylo vykresleno graficky pomocí programu Matlab.

V páté kapitole je především důkladně vysvětlena metoda, užitá v poslední a nejdůležitější části práce. Je popsán model asynchronního motoru se základními rozměry a vlastnostmi pro použití v simulačních programech RMxprt a Maxwell 2D. Tyto programy využívají analytickou a v případě Maxwellu numerickou metodu, kterou je metoda konečných prvků, k získání výstupů grafických i číselných. Rozebrán je postup nalezení vhodných vinutí co se týče kroku i závitů a nakonec dojde k vyjmenování a popisu veličin i vlastností stroje, které jsou hlavním předmětem zájmu z širšího množství výstupů simulací. Jedná se především o výkon a účinnost stroje, ztráty v železe, sycení stroje a tvar indukce ve vzduchové mezeře, odebíraný proud a moment na hřídeli, včetně jeho pulzací.

Závěrečná kapitola se již věnuje výsledkům simulací, které jsou přehledně sepsány v tabulkách i vyjádřeny graficky tak, aby sloužily ke srovnání vybraných strojů, v případě grafickém kromě srovnání také k názornému poukázání na to, co může být méně viditelné v číselných údajích. Kapitola je rozdělena na části dle zkoumaných veličin, kde jsou popsány především závislosti na kroku vinutí a počtu vodičů v drážce, případně ještě srovnávány hodnoty z obou programů. Na samotném konci kapitoly a diplomové práce je vybráno optimální vinutí dle vybraných požadavků na něj.

2 ASYNCHRONNÍ MOTOR, PRINCIP, ZÁKLADNÍ TERMÍNY A VELIČINY

Z točivých elektrických strojů, umožňujících elektromechanickou přeměnu energie, jsou asynchronní stoje významnou skupinou. Jedná se o stroje jedno či vícefázové a bývají užívány až na výjimky především pro přeměnu elektrické energie na energii mechanickou, tedy jako motory.

Asynchronní motor má z vnějšího pohledu přibližně válcový tvar. Pevná, nepohyblivá část neboli stator se kromě nosné kostry skládá z plechů ve tvaru mezikruží, vinutí ve statoru a z obou stran statoru jsou navíc přiložené ložiskové štíty. Plechy, navzájem izolované, se v asynchronním motoru užívají na umenšení ztrát vířivými proudy. Pohyblivá část, zvaná rotor, je také složena z plechů, které jsou nalisovány okolo hřídele a tento celek je vložen v dutém statoru tak, že se mezi rotorem a statorem nachází vzduchová mezera, která se volí co nejmenší.

Rotor asynchronního stroje je v zásadě dvojího typu. Kroužkový rotor, též nazývaný vinutý, má vinutí vyvedeno na tři navzájem izolované sběrací kroužky na hřídeli, ke kterým přiléhají kartáče, odvádějící proud rotoru k použití pro řízení motoru. Většinou se po rozběhnutí motoru kartáče odklopí a kroužky jsou navzájem vodivě propojeny.

Klecový rotor se skládá z tyčí z mědi či hliníku, na obou stranách spojených vodivými kruhy. Drážky pro tyče mají různý tvar, hloubku a materiál, čehož je využíváno pro zefektivnění rozběhu. Alespoň částečně se tak nahrazuje jistá flexibilita, kterou oplývají rotory vinuté [10].

K dalším termínům točivých strojů, případně přímo asynchronního motoru, patří například **kotva**, což je název té části motoru, ve které se při pohybu indukuje napětí. V případě asynchronního motoru se indukuje v rotoru.

Vinutí statoru je připojeno na napětí jednofázové, dvoufázové či třífázové. Po přiložení k napětí se vytvoří magnetické pole, v případě jedné fáze jde o magnetické pole pulzující, u dvou a tří fází jde o pole otáčivé. V případě trojfázového vinutí, které je předmětem této práce, je to pole otáčivé a kruhové. Jak se pole otáčí po obvodu statoru a protíná přitom rotor, indukuje se v kotvě napětí a začne protékat proud. Proud v kotvě vytváří vlastní magnetické pole. Obě magnetická pole, pole statoru i rotoru, na sebe navzájem působí. Výsledkem je otáčení rotoru ve směru otáčení magnetického pole statoru.

Důležitou veličinou u asynchronního motoru je **skluz** [6]

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \tag{2.1}$$

kde s je skluz, n_1 jsou otáčky magnetického pole statoru, $[n_1] = \mathrm{ot./min}$, n jsou otáčky rotoru, $[n] = \mathrm{ot./min}$. Skluz je mírou rozdílu otáček pole statoru a otáček rotoru. Ty jsou vždy odlišné, protože jen tak je zajištěno, že se v kotvě indukuje napětí, tedy dochází u těchto dvou částí motoru k relativnímu pohybu, potřebnému k indukci. Skluz je závislý na mechanickém zatížení stroje.

Pól je část povrchu statoru ve vzduchové mezeře, do které tok buď vstupuje, nebo z ní vystupuje. Dva póly tvoří spolu pólovou dvojici. **Pólová rozteč** Q_p je vzdálenost os dvou vedlejších pólů [10].

Pólů může mít asynchronní stroj dva, čtyři, či více. Zatímco celá perioda napájecího napětí odpovídá u dvoupólového stroje obvodu jeho statoru resp. vinutí v něm, u vícepólových se již jedná o zlomek této dráhy. Je nutno tedy rozlišovat mezi **elektrickým úhlem** a **geometrickým úhlem**. Lze proto napsat [3]

$$\alpha_{el} = p\alpha_{geom}, \tag{2.2}$$

kde α_{el} je elektrický úhel, $[\alpha_{el}] = {}^\circ$, p je počet pólových dvojic a α_{geom} je geometrický úhel, $[\alpha_{geom}] = {}^\circ$.

Otáčky magnetického pole statoru, tedy tzv. **synchronní otáčky**, lze zjistit dle vztahu [4]

$$n_1 = 60\frac{f_1}{p}, \tag{2.3}$$

kde f_1 je frekvence vstupního napětí, $[f_1] = \mathrm{Hz}$.

Otáčky jsou tedy podle tohoto vztahu jasně závislé na počtu pólů a kmitočtu napětí.

Na vinutí rotoru se indukuje napětí a proud, vytváří se reakce v podobě vlastního magnetického pole. Tato tzv. **skluzová frekvence** má velikost [5]

$$f_2 = \frac{(n_1 - n)p}{60} = sf_1, \tag{2.4}$$

kde f_2 je skluzová frekvence, $[f_2] = \mathrm{Hz}$.

Z předchozího lze také odvodit, že [1]

$$n_2 = sn_1, \tag{2.5}$$

kde $n_2 = 60f_2$ jsou otáčky magnetického pole rotoru, $[n_2] = \mathrm{ot./min}$, dále

$$n_2 = (1 - s)n_1 \tag{2.6}$$

a také to, že

- při $s = 1$ je $n = 0$ a $n_2 = n_1$, tedy rotor se netočí,

- při $s = 0$ je $n = n_1$ a $n_2 = 0$, rotor se pohybuje ideální rychlostí naprázdno.

3 STATOROVÉ VINUTÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

3.1 Základní termíny, vztahy, materiály vinutí

Vinutí se nachází v drážkách statoru a v případě vinutého rotoru i na něm. Statorové vinutí je uloženo v drážkách v podobě tzv. **cívek**. Obvod cívky se skládá ze čtyř částí, z nichž dvě se nacházejí v drážkách statoru a říká se jim strany nebo též **aktivní strany cívky**. Zbylé dvě části obvodu cívky jsou nazývány čela. Jeden takový obvod složený ze dvou aktivních stran a dvou čel se pak označuje jako **závit** cívky, cívka se tedy může skládat z jednoho či více závitů.

Při výpočtech a návrhu statorového vinutí je vhodné znát **počet drážek na pól a fázi**. Ten lze získat jednoduchým vztahem [6]

$$q = \frac{Q}{2pm}, \tag{3.1}$$

kde q je počet drážek na pól a fázi, Q je počet drážek statoru a m je počet fází.

Dále je vhodné zmínit **krok cívky** Y. Jedná se o vzdálenost dvou aktivních stran jedné cívky, počítanou v drážkách [4]. Může a nemusí se jednat o stejnou vzdálenost, jakou má pólová rozteč. V případě, že se vzdálenosti rovnají, jedná se o cívku s plným krokem, v případě, že jsou tyto vzdálenosti odlišné, jedná se o cívku častěji se zkráceným a vzácněji i prodlouženým krokem.

Cívky jsou různými způsoby pospojovány do celého vinutí. Způsobů takového spojení je více a dá se dělit z různých hledisek, jak rozebírá následující kapitola. Vinutí je uloženo v drážkách po vnitřním obvodu statoru a konce i počátky jsou vyvedeny na svorkovnici.

Nejčastěji je dnes užíváno dvouvrstvé vinutí se zkráceným krokem, tedy krok cívky je menší než pólová rozteč pro snížení nežádoucího vlivu prostorových harmonických vyššího řádu [10].

Co se týče materiálu vinutí, hlavním ukazatelem kvality je jeho měrná vodivost. Až druhotné, ovšem také podstatné, jsou mechanické a tepelné vlastnosti. Pro svoje výhodné vlastnosti v těchto oblastech je nejčastěji využívána elektrolytická měď, která má druhou nejlepší vodivost při pokojové teplotě hned za stříbrem. Výhodou je i dobrá odolnost proti korozi, tvárnost a skvělá tepelná vodivost. Měrná elektrická vodivost je umenšována nečistotou mědi, případně legujícími přísadami.

Hliník je svojí důležitostí sice až za mědí, přesto jsou jeho výhodné vlastnosti často využívány, mimo jiné i díky jeho velkému množství v zemské kůře. Má malou měrnou hmotnost a dobrou elektrickou i tepelnou vodivost a zároveň tvárnost.

Někdy se užívají i slitiny mědi a hliníku, a to buď těchto dvou kovů navzájem, nebo v případě mědi například se zinkem, cínem a křemíkem. V případě hliníku se volí hořčík a křemík [11].

Pro srovnání, elektrolytická měď má měrnou vodivost při 20 °C rovnu $58 \cdot 10^6\ \mathrm{S/m}$ a hliník pouze $35 \cdot 10^6\ \mathrm{S/m}$ [7]. Hliník se užívá jen málokdy, příkladem však mohou být právě lité klece asynchronních motorů.

3.2 Dělení střídavých vinutí

Předmětem zájmu této práce je vinutí statoru asynchronního motoru, napájené ze soustavy trojfázového napětí. Budou proto opomenuty záležitosti jednofázových a dvoufázových vinutí a strojů. V případě trojfázového motoru a jeho vinutí se jedná o souměrnou soustavu napětí, a proto i proudy, procházející vinutím, tvoří souměrnou soustavu. Proudy fází jsou vůči sobě posunuty o 120° časově a mezi vinutími jednotlivých fází je prostorový posun taktéž 120° elektrických. Ve vzduchové mezeře se v důsledku toho vytváří kruhové točivé magnetické pole.

Trojfázové vinutí může být spojeno do hvězdy, kdy konce fází spojuje uzel, nebo do trojúhelníka, kdy konec jedné fáze je napojen na počátek fáze následující. Konce i počátky vinutí všech fází jsou vyvedeny na svorkovnici stroje, v případě trojfázového vinutí asynchronního stroje je tedy na svorkovnici šest vývodů.

Střídavá vinutí lze dělit z několika úhlů pohledu. Dáme-li stranou dělení dle technologie výroby, tak v první řadě se vinutí dělí na vinutí jednovrstvé a dvouvrstvé, dále vinutí ze soustředných skupinových cívek a cívek stejného kroku, cívky pólové a pólpárové a také vinutí rozložená nebo rozstříhaná se stejnými cívkami [9]. Budou postupně rozebrány hlavní druhy vinutí.

3.2.1 Jednovrstvá vinutí

U jednovrstvého vinutí se v každé drážce statoru nachází pouze jedna cívková strana. Počet cívek tedy odpovídá polovině počtu drážek statoru [4].

U **soustředného skupinového vinutí** tvoří základ skupina cívek o odlišném obvodu, které jsou soustředně navinuty. Soustava takovýchto skupin, navzájem propojených, vytváří celé vinutí. Způsob propojení těchto skupin pak vytváří různé typy tohoto vinutí.

Prvním typem takového vinutí je vinutí s *pólovými* soustřednými cívkami. Je charakterizováno tím, že $q/2$ aktivních stran cívek spadá pod jeden pól a zbývajících $q/2$ aktivních stran pod pól následující. Počet skupin je pak roven počtu cívek [9].

Existují dva druhy propojení takových skupin. Prvním je vinutí s pólovými soustřednými cívkami, kde jsou skupiny spojovány smyčkově. Konec jedné skupiny navazuje na konec následující, poté se vychází ze začátku této skupiny a navazuje na začátek skupiny další atd. Naproti tomu existuje vinutí s pólovými soustřednými cívkami s vlnovým spojováním skupin, kde se vždy vychází z konce skupiny a navazuje na začátek ob jednu skupinu následující a na konci obvodu statoru se vrací zpět přes takto přeskočené skupiny.

Druhým typem soustředného vinutí je *pólpárové* vinutí. Všechny drážky na pól a fázi jsou zabrány jednou skupinou cívek, která je tak propojuje se všemi drážkami na pól a fázi vedlejšího pólu [9]. Tedy vznikne p skupin. Je možné použít pólpárové soustředné vinutí se sériově zapojenými skupinami a jinou variantou je paralelní propojení. Příklady všech těchto vinutí ukazuje obrázek 7.1 [8], [9] v příloze. Jsou pro přehlednost zobrazena pouze zapojení jedné ze tří fází. Na obrázcích se uvažuje šest pólů a čtyři drážky na pól a fázi.

I v případě **cívek o stejném kroku** tvoří cívky skupinu, ale všechny cívky v ní mají stejnou velikost a jsou vůči sobě fyzicky posunuty, jsou tedy v odlišných drážkách. Rozdělení je podobné jako u předchozího druhu vinutí a platí stejná logika i terminologie.

Patří sem tedy smyčkové pólové vinutí cívek o stejném kroku a také vinutí pólpárové sériově zapojené. Jejich charakteristická vlastnost lze vidět na první pohled – jsou všechny stejně široké. Pokud se v drážkách pólu střídá přední a zadní strana cívky, vznikne tzv. rozložené vinutí, které je opět možné realizovat ve smyčkové a vlnové podobě.

Vinutí s cívkami o stejném kroku jsou velmi často používána v asynchronních motorech a tato práce se jimi bude více zabývat. Všechna zmíněná vinutí jsou v příkladech ukázána na obrázku 7.2 [8], [9] v příloze.

3.2.2 Dvouvrstvá vinutí

Dvouvrstvé vinutí se používá ve většině případů. V každé drážce statoru se nacházejí strany dvou cívek a jsou uloženy nad sebou. Zároveň je zajištěno, aby každá cívka měla obě své strany uloženy tak, že jedna je ve vnitřní části drážky a druhá ve vnější [10]. Takové vinutí má pak počet drážek roven počtu cívek [4].

Dvouvrstvá vinutí mají podobné dělení a způsoby propojení jako vinutí jednovrstvá s tím, že se užívají zpravidla jen cívky o stejném kroku [9]. Opět je možnost spojovat skupiny stejně velkých cívek o stejném obvodu buď smyčkově, tedy spojovat konec skupiny s koncem další skupiny sousedního pólu a začátek této skupiny se začátkem následující skupiny. Vlnové propojení skupin i v případě dvouvrstvých vinutí spojuje konec jedné skupiny se začátkem skupiny ob jednu následující a po dosažení konce obvodu statoru zpět přes přeskočené skupiny cívek. Příklady velmi často užívaného dvouvrstvého vinutí jsou názorně zobrazeny na obrázku 7.3 [8], [9] v příloze.

3.3 Základy analýzy vinutí trojfázového asynchronního motoru

V první řadě je potřeba si uvědomit, že pro analýzu vinutí z pohledu magnetického pole záleží jen na tom, jaká drážka je přidělená které fázi, spojení čely do cívek není podstatné.

Aby vinutí tvořilo souměrnou třífázovou soustavu, musí být také souměrné. Tedy počet drážek musí být vhodně zvolen, aby byla tato podmínka splněna. Zpravidla se lze setkat

s těmito nejčastěji používanými počty drážek ve statoru asynchronního stroje [5]:

$Q = 18, 24, 30, 36, 42, 45, 48, 54, 60, 72$

Každá drážka má v sobě jistý počet vodičů. Tento počet vodičů je důležitým údajem a lze získat vztahem [6]

$$z_Q = \frac{2N}{\frac{Q}{m}} = \frac{2mN}{Q} = \frac{N}{pq}, \tag{3.2}$$

kde N je počet závitů jedné fáze, $2N$ počet aktivních stran závitů jedné fáze a Q/m je počet drážek na fázi. A naopak, známe-li počet vodičů v drážce, lze snadno vypočítat počet závitů jedné fáze vinutí.

Velmi podstatný pro analýzu vinutí je fakt, zda je *q* celé číslo, nebo zda se celým číslem vyjádřit nedá. Počet drážek na pól a fázi tak ukazuje, jestli se jedná o **pravidelné** vinutí, nebo vinutí **zlomkové**.

Zlomkové vinutí je takové vinutí, kde každá fáze v po sobě následujících pólech nemá pokaždé stejný počet drážek na pól a fázi a zlomkové číslo q udává jejich průměrný počet.

Není však vždy možné užít zlomkového vinutí. Vinutí musí být ve všech fázích symetrické, každá fáze musí mít stejný počet cívek. Podle [5] je snadné ověřit možné q. Protože u jednovrstvého vinutí je pq počet cívek na fázi, který musí být celý, pak tedy q se například pro 2*p* = 6 musí rovnat

$q = 1\frac{1}{3}, 1\frac{2}{3}, 2, 2\frac{1}{3}, 2\frac{2}{3}...,$

aby součin dával celé číslo.

U dvouvrstvého vinutí je je $2pq$ počet cívek na fázi a je nutné, aby byl celý, tedy opět pro 2*p* = 6 musí jít o hodnoty

$q = 1\frac{1}{6}, 1\frac{1}{3}, 1\frac{1}{2}, 1\frac{2}{3}, 1\frac{5}{6}...$

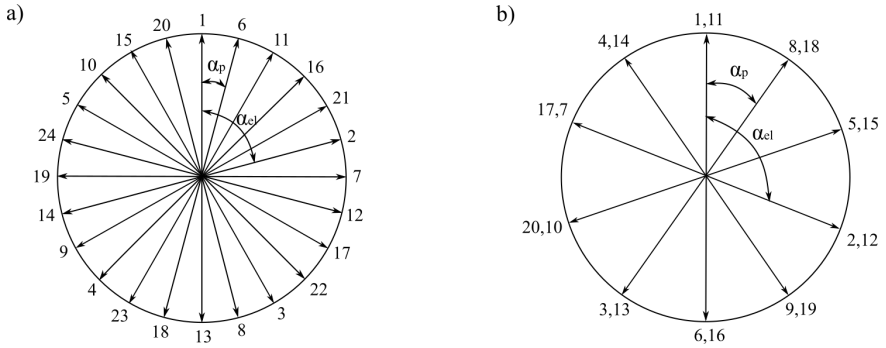
Nicméně je třeba dodat, že u jednovrstvých zlomkových vinutí je magnetické pole velmi špatné [4].

Analýza vinutí se dá rozdělit v podstatě na dva typy: podle toho, jak se ve vinutí indukuje napětí a jaké magnetické pole se v asynchronním motoru vytváří. Nejdříve budou velmi jednoduše popsány základy analýzy dle napětí. Analýze dle magnetického pole se bude věnovat navazující text.

Mezi základní kroky návrhu a analýzy vinutí jistě patří sestrojení tzv. *vektorové hvězdice*. Postup získání vektorové hvězdice a veličin k tomu potřebných popisuje např. [2]:

Elektrický úhel mezi vedlejšími drážkami je

$$\alpha_{el} = \frac{360°}{Q} p, \tag{3.3}$$



Obrázek 3.1: Vektorová hvězdice vinutí a) Q = 24, m = 3, $2p$ = 10 a b) Q = 20, m = 3, $2p$ = 6 [2]

V případě, že Q a p jsou **nesoudělná čísla**, pak se například mezi vektory 1 a 2 bude nacházet (p – 1) jiných vektorů, počet vektorů hvězdice $P_v = Q$ a sousední vektory ve vektorové hvězdici svírají úhel

$$\alpha_p = \frac{360^\circ}{Q}. \tag{3.4}$$

Dále lze říci, že p je počet oběhů okolo hvězdice, které jsou potřeba k vyčerpání vektorů.

V případě, že **existuje dělitel** čísel Q a p, pak ve vektorové hvězdici dojde ke ztotožnění některých směrů resp. vektorů pro různé drážky. Potom

$$P_v = \frac{Q}{\kappa}, \tag{3.5}$$

kde κ je největší společný dělitel čísel Q a p.

Počet oběhů k vyčerpání vektorů je v takovém případě roven p/κ a vektory dvou vedlejších drážek budou nyní mít mezi sebou $(p/\kappa - 1)$ vektorů. Vektory ve hvězdici svírají úhel

$$\alpha_p = \frac{360^\circ}{P_v} = \frac{360^\circ}{Q}\kappa, \tag{3.6}$$

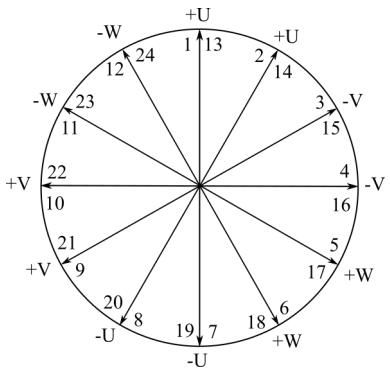
Lze také odvodit

$$\alpha_{el} = \alpha_p \frac{p}{\kappa}. \tag{3.7}$$

Příklad vektorové hvězdice je na obr. 3.1 [2] a) pro Q = 24, m = 3, $2p$ = 10 a b) pro Q = 20, m = 3, $2p$ = 12.

Vektorová hvězdice se tedy skládá z Q/κ paprsků. Mezi paprsky je úhel α_p. Jeden paprsek se označí jedničkou a směrem doprava ob úhel α dvojkou a výše. Při $\kappa > 1$ je každý paprsek takto využit κ-krát.

Tak například u jednovrstvého vinutí se každé fázi přidělí celkem Q/3 drážek, ve hvězdici se zvolí pro každou fázi P_v/6 kladných vektorů málo od sebe fázově posunutých, stejný počet protivektorů, otočených o 180°, či 180°·Y/Q_p. Příklad pro Q = 24, m = 3, $2p$ = 4 a q = 2 ja na obr. 3.2 [2].



Obrázek 3.2: Vektorová hvězdice vinutí i s fázemi pro Q = 24, m = 3, $2p$ = 4 a q = 2 [2]

Jak uvádí [5], v případě zlomkového vinutí i počet drážek na jeden pól může vycházet necelé číslo, například pro dvouvrstvé vinutí $q = 1\frac{1}{2}$ a $2p$ = 4 je

$$Q_p = mq = 4,5$$

a elektrický úhel mezi drážkami je

$$\alpha_{el} = \frac{180^\circ\ el}{Q_p} = \frac{180^\circ\ el}{4,5} = 40^\circ\ el.$$

Nyní bude uveden velmi jednoduchý příklad vytvoření vektorové hvězdice a nakreslení vektorů fází i cívky vinutí. Tento jednoduchý příklad je převzat z [6] a doplněn z [2].

Stator má Q = 12, m = 3, q = 2, $2p$ = 2, plný krok, jednovrstvé vinutí.

Elektrický úhel mezi vedlejšími drážkami dle vztahu 3.3 je

$$\alpha_{el} = \frac{360^\circ}{Q}p = \frac{360^\circ}{12} \cdot 1 = 30^\circ$$

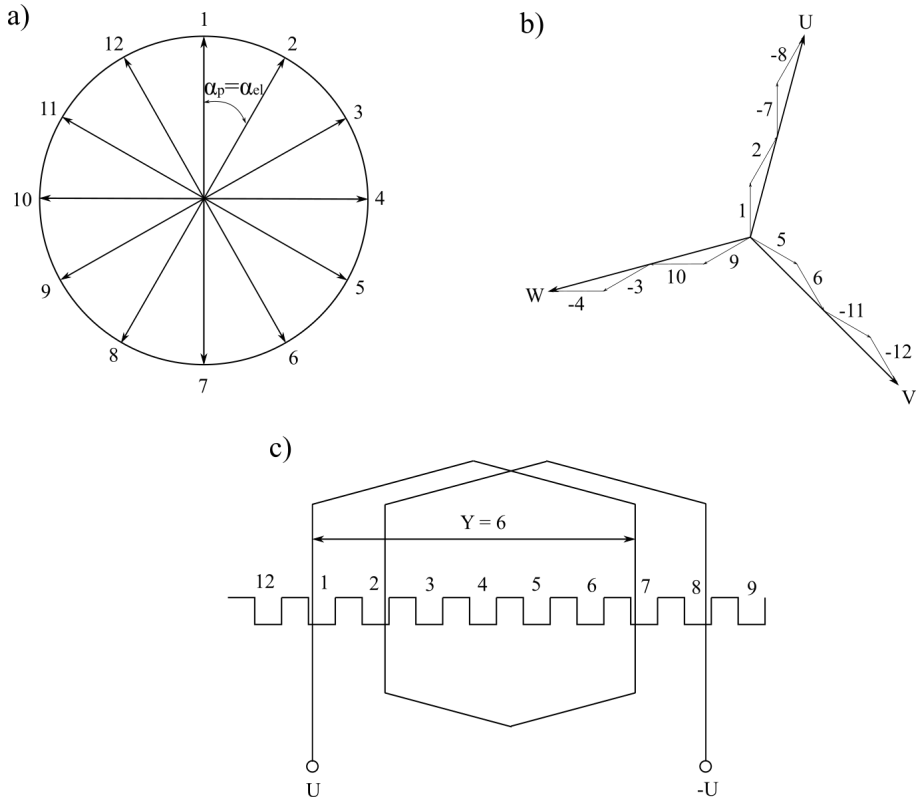
Protože Q a p jsou čísla soudělná, $\kappa = 1$, pak dle vztahu 3.6 je

$$\alpha_p = \frac{360^\circ p}{Q}\kappa = \frac{360^\circ \cdot 1}{12} \cdot 1 = 30^\circ$$

Vektorová hvězdice je vidět na obr. 3.3 [6] a).

Dále je na obr. 3.3 b) vidět sestavení vektorů fází, k čemuž dojde prostým vektorovým součtem všech vektorů patřících fázi. Lze si všimnout, že u každé fáze se přičítají kladné strany cívek a odečítají záporné, tedy dojde ve výsledku k součtu. Čísla na fázorovém diagramu odpovídají číslům na hvězdici.

Je vidět, že při q > 1 jsou fázory jedné fáze navzájem fázově posunuté a jejich geometrický součet neodpovídá součtu algebraickému. Tento fakt zohledňuje činitel rozlohy, o kterém bude více pojednáno v kapitole 3.4.1.



Obrázek 3.3: Postup vytvoření vektorové hvězdice, vektorů fází a cívky vinutí [6]

Dále je na obr. 3.3 c) vidět příklad jedné cívky vložené do drážky.

3.4 Činitel vinutí

Součet drážkových napětí jedné fáze je pouze teoretická hodnota, která však zpravidla neodpovídá hodnotě skutečné. Tu je možné získat či se k ní alespoň značně přiblížit při započítání dodatečných vlivů, které mají nebo můžou mít na velikost napětí. Tyto dodatečné vlivy v sobě obsahuje tzv. *činitel vinutí*. Ten se skládá z dalších, dílčích činitelů.

Celkový činitel vinutí je možné vypočítat podle vztahu

$$k_v = k_d k_y, \tag{3.8}$$

kde k_v je činitel vinutí, k_d je činitel rozlohy a k_y je činitel zkrácení kroku. Někdy se při výpočtu činitele vinutí uvažuje ještě činitel natočení drážek, ten je však v této práci zanedbán. Oba dílčí činitele lze vypočítat při znalosti některých základních parametrů vinutí resp. statoru.

3.4.1 Činitel rozlohy

Činitel rozlohy zohledňuje odlišný geometrický a algebraický součet fázorů jedné fáze vinutí statoru. Obecně tedy [6]

$$k_d = \frac{geometrický\ součet\ fázorů\ napětí}{algebraický\ součet\ fázorů\ napětí}. \tag{3.9}$$

Pro q = 1 je tento činitel roven jedné, jelikož k fázovému posunu nedochází. Pro větší počet drážek na pól a fázi je koeficient reálné číslo menší než jedna. Názorně ukazuje rozdíl v součtu napětí obr. 3.3 b).

Činitel rozlohy u trojfázového vinutí je možné získat ze vztahu [8]

$$k_{dv} = \frac{sin\left(v \cdot 30°\right)}{q \cdot sin\left(\frac{v \cdot 30°}{q}\right)}, \tag{3.10}$$

kde v je pořadí harmonické, tedy přirozené číslo, číslo 1 odpovídá základní harmonické. Pro zlomkové vinutí uvádí např. [9] vztah

$$k_{dv} = \frac{sin\left(v \cdot 30°\right)}{cq \cdot sin\left(\frac{v \cdot 30°}{cq}\right)}. \tag{3.11}$$

Číslo c je v tomto případě potřeba získat ze vztahu

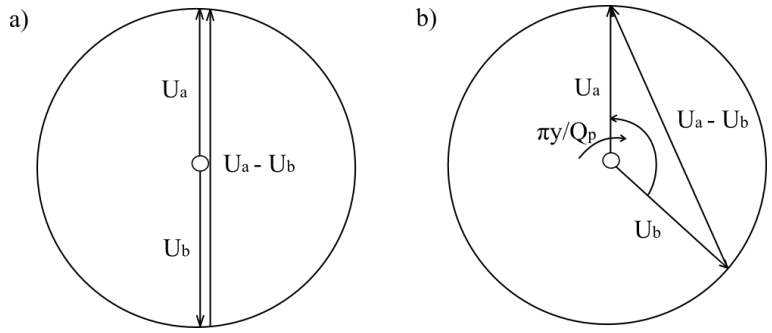
$$q = \frac{q_0}{c} \tag{3.12}$$

takovým způsobem, aby q_0 a c byla celá čísla pro zlomkové q.

3.4.2 Činitel zkrácení kroku

V případě činitele zkrácení kroku je záměrem započítat případný menší krok, než je pólová rozteč.

Jsou-li aktivní strany cívek při nezkráceném kroku v délce pólové rozteče, to je v případě vzdálenosti 180° el, je rozdílové napětí největší. Při kratší vzdálenosti se jedná o zkrácený krok a menší rozdílové napětí. Oba případy ukazuje obr. 3.4 [2]. V případě různého kroku cívek v rámci jednoho vinutí se pracuje s pojmem střední krok, který je jejich průměrem.



Obrázek 3.4: Napětí v drážkách cívky s a) plným a b) zkráceným krokem [2]

Činitel zkrácení kroku je vlastně poměrem geometrického a algebraického součtu napětí v drážkách jedné cívky [6]:

$$k_y = \frac{geometrický\ součet\ drážkových\ napětí}{algebraický\ součet\ drážkových\ napětí}. \tag{3.13}$$

Dá se odvodit užitečný vztah [8]

$$k_{yv} = sin\left(v \cdot 90^\circ \frac{Y}{Q_p}\right), \tag{3.14}$$

kde Y je krok cívky a Q_p je pólová rozteč. Je snadno poznatelné, že v případě délky kroku cívky rovné pólové rozteči je hodnota koeficientu pro první harmonickou rovna jedné. V případě zkrácení kroku, což se činí pro vyloučení vyšších harmonických složek napětí, se jedná vždy o reálné číslo menší než jedna.

3.4.3 Vyloučení vyšších harmonických

Zkrátí-li se krok, lze zkoumat, jaký dopad bude mít na vyšší nežádoucí harmonické činitel zkrácení kroku. Čím menší takový činitel pro vyšší harmonické, tím lépe. Například zkrácením kroku na Y = 5 při Q_p = 6 lze získat hodnoty dle tabulky 3.1.

Tabulka 3.1: Činitel zkrácení kroku pro Y = 5 a Q_p = 6

v	1	3	5	7	9	11
k_{yv}	0,966	-0,707	0,259	0,259	-0,707	0,965

Lze vidět, že pátá a sedmá harmonická jsou tímto krokem značně potlačeny, zatímco na podstatnou první harmonickou je vliv malý. Amplituda jedenácté harmonické má zpravidla nízkou amplitudu, tedy její malé umenšení není zásadní.

Aby požadovaná harmonická vymizela, její činitel kroku musí být roven nule. Jde především o liché harmonické, protože u symetrických vinutí se sudé harmonické nevyskytují

a pro vypadnutí v-té harmonické je proto možné zvolit krok [9]

$$Y = \left(1 \pm \frac{1}{v}\right) Q_p, \tag{3.15}$$

kde kladné znaménko platí pro možnost zkráceného kroku a záporné pro prodloužený krok.

3.5 Magnetické pole ve vzduchové mezeře a Görgesův diagram

3.5.1 Vlastnosti magnetického pole

Zatímco v předchozí kapitole byla stručně popsána analýza vinutí podle toho, jak se v něm indukuje napětí, následující text bude věnován analýze vinutí statoru podle magnetického pole, jaké vzniká ve vzduchové mezeře.

Točivé magnetické pole má ve vzduchové mezeře tvar přímo závislý na vinutí statoru. Obecně platí, že čím je tvar magnetického pole bližší sinusoidě, tím je méně narušena správná funkce motoru negativními vlivy vyšších harmonických. Snaha dosáhnout ideální varianty, průběhu funkce sinus, se však může v realitě pouze přiblížit tomuto výsledku. Toho se dosáhne větším počtem drážek na pól a fázi a také vhodným zkrácením kroku [5].

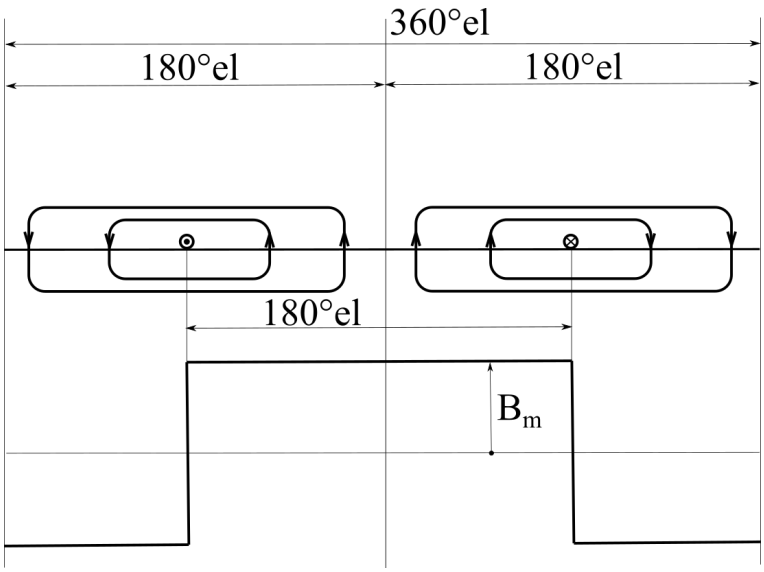
V této kapitole nebude uvažován tvar cívek, výška čel či jejich spojení. Předmětem zájmu analýzy budou pouze aktivní strany cívek, tedy část cívek v samotných drážkách, a proud v nich, respektive jeho velikost, fáze a směr. To jsou totiž faktory, které jsou k analýze vinutí podle magnetického pole potřeba.

Předpokladem pro analýzu průběhu magnetického pole je konstantní magnetický odpor magnetického obvodu ve vzduchové mezeře a přítomnost všech vodičů v ose drážek, tedy celé buzení drážky v jednom bodě obvodu vzduchové mezery resp. statoru se mění skokově pro celou drážku. Za těchto předpokladů vzniká díky jedné cívce obdélníkový tvar. Příklad takového jednoduchého magnetického pole cívky je na obr. 3.5 [5]. V horní části obrázku lze vidět dvě drážky, tečkou ve vodiči je standardně označován proud tekoucí směrem ven z obrázku, zatímco křížkem proud tekoucí do obrázku. V dolní části je zakreslen průběh indukce. Lze zřetelně vidět, jak jediná cívka ovlivňuje magnetické pole.

Vlivy cívek se však sčítají a situace není ve skutečnosti zdaleka tak jednoduchá, jak bylo ukázáno. Magnetické pole třífázového vinutí je daleko složitější.

Pro vykreslení jeho tvaru slouží tzv. *Görgesův diagram*. Jedná se o mnohoúhelník, který se skládá z vektorů magnetických napětí jednotlivých drážek. Ty jsou zakresleny za sebou postupně jedna drážka za druhou, dokud nevznikne uzavřený obrazec [4].

Magnetické pole vzniká v každém okamžiku znovu v nové podobě. Ve skutečnosti se mění i samotný tvar křivky a tyto změny se zmenšují s přibližováním se diagramu kruhovému tvaru. Právě tyto rozdíly tvaru pole způsobují ve svém výsledku elektromotorické



Obrázek 3.5: Vliv jedné cívky na magnetické pole [5]

síly, které mají na funkci motoru negativní vliv [5]. Ideální, ale nerealizovatelná varianta by byla kružnice, podobně jako ideální varianta tvaru indukce ve vzduchové mezeře by byla sinusoida.

Görgesův diagram tak vlastně slouží dvěma funkcím: již od pohledu svojí podobností či nepodobností kružnici ukazuje, jak dobře bylo vinutí navrženo. Zároveň umožňuje snadno vykreslit tvar magnetického pole. To je sice možné vykreslit i bez tohoto diagramu, nicméně je jím proces velmi ulehčen a zpřehledněn. V dalším textu bude vysvětlen způsob vykreslení Görgesova diagramu a následně magnetického pole z něj na jednoduchém příkladu.

3.5.2 Vytvoření Görgesova diagramu a vykreslení magnetického pole

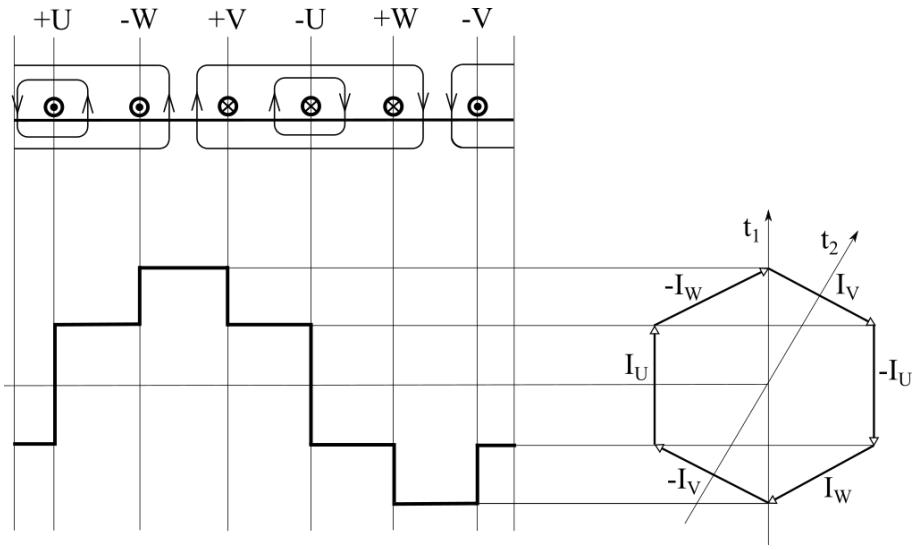
Nejdříve je tedy vhodné vytvořit pro vinutí Görgesův diagram. Poté se nakreslí průběh magnetického pole, ideálně pro oba extrémy tvaru průběhu pole.

O tvaru Görgesova diagramu rozhoduje počet drážek statoru Q, počet vrstev vinutí, počet drážek na pól a fázi q a jeho celost, či zlomkovost, zkrácení kroku a počet pólů $2p$.

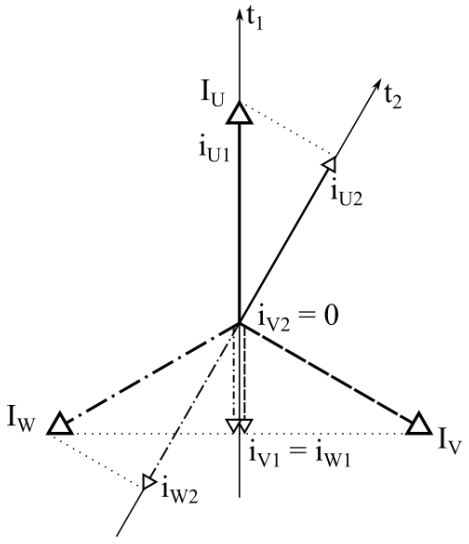
Za jednoduchý příklad poslouží stator o následujících parametrech: $Q = 6$, $m = 3$, $2p = 2$ a $q = 1$, jednovrstvé vinutí s plným krokem. Jedná se vlastně o nejjednodušší případ trojfázového vinutí. Na obr. 3.6 [5] je nakresleno statorové vinutí a kruhový obvod statoru rozvinutý do roviny. Vodiče s tečkou mají proud směřující ke čtenáři, vodiče s křížkem směrem od čtenáře. Pod drážkami a vodiči je vidět tvar magnetické indukce ve vzduchové mezeře a vpravo odpovídající Görgesův diagram.

Důvodem, proč má každá drážka přidělen stejně veliký vektor, je to, že všechny drážky mají stejný počet vodičů, kterými protéká v době amplitudy stejný maximální proud [8].

Diagram bude vykreslen pro dva časy t_1 a t_2, zobrazené na 3.7 [5] společně s proudy trojfázového vinutí. Aktuální velikost proudů I_U, I_V a I_W v těchto časech je zobrazena na přímkách těmto časům odpovídajících. V čase t_1 je proud fáze U největší, fáze V a W mají opačnou polaritu a poloviční velikost. V čase t_2, který je posunut o 30° oproti času t_1, má fáze V proud rovný nule a oba proudy fází I_U a I_W mají velikost 0,866I_U resp. 0,866I_W, ovšem s navzájem opačnými polaritami.



Obrázek 3.6: Statorové vinutí, Görgesův diagram a magnetická indukce v čase t_1 [5]



Obrázek 3.7: Vektorová hvězdice proudů a proudy v časech t_1 a t_2 [5]

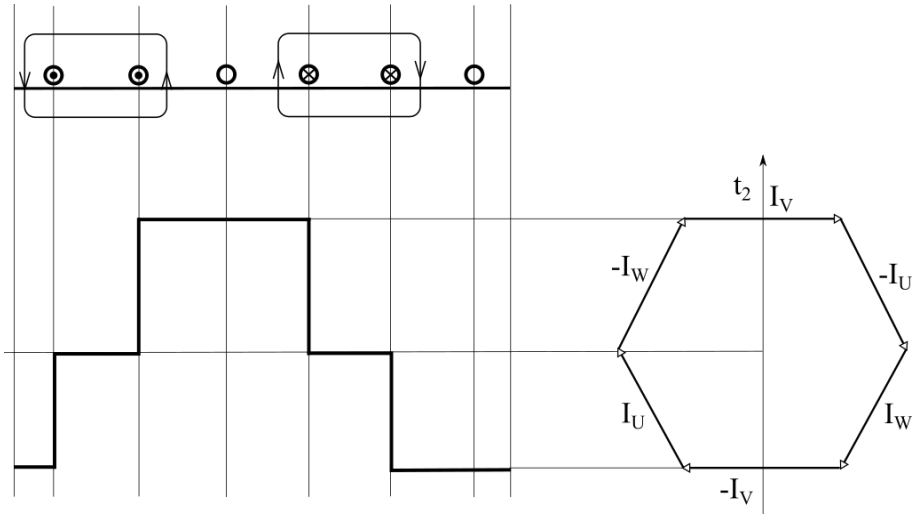
Nejdříve bude vyšetřen stav v čase t_1. Postup vytvoření Görgesova diagramu je následující. Postupuje se zleva doprava přes všechny drážky vinutí, zobrazené na obr. 3.6. První na řadě je fáze +U. Jak lze vidět na obr. 3.7, jedná se o vektor směřující vzhůru, zakreslí se tedy jako počátek diagramu. Následuje -W. Fázi W odpovídá ve vektorovém diagramu směr doleva dolů, ovšem v polaritě -W, tedy opačné. Zakreslí se tak, že počátek tohoto

vektoru je koncem vektoru předchozího a míří tedy doprava nahoru. Vektor fáze +V je zanesen opět podle vektorového diagramu tak, aby vektor začínal na konci předchozího vektoru. Pro -U se z vektorové hvězdice vezme vektor fáze U, ovšem záporné polarity. Tak se pokračuje přes +W, -V a skončí se na počátku vektoru prvního. Tím je diagram uzavřen a hotov. Podobný postup vykreslení platí i pro složitější vinutí.

Tvar magnetické indukce lze v tomto jednoduchém případě snadno odvodit i z drážek a proudů v nich, ale bude využita univerzální metoda vykreslení z Görgesova diagramu a průběh bude zakreslen pod vinutí statoru, viz obr. 3.6.

Zde se pracuje s průměty do kolmé osy. Tedy počáteční vektor $I_U = i_U$ z diagramu je zakreslen pod odpovídající fázi +U v plné velikosti, jelikož je kolmý. Dojde tedy k navýšení. Dále je hodnota stejná a u cívky fáze následující, tedy -W, dojde k navýšení, nicméně už o menší část, odpovídající průmětu druhého vektoru diagramu, tedy $-i_W$, do kolné osy. U fáze +V dojde ke snížení o velikost průmětu i_B, vektor směřuje dolů. Dále u -U o dvojnásobnou velikost klesne indukce, jelikož je následující vektor o plné velikosti fáze $-i_U$, ovšem směrem dolů. Stejně se zakreslí i fáze +W a -U. Tvar magnetické indukce je tak pro celý obvod vykreslen.

To je však pouze polovina informace, tedy pouze z jednoho časového okamžiku t_1. Je potřeba získat a zanalyzovat také opačný extrém tvaru pole, tedy časový okamžik v čase t_2. Postup vykreslení diagramu i magnetického pole je v principu totožný, výsledek však už nikoli, jak ukazuje obr. 3.8 [5].



Obrázek 3.8: Statorové vinutí, Görgesův diagram a magnetická indukce v čase t_2 [5]

Görgesův diagram je pootočen o 30°, tedy o úhel mezi oběma zakreslenými časy. Průmět jeho vektorů do kolmé osy dle popsaného postupu však způsobuje velmi odlišný tvar indukce ve vzduchové mezeře.

Tento ukázkový příklad je samozřejmě jen velmi špatně použitelný v praxi: tvary magnetické indukce i diagramu jsou velmi vzdálené požadovaným kvalitám sinusoidy resp. kružnice.

3.6 Tingleyho schéma

Tingleyho schéma je speciální postup vytvořený pro návrh vinutí točivého stroje a hodí se také jako pro výpočet činitele vinutí. Protože postup výpočtu činitele vinutí byl již popsán v kapitole 3.4, bude tato kapitola zaměřena jen na využití Tingleyho schématu pro návrh vinutí.

Postup návrhu vinutí bude popsán na jednoduchém příkladu zlomkového vinutí, uvedeného v [8]. Bude potřeba navrhnout trojfázové vinutí s následujícími parametry: Q = 18, $2p$ = 4, q bude zvoleno $q = 1\frac{1}{2}$ a půjde o dvouvrstvé vinutí. Cívky budou se stejným, nicméně nikoli plným, ale zkráceným krokem.

V první řadě je třeba q převést ze smíšeného zlomku do základního tvaru a vynásobením počtem fází získat pólovou rozteč

$$Q_p = mq = 3 \cdot 1\tfrac{1}{2} = 3 \cdot \tfrac{3}{2} = \tfrac{9}{2}$$

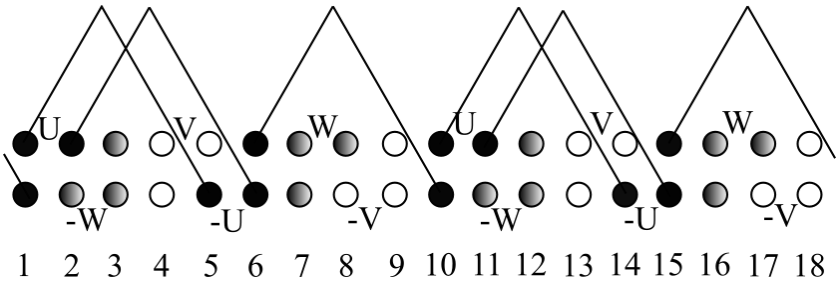
Je vhodné vytvořit tabulku pro následující postup, jako je například tabulka 3.2 [8]. Čitatel pólové rozteče je počet políček v řádku tabulky připadajících na jeden pól, v tomto případě 9, jmenovatel určuje, kolik políček zabírá jedna drážka. Počet vyplňovaných řádků tabulky je počtem pólů stroje, v tomto případě jsou řádky čtyři, protože $2p$ = 4.

Tabulka 3.2: Tingleyho schéma pro Q = 18, $2p$ = 4, $q = 1\frac{1}{2}$ [8]

Pól	U			W			V		
I	1		2		3		4		5
II		6		7		8		9	
III	10		11		12		13		14
IV		15		16		17		18	

Začíná se vpravo nahoře, u prvního pólu a první fáze. Zde se zapíše číslo první drážky. Tato drážka zabírá počet políček odpovídající jmenovateli pólové rozteče $Q_p = \frac{9}{2}$, tedy dvě políčka, jedno další tedy touto drážkou bude také blokováno. Následující drážka bude proto zapsána až do třetího políčka a opět zabírá dvě místa.

Takto se postupuje zprava doleva po řádcích s tím, že blokovaná políčka se mohou přenášet do následujícího řádku, jako by se jednalo o řádek jeden. Postup pokračuje, až je počet drážek naplněn, v tomto případě je jich 18. Vyplněná část se následně rovnoměrně rozdělí na tři sloupce pro tři fáze stroje v pořadí U, W, V. Tím je určeno, ve které drážce bude která fáze.



Obrázek 3.9: Dvouvrstvé vinutí pro Q = 18, $2p$ = 4, $q = 1\frac{1}{2}$ a Y = 4 [5]

Jedná se však jen o jednu vrstvu stroje. Druhou vrstvu není třeba navrhovat – má naprosto stejné rozložení, jen posunuté o krok. Vhodné zkrácení kroku je přibližně na 80 % pólové rozteče. Větší zkrácení kroku může zhoršit průběh magnetického pole [4]. V tomto případě bude zvolen krok Y = 4. Navržené vinutí s oběma vrstvami je zobrazeno na obr. 3.9 [5].

4 ANALÝZA VINUTÍ KONKRÉTNÍHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

4.1 Úvod k analýze a volba základních parametrů

Stator asynchronního motoru zvoleného pro tuto práci má počet drážek roven Q = 45. Do tohoto počtu drážek je možno vložit vinutí více různými způsoby, popsanými ve stručnosti v kapitole 3.2.

Jak je však uvedeno v kapitole 3.5, předmětem analýzy pro vyhodnocení vinutí statoru dle tvaru magnetického pole a Görgesova diagramu není vlastní styl vinutí, ale jen aktivní vodiče a proud v nich. Analýza ve zmíněné kapitole bude nyní aplikována na zvolený asynchronní motor.

Bude uvažováno pouze dvouvrstvé vinutí a aplikována jeho hlavní přednost: zkrácený krok. Jak zmíněno v kapitole 3.6, bude zvolena doporučená velikost kroku, tedy 80 % pólové rozteče. V případě desetinného čísla bude hodnota zaokrouhlena směrem dolů.

Jelikož pro počet drážek na pól a fázi musí platit, že $q \geq 1$, potom dle vztahu 3.1 je pro trojfázové vinutí maximální počet pólů (což může být jen sudé číslo) roven

$$2p = \frac{Q}{mq} = \frac{45}{3 \cdot 1} = 15 \rightarrow 14.$$

Počet pólů ve statoru o $Q = 45$ je tedy možný

$$2p = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14$$

a analyzovány budou všechny tyto možnosti. Protože u zvoleného statoru není možné získat celočíselný počet drážek na pól a fázi q, bude vinutí ve všech případech zlomkové. Všechna vinutí byla navržena s pomocí Tingleyho schémat, která jsou k dispozici v příloze v tabulkách 7.1 až 7.7.

Důležitým charakteristickým údajem každého vinutí je činitel vinutí, jak popsáno v kapitole 3.4. Při analýze následujících vinutí bude v tabulkách vypsán činitel vinutí pro první harmonickou, kde platí, že čím vyšší – tedy bližší číslu 1 – činitel vyjde, tím lépe. Zároveň budou vypsány i činitele pro následující liché harmonické až po jedenáctou harmonickou. U těchto rušivých složek jsou výhodnější nižší hodnoty. Vypočítány budou i dílčí činitele, tedy činitel rozlohy a činitel zkrácení kroku, k jejichž výpočtům bude užito vztahů 3.11 a 3.14 a následně celkový činitel vinutí dle vztahu 3.8.

Dále dojde k vykreslení tvaru magnetické indukce ve vzduchové mezeře a Görgesova diagramu konkrétního vinutí. Dojde k zakreslení obou extrémů tvaru magnetické indukce v časech t_1, kdy je velikost vektoru fáze U maximální, a t_2, kdy je velikost vektoru fáze V rovna nule, jak je blíže popsáno v kapitole 3.5.2.

Pro vykreslení Görgesových diagramů a tvarů magnetického pole ve vzduchové mezeře

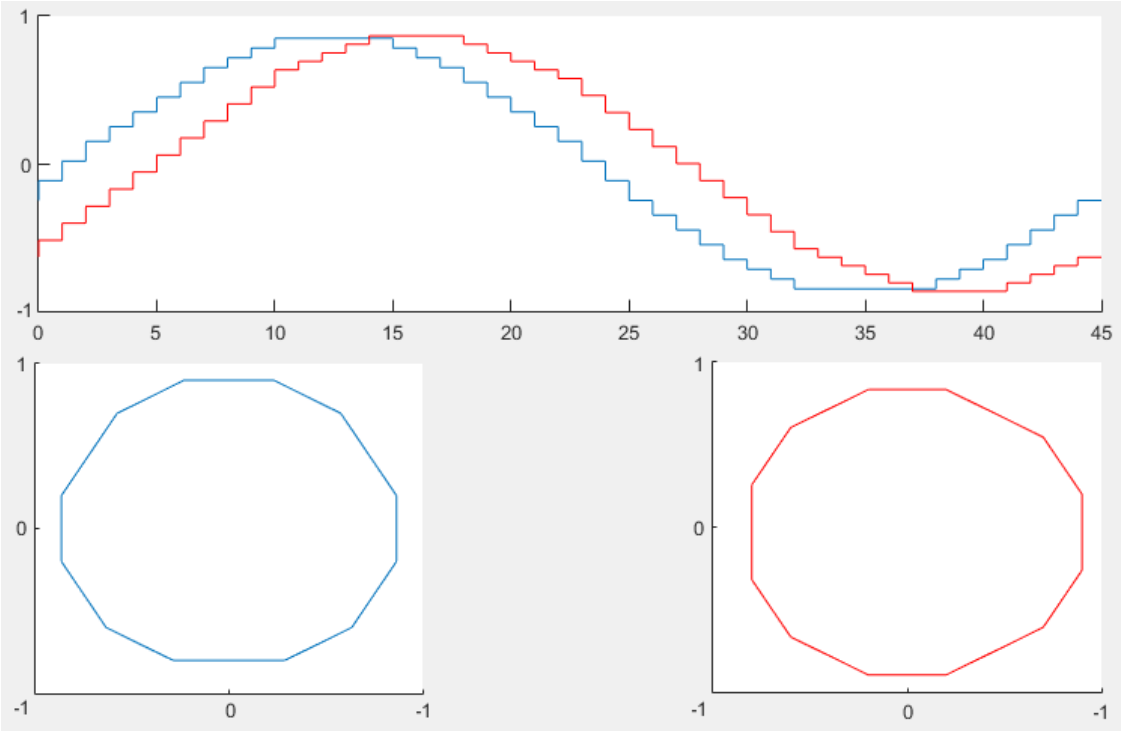
byl vytvořen program v aplikaci Matlab. Následující obrázky jsou tedy jeho grafickým výstupem.

4.2 Analýza pro zvolené vlastnosti vinutí

U dvoupólového stroje $Q = 45$, $2p = 2$, $q = 7\frac{1}{2}$, $Y = 18$ je tvar magnetické indukce ve vzduchové mezeře, jak ukazuje obrázek 4.1, velmi podobný sinusoidě. Jedná se o hezký, pravidelný tvar a – dle očekávání – po obvodu stroje projde sinusoida pouze jednou. Görgesovy diagramy pro oba časy jsou velmi podobné kružnici a tedy pootočení o třicet stupňů se na tvaru indukce podepíše jen velmi málo. Lze si snad všimnout jen o něco kratší hodnoty v amplitudě, která je rovněž nepatrně vyšší v obou polaritách.

Tabulka 4.1: Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 2$, $q = 7\frac{1}{2}$, $Y = 18$

v	1	3	5	7	9	11
k_{dv}	0,955	0,638	0,192	-0,138	-0,216	-0,089
k_{yv}	0,951	-0,588	0,000	0,588	-0,951	0,951
k_{vv}	0,908	-0,375	0,000	-0,081	0,205	-0,085

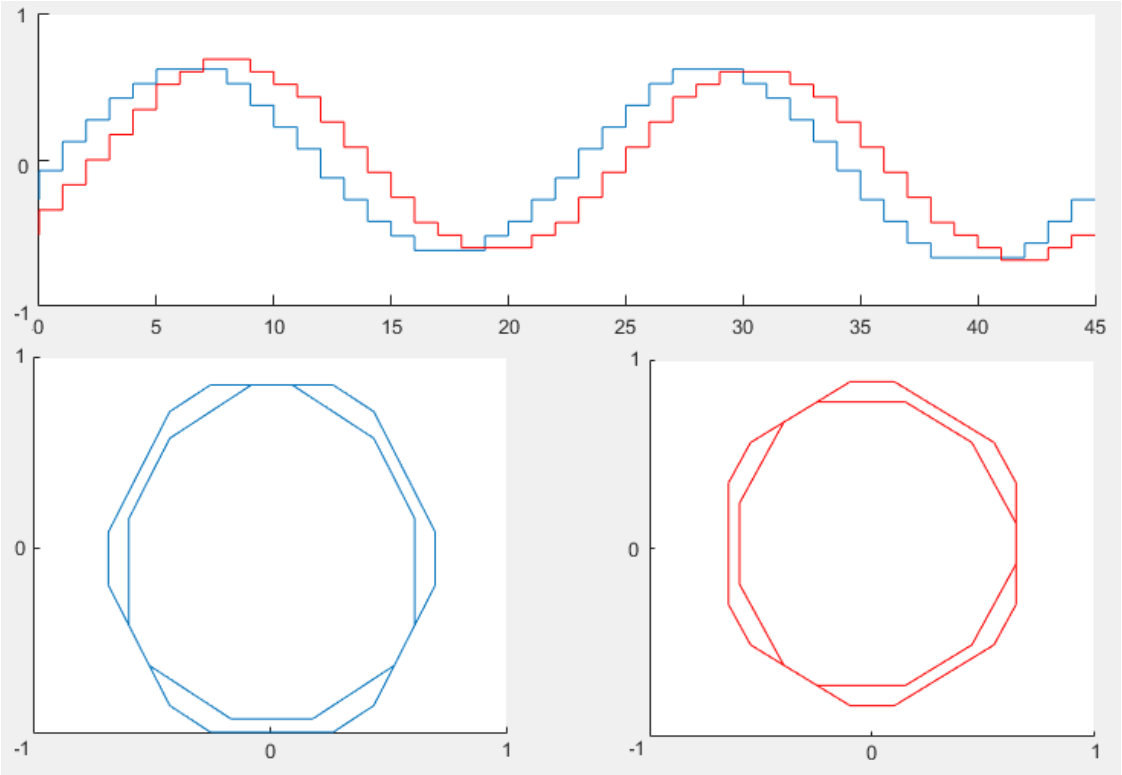


Obrázek 4.1: Dvoupólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2

V tabulce 4.1 lze vidět i velmi dobré hodnoty činitele vinutí pro první harmonickou, třetí harmonická je poněkud vyšší, devátá už má menší hodnotu, jinak jsou hodnoty velmi nízké, za zmínku stojí především pátá harmonická, kde je celkový činitel roven nule. Tato výhodná hodnota je zajištěna činitelem zkrácení kroku.

Tabulka 4.2: Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 4$, $q = 3\frac{3}{4}$, $Y = 9$

v	1	3	5	7	9	11
k_{dv}	0,955	0,638	0,192	-0,138	-0,216	-0,089
k_{yv}	0,951	-0,588	0,000	0,588	-0,951	0,951
k_{vv}	0,908	-0,375	0,000	-0,081	0,205	-0,085



Obrázek 4.2: Čtyřpólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2

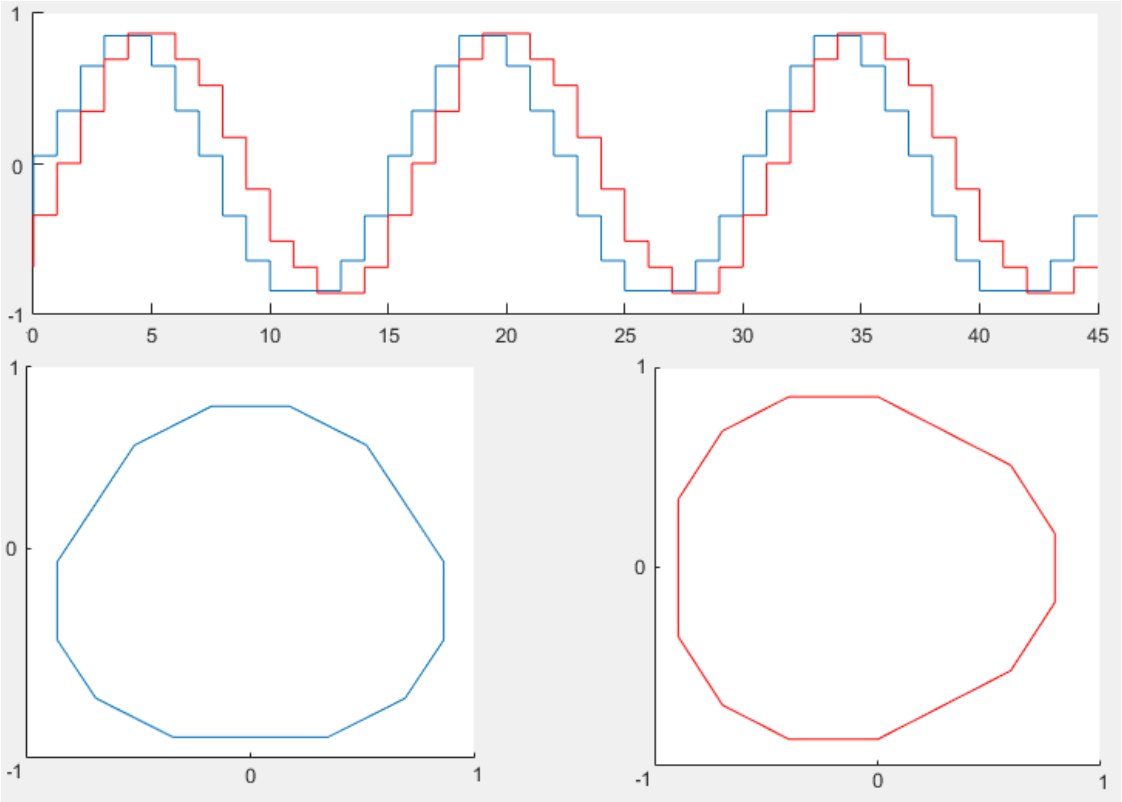
U čtyřpólového stroje $Q = 45$, $2p = 4$, $q = 3\frac{3}{4}$, $Y = 9$ lze na obr. 4.2 už vidět významné odchýlení od tvaru kružnice. Přestože alespoň obrys celého obrazce kružnici připomíná poměrně věrně, obsahují diagramy nepravidelnosti, které nutně při otočení vedou k deformaci magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi časy t_1 a t_2. Ta naštěstí není značná, lze vidět, že samotná velikost magnetické indukce v amplitudě se mění. Tvar je však stále velmi blízký funkci sinus.

U činitelů vinutí v tabulce 4.2 lze spatřit zcela stejné hodnoty jako u dvoupólového stroje.

Tabulka 4.3: Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 6$, $q = 2\frac{1}{2}$, $Y = 6$

v	1	3	5	7	9	11
k_{dv}	0,957	0,647	0,200	-0,149	-0,247	-0,109
k_{yv}	0,951	-0,588	0,000	0,588	-0,951	0,951
k_{vv}	0,910	-0,380	0,000	-0,088	0,235	-0,104

V případě stroje šestipólového $Q = 45$, $2p = 6$, $q = 2\frac{1}{2}$, $Y = 6$ na obr. 4.3 si nelze nevšimnout podobnosti Görgesových diagramů s dvoupólovým strojem. Na první pohled



Obrázek 4.3: Šestipólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2

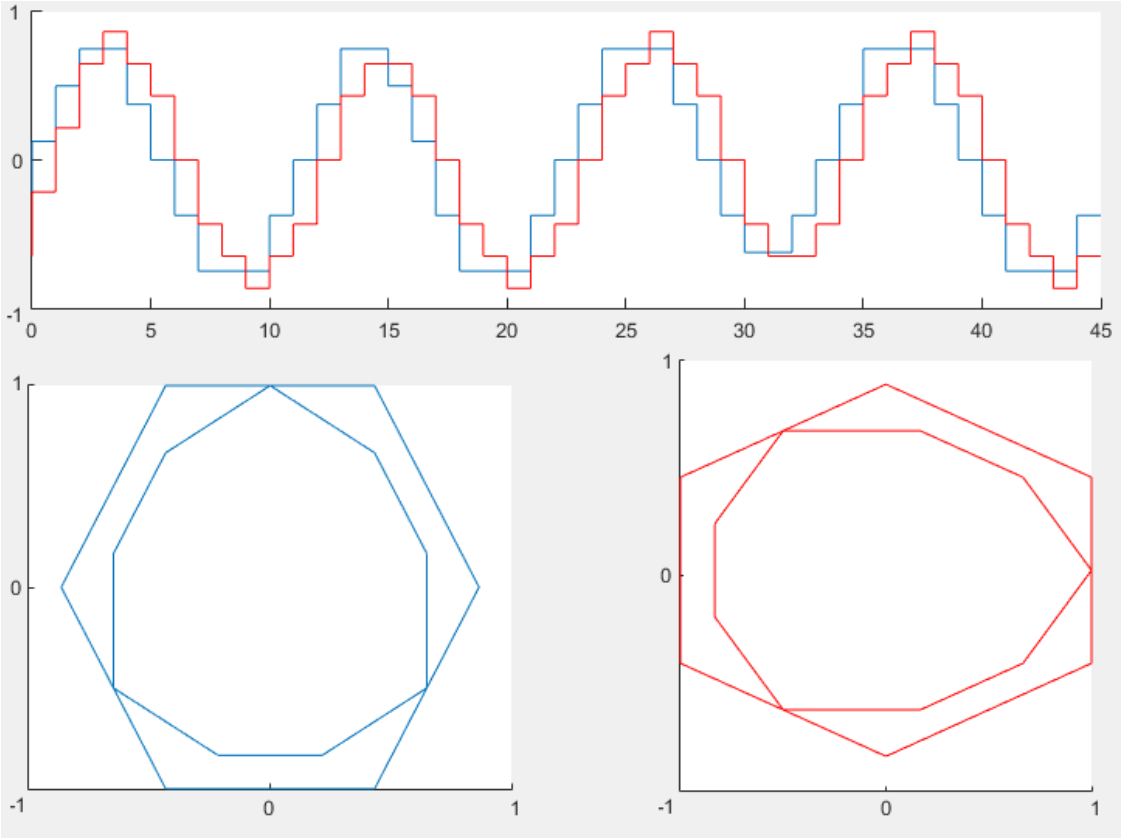
je rozdíl velmi malý, ve skutečnosti větší odlišnost od kružnice protáhnutím v jednom směru při pootočení mezi časy t_1 a t_2 způsobuje opět vyšší odlišnost od sinusoidy. Tvar je v místě před amplitudou a po ní už viditelně odlišný, nicméně tvar je velmi dobře zachován a z celkového pohledu velmi pravidelný. Amplitudy mají v obou časech velmi podobnou velikost, v čase t_1 je delší amplituda u záporné polarity.

V tabulce 4.3 stále přetrvává činitel vinutí s nulovou hodnotou u páté harmonické. Oproti strojům s menším počtem pólů došlo ke zvýšení hodnot činitelů, u první harmonické bohužel jen nepatrně, u zbylých (kromě páté) více, ale ne mnoho.

Tabulka 4.4: Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 8$, $q = 1\frac{7}{8}$, $Y = 4$

v	1	3	5	7	9	11
k_{dv}	0,955	0,638	0,192	-0,138	-0,216	-0,089
k_{yv}	0,899	-0,208	-0,643	0,999	-0,588	-0,276
k_{vv}	0,858	-0,133	-0,123	-0,138	0,127	0,025

Osmipólový stroj $Q = 45$, $2p = 8$, $q = 1\frac{7}{8}$, $Y = 4$ na obr. 4.4 už ukazuje zajímavější a významnější odchylky od ideálních tvarů charakteristik. Görgesovy diagramy už ani obrysem neodpovídají přibližné kružnici – jedná se o šestiúhelníky, jejichž tvar je navíc doplněn nekruhovým vnitřním útvarem s významnými odchylkami po obvodu. Samotný tvar i důsledky pootočení pak vytvářejí tvar indukce, který sinusový tvar připomíná méně než předchozí, výše uvedené stroje. Velikost amplitudy ve vzduchové mezeře se mění po obvodu jak v rámci jednoho času, tak – a o to více – mezi časy t_1 a t_2. V čase t_2



Obrázek 4.4: Osmipólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2

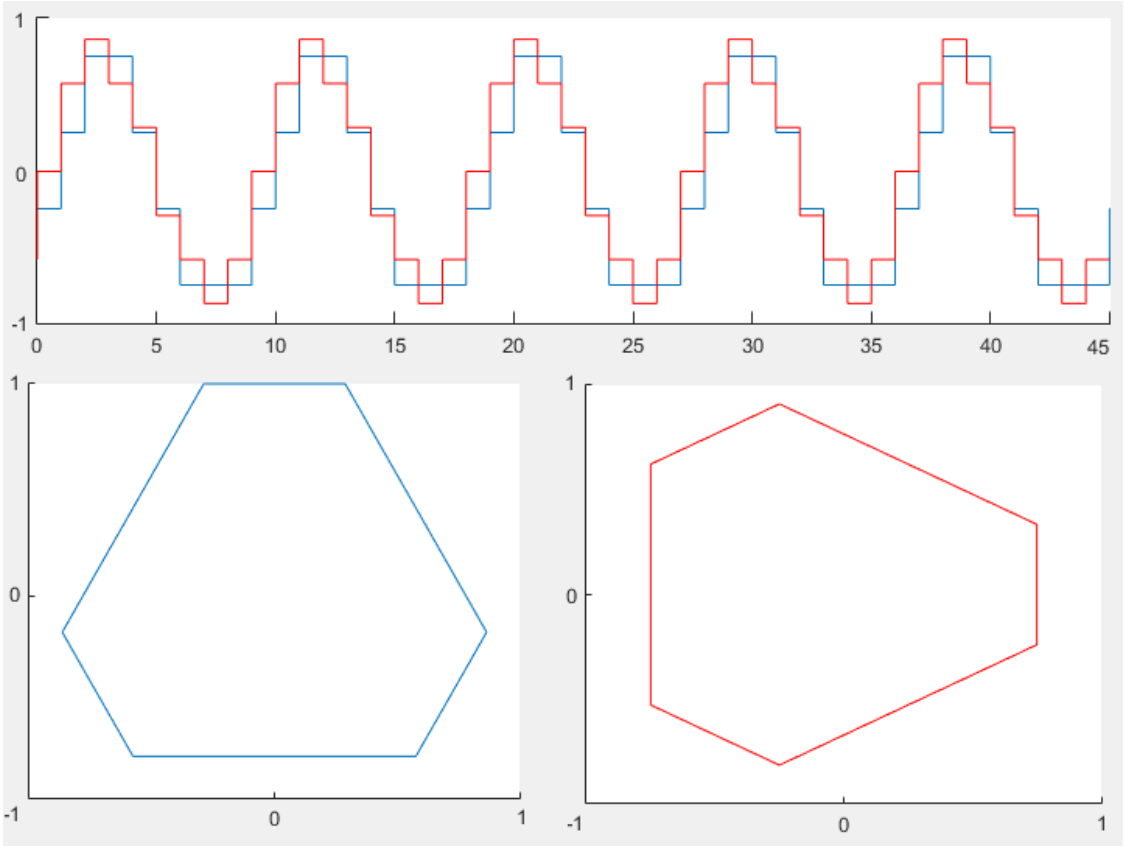
lze tento rozdíl vidět zřetelněji. U třetí záporné amplitudy si lze povšimnout, jak jediná snížená hodnota indukce v čase t_1 se promítá i do t_2, kde je ovšem nepravidelností mezi amplitudami více.

Na první pohled do tabulky 4.4 lze spatřit méně kvalitní hodnoty než u předchozích strojů, což u méně kvalitního grafického výstupu nepřekvapí. Činitel vinutí u první harmonické je relativně nízký, vinu nese především činitel zkrácení kroku, jelikož činitel rozlohy je velmi dobrý. U třetí harmonické je hodnota nižší než dříve, u sedmé je navýšena, pátá harmonická má tentokrát bohužel nenulovou hodnotu.

Tabulka 4.5: Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 10$, $q = 1\frac{1}{2}$, $Y = 3$

v	1	3	5	7	9	11
k_{dv}	0,960	0,667	0,218	-0,177	-0,333	-0,177
k_{yv}	0,866	0,000	-0,866	0,866	0,000	-0,866
k_{vv}	0,831	0,000	-0,188	-0,154	0,000	0,154

Tvar Görgesových diagramů na obr. 4.5 u desetipólového stroje $Q = 45$, $2p = 10$, $q = 1\frac{1}{2}$, $Y = 3$ nemá s kružnicí mnoho společného. Jeho pootočení musí nutně vytvářet deformaci indukce, nicméně se jedná o tvar pravidelný. Tvar magnetické indukce je velmi podobný osmipólovému stroji, ba co víc, je také zcela pravidelný, a to v obou časech. Podobnost se sinusoidou je sice menší, ale amplitudy jsou v rámci jednoho časového bodu zcela stejné ve všech částech vzduchové mezery a mezi časy t_1 a t_2 dochází sice k odlišným



Obrázek 4.5: Desetipólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2

hodnotám, ale tvar se příliš neposouvá do stran, tvary podobné funkci sinus jsou téměř "na sobě".

V tabulce 4.5 si lze všimnout dvou nulových hodnot, a to díky zkrácenému kroku. Jedná se o činitele pro třetí a devátou harmonickou, první harmonická je bohužel na nepříjemně nízké hodnotě, činitel rozlohy pro tuto harmonickou je přitom nejvyšší pro všechny analyzované stroje.

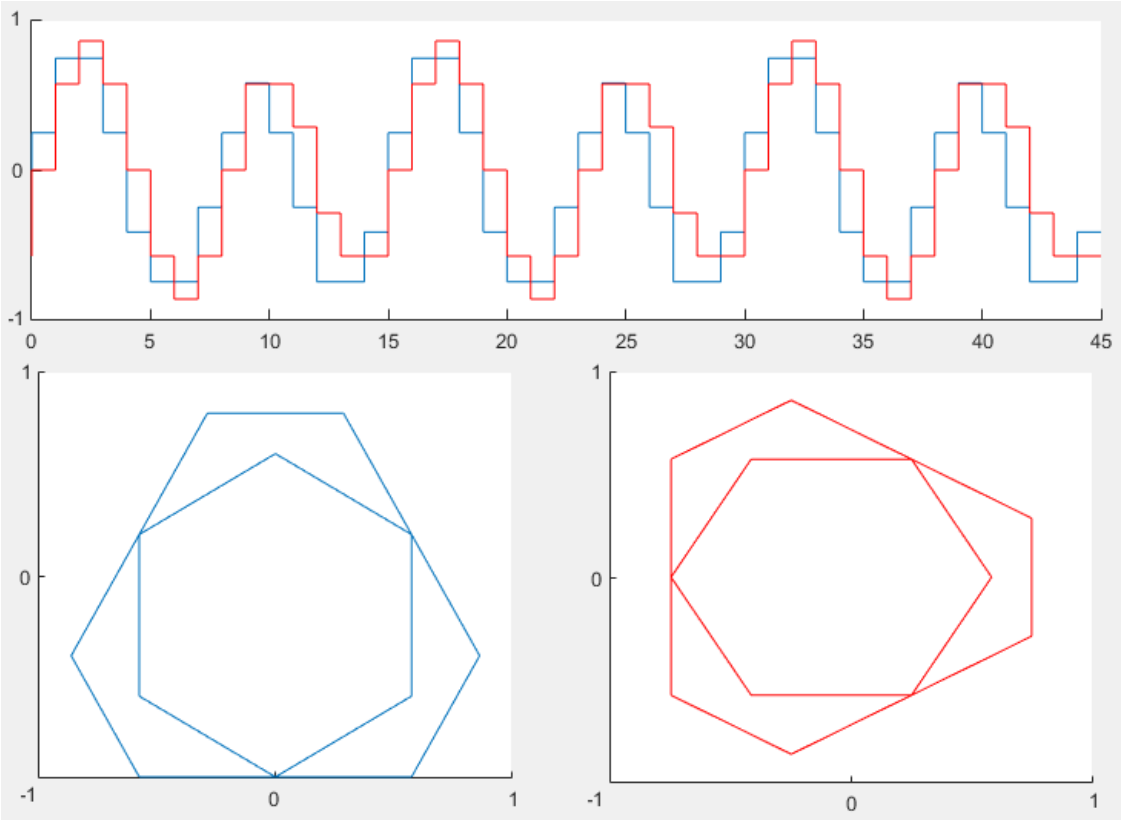
Tabulka 4.6: Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 12$, $q = 1\frac{1}{4}$, $Y = 3$

v	1	3	5	7	9	11
k_{dv}	0,957	0,647	0,200	-0,149	-0,247	-0,109
k_{yv}	0,951	-0,588	0,000	0,588	-0,951	0,951
k_{vv}	0,910	-0,380	0,000	-0,088	0,235	0,104

Tabulka 4.7: Činitel rozlohy, zkrácení kroku a celkový činitel pro $Q = 45$, $2p = 14$, $q = 1\frac{1}{14}$, $Y = 2$

v	1	3	5	7	9	11
k_{dv}	0,955	0,638	0,192	-0,138	-0,216	-0,089
k_{yv}	0,829	0,208	-0,985	0,530	0,588	-0,970
k_{vv}	0,792	0,133	-0,189	-0,073	-0,127	0,086

Görgesovy diagramy dvanáctipólového stroje $Q = 45$, $2p = 12$, $q = 1\frac{1}{4}$, $Y = 3$ na obr. 4.6



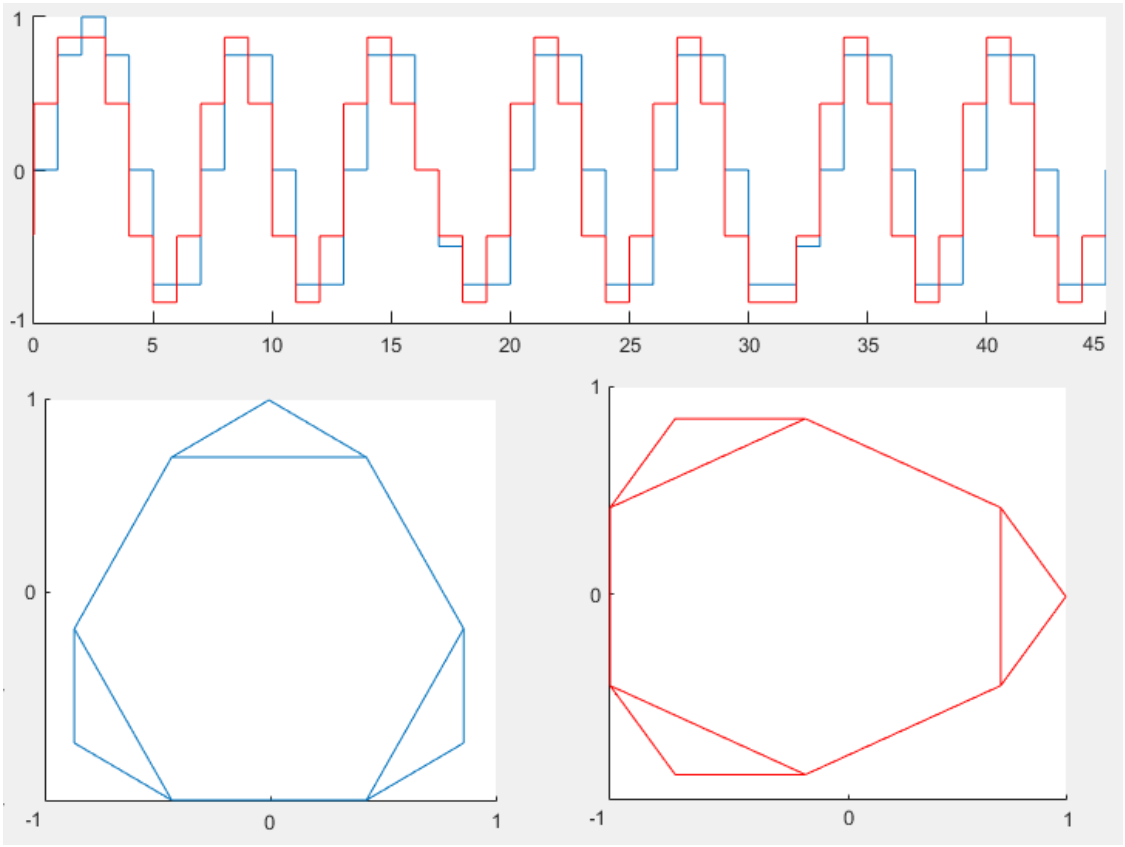
Obrázek 4.6: Dvanáctipólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2

jsou na první pohled velmi podobné stroji osmipólovému, respektive kombinaci desetipólového a osmipólového stroje. Každá druhá sinusoida, nebo lépe řečeno, každý druhý tvar připomínající sinusoidu, je shodný. Velikost amplitud se mění, tedy zvětšuje a zmenšuje se v obou polaritách. To platí pro oba časy t_1 a t_2. Tvar není dobrý a jistě vede k neideálnímu provozu stroje. Tabulka 4.6 ukazuje tytéž hodnoty, jako má stroj šestipólový.

Magnetická indukce čtrnáctipólového stroje $Q = 45$, $2p = 14$, $q = 1\frac{1}{14}$, $Y = 2$ na obr. 4.7 je velmi podobná svým tvarem i relativní pravidelností stroji desetipólovému. Nalézají se zde však dvě větší nepravidelnosti. V čase t_2 u páté záporné amplitudy je delší dvojnásobně oproti ostatním, podobně první amplituda kladná. Především však první amplituda v čase t_1 vykazuje jedinečný výkyv směrem do vyšších hodnot, který nejde pro oba časy po celé vzduchové mezeře jinde nalézt. Görgesovy diagramy mají tvar velmi vzdálený od kružnice, který svým pootočením předpovídá zdaleka neideální tvar indukce ve vzduchové mezeře.

Tabulka 4.7 pak ukazuje nepříjemné zjištění hodnoty činitele vinutí pro čtrnáctipólový stroj. Hodnota pro první harmonickou je zdaleka nejnižší ze všech analyzovaných strojů, a to díky činiteli zkráceného kroku. Ostatní činitele jsou ve srovnání s ostatními stroji na podobné a většinou i nižší úrovni, žádný z nich bohužel nevychází nulový, tedy žádné liché harmonické po jedenáctou se nebylo možné zbavit.

Jako celek lze ve srovnání zpozorovat následující závislosti: Ve vzduchové mezeře by se při ideálním tvaru, tedy sinusově funkci, nalézalo vždy p sinusoid. Tvary magnetické



Obrázek 4.7: Čtrnáctipólový stroj – Magnetická indukce a Görgesovy diagramy pro časy t_1 a t_2

indukce sinusoidě se blížící toto pravidlo zachovávají, tedy počet opakování, lze-li to tak při změnách mezi nimi nazvat, roste s počtem pólů.

Görgesovy diagramy mají strukturu, která předpovídá s narůstajícími póly tvar stále méně podobný tvaru sinusoidy.

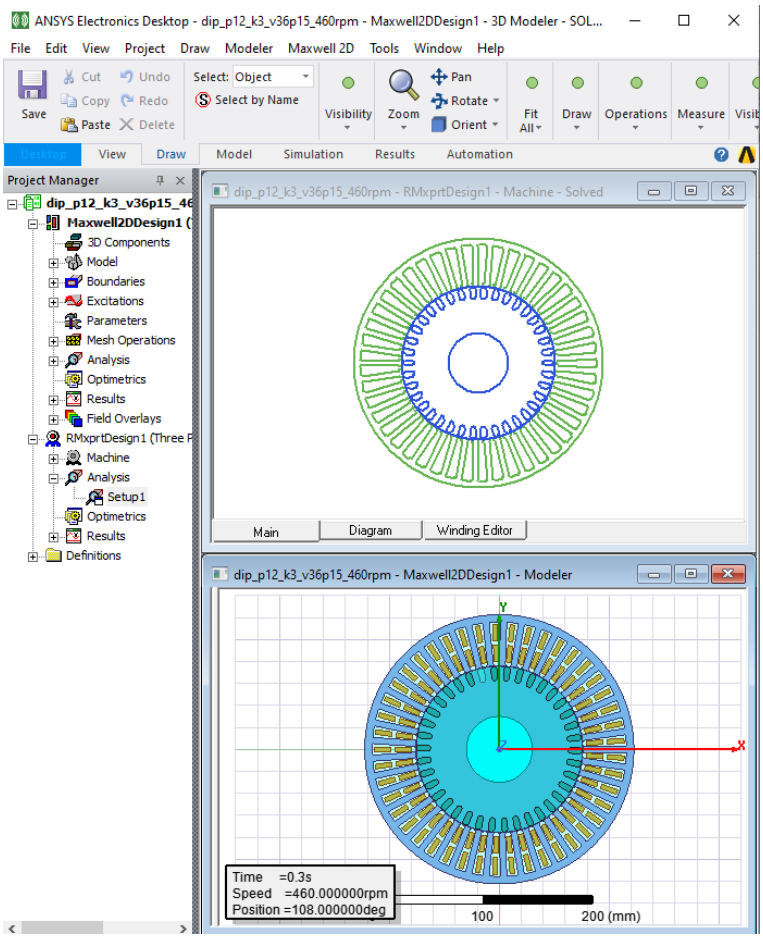
Dvoupólový stroj opisuje sinusoidu velmi věrně, počet změn indukce na periodu je největší, protože díky malému počtu pólů vychází na jeden tvar podobný sinusoidě více vodičů, tedy změn hodnot magnetické indukce. Tento poměr se postupně mění k horšímu s přibývajícími póly.

Odhlédne-li od podobnosti s tvarem funkce sinus, pak co se týče samotné pravidelnosti tvaru indukce při opakováních po obvodu vzduchové mezery, nemusí mít zvýšení počtu pólů vliv nutně negativní. Příkladem je srovnání osmipólového stroje ku desetipólovému, kde dojde s navýšením počtu pólů ke zpravidelnění tvaru, za méně ideální příklad lze uvažovat i dvanáctipólový tvar ku čtrnáctipólovému.

V čase t_2 má indukce polohu o něco více vlevo, tedy dále po obvodu vzduchové mezery. Tento fakt je zřejmý pro $2p$ = 2, 4, 6, méně pak 8. U $2p$ = 10, 12, 14 již patrně díky hrubosti obrazů tento rozdíl zaniká.

5 Model asynchronního motoru, zvolené vinutí, změny na cívce vinutí a metoda analýzy

Z vinutí v předchozí kapitole byly vybrány jen některé vhodné varianty statorového vinutí. Tato vinutí byla následně modifikována, přičemž bylo navíc nutné zvolit všechny potřebné parametry celého asynchronního motoru. To proto, aby mohlo dojít k řádnému zanalyzování a získání potřebných vlastností motoru s takovým vinutím. Analýza motoru proběhla dvěma metodami, a došlo tak k základnímu i hlubšímu zkoumání vlastností stroje ve dvou různých programech.



Obrázek 5.1: Prostředí ANSYS s příkladem modelu v programech RMxprt a Maxwell 2D

Bylo využito programů RMxprt a Maxwell 2D z ANSYS Electronics Desktop, toto prostředí i s průřezem asynchronního motoru vytvořených modelů lze vidět na obr. 5.1.

Jednodušší analytická metoda programu RMxprt posloužila především k získání závislosti základních charakteristických veličin motoru na otáčkách jeho rotoru. Výstupem programu pro tuto práci pak bylo kromě samotného grafického zobrazení závislosti dvou z těchto veličin také získání hodnot charakteristických veličin motoru v pracovním bodě.

Menší, ovšem také podstatnou částí byly například hodnoty ztrát v železe, sycení, prou-

dových hustot ve vodičích a plnění drážky statoru pro účel návrhu cívky.

Podrobnější analýza vlivu vinutí na vlastnosti asynchronního motoru je metodou konečných prvků. Tuto metodu využívá program Maxwell 2D a jedná se sice o metodu časově náročnou, ale velmi přesnou.

Důvody pro hlubší analýzu programem Maxwell 2D jsou v zásadě dva. Prvním je fakt, že zatímco v programu RMxprt jsou výstupem především závislosti veličin na otáčkách rotoru, program Maxwell provádí tranzientní simulace, kde je možné sledovat změny všech veličin v čase. To umožňuje získat informace předchozí metodou nezískatelné, například zvlnění momentu motoru. Druhým důvodem je již zmíněná vyšší přesnost. Proto u takových veličin, které jsou výsledkem obou zmíněných programů, je vhodné jejich srovnání. Jako hodnověrnější výsledek je pak zpravidla vhodnější brát hodnotu získanou metodou konečných prvků.

Modely motorů v programu Maxwell 2D odpovídají ve svých parametrech zcela modelům simulovaným v programu RMxprt, tedy všechny rozměry a parametry strojů jsou stejné. Z tohoto srovnání je možné zmínit jednu větší výjimku, a to mechanické ztráty, se kterými Maxwell nepočítá, nicméně je lze snadno odečíst pro získání výstupních veličin výkonu a momentu stroje.

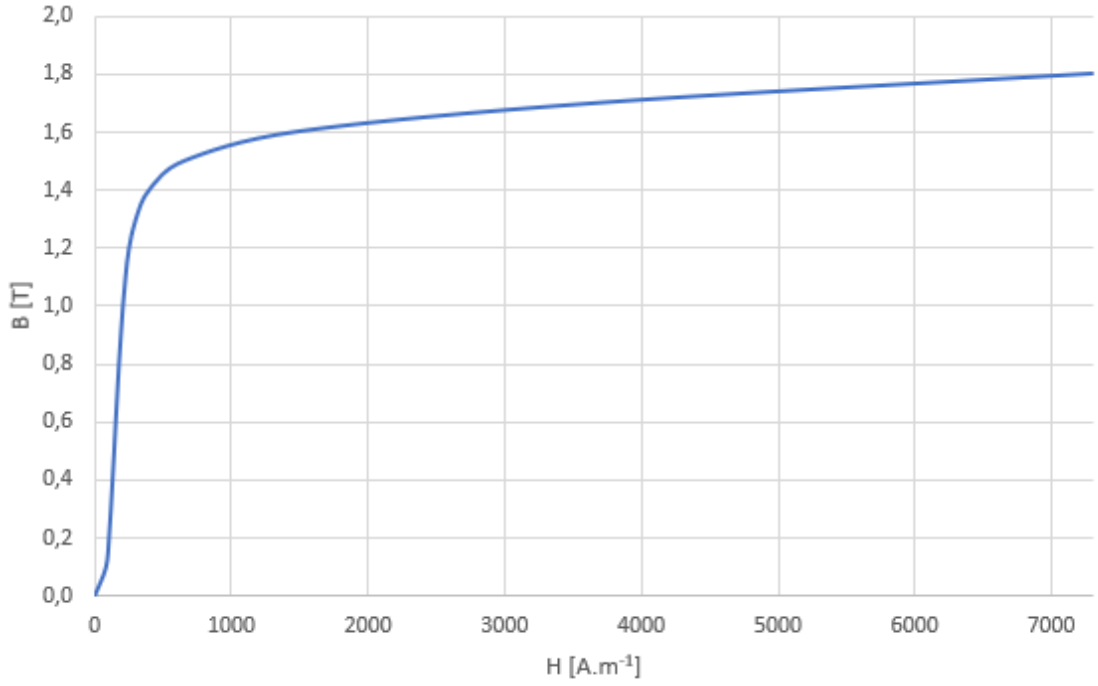
5.1 Vlastnosti asynchronního motoru v simulovaném modelu

V následující části budou vypsány základní parametry modelu asynchronního třífázového motoru. Přestože byly vyplněny v programu všechny potřebné parametry stroje, zmíněny v tomto textu budou jen základní vlastnosti stroje z celé jeho dokumentace. Důvodem jsou práva výrobce na konkrétní rozměry těchto ve skutečnosti vyráběných a zde analyzovaných strojů.

Z předchozí kapitoly byla vybrána dvě základní vinutí, odpovídající dvěma strojům: **šestipólovému** $Q = 45$, $2p = 6$, $Y = 6$ a **dvanáctipólovému** $Q = 45$, $2p = 12$, $Y = 3$. Zmíněná vinutí byla v programu vložena do modelů skutečných strojů, které jsou základem této práce.

Mezi hlavní parametry simulovaných modelů patří:
– motory jsou připojeny na sdruženou hodnotu napětí 400 V o frekvenci 50 Hz, zapojení je do hvězdy,
– šestipólový stoj má štítkové hodnoty: $n = 465$ min^{-1} a $P = 1400$ W,
– dvanáctipólový stoj má štítkové hodnoty: $n = 930$ min^{-1} a $P = 2400$ W,
– mechanické ztráty se uvažují $P_{ztr} = 10$ W,
– teplota vinutí je $\vartheta = 100$ °C.

Rozměry šestipólového i dvanáctipólového motoru jsou zcela totožné. **Plechy** statoru i rotoru jsou ze stejného materiálu od Cogent Power, M800-50A, jehož hustota je rovna $\varrho = 7800$ kg m^{-3}, B-H křivku materiálu zobrazuje obr. 5.2. Podobně na obr. 5.3 je zachycena závislost měrných ztrát materiálu na indukci. Číselně jsou obě závislosti vypsány



Obrázek 5.2: B-H křivka materiálu M800-50A

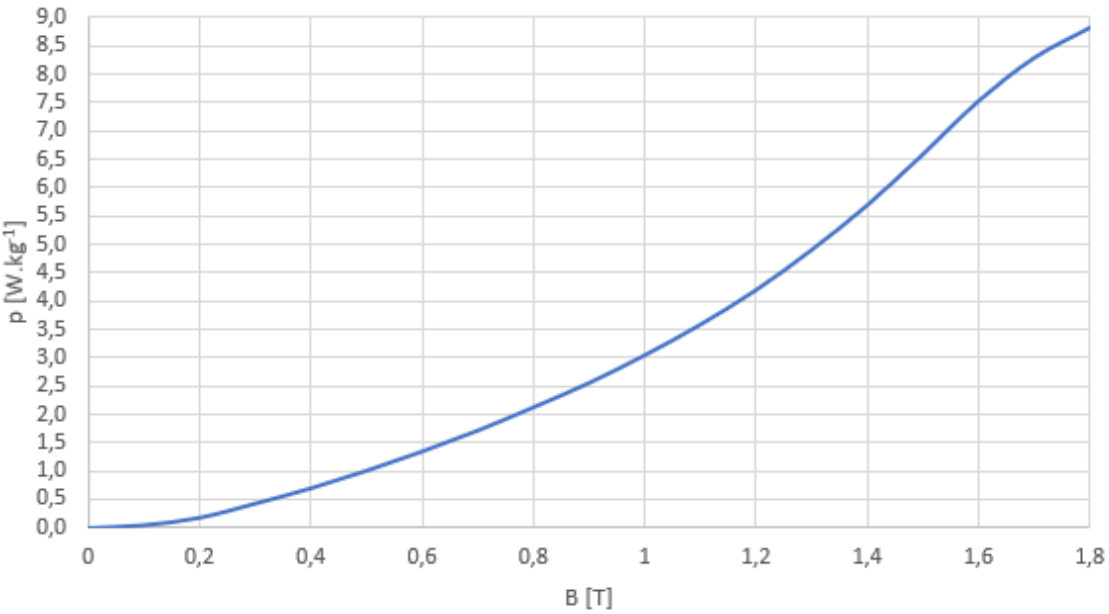
v tabulce 5.1 [12]. Tloušťka plechu statorového i rotorového je rovna 0,5 mm a měrná vodivost materiálu má hodnotu $\sigma = 4347826$ S.m^{-1}.

Tabulka 5.1: Magnetická indukce, měrné ztráty a magnetická intenzita materiálu M800-50A [12]

B [T]	p [W/kg]	H [A/m]	B [T]	p [W/kg]	H [A/m]
0,1	0,05	84,5	1,0	3,05	209
0,2	0,18	107	1,1	3,59	228
0,3	0,43	121	1,2	4,20	254
0,4	0,70	133	1,3	4,91	304
0,5	1,01	145	1,4	5,70	402
0,6	1,35	156	1,5	6,60	660
0,7	1,72	168	1,6	7,54	1480
0,8	2,13	180	1,7	8,30	3710
0,9	2,56	194	1,8	8,83	7300

U **statoru** platí, že:
– vnitřní průměr statoru je $D_{s,vnit}$ = 152 mm a vnější $D_{s,vnej}$ = 245 mm,
– aktivní délka statoru je l = 200 mm,
– má Q_s = 45 drážek,
– materiálem vinutí statoru je elektrolytická měď, jedná se o dvouvrstvé vinutí,
– počet závitů cívky u základní varianty vinutí je N_c = 18, jedna drážka statoru tedy obsahuje celkem $2N_c$ = 36 vodičů,
– průměr jednoho vodiče vinutí je d = 1,5 mm.

Vzduchová mezera mezi statorem a rotorem má šířku δ = 0,5 mm.



Obrázek 5.3: Grafická závislost měrných ztrát na indukci u materiálu M800-50A

Rotor má tyto základní vlastnosti:
– vnější průměr je $D_{r,vnit}$ = 151 mm, vnitřní $D_{r,vnej}$ = 60 mm,
– aktivní délka rotoru je l = 200 mm,
– obsahuje Q_r = 38 drážek,
– klec má tyče z hliníku o hustotě $\varrho_{Al} = 2689$ kg m^{-3} a měrné vodivosti $\sigma_{Al} = 2 \cdot 10^7$ S.m^{-1} při 100 °C.

Za materiál hřídele byla zvolena ocel v programu Maxwell, program RMxprt neumožňuje materiál zvolit.

5.2 Změny kroku vinutí a změny na cívce vinutí k analýze vlivu statorového vinutí na vlastnosti motoru

Pro posouzení vlivu změn statorového vinutí na asynchronní motor a jeho vlastnosti je však potřeba u obou strojů, šestipólového i dvanáctipólového, mít více provedení vinutí. Proto byly ze základní verze vinutí, zmíněné u popisu statoru modelu stroje, vytvořeny upravené varianty. Došlo k tomu dvojím způsobem.

Prvním je **změna kroku** vinutí. Vinutí obou strojů vybraná pro simulaci a rozebraná v předchozí kapitole měla krok roven 80 % pólové rozteče, což je obecně bráno jako výhodná délka zkrácení kroku. V rámci této práce byly pro oba motory zvoleny i odlišné délky kroku zkráceného i prodlouženého. Plný krok nebyl v těchto případech možný, jelikož pólová rozteč je u vybraných strojů desetinným číslem a krok musí být z podstaty věci číslem celým.

Pro šestipólový stroj s pólovou roztečí Q_p = 7,5 byly vybrány kroky:
– zkrácený krok 6 (80 %),
– zkrácený krok 7,
– prodloužený krok 8.

Pro dvanáctipólový stroj s pólovou roztečí Q_p = 3,75 byly vybrány kroky:
– zkrácený krok 3 (80 %),
– prodloužený krok 4.

Druhým způsobem úpravy vinutí je **změna počtu závitů cívky a jejich průměru**. Zde je již mnoho možností, jak cívku sestavit.

Metoda volby takto pozměněných vinutí byla následující. Pro oba stroje a každou jejich délku kroku se vycházelo ze základní podoby cívky. V základní variantě je počet závitů cívky N_c = 18, vodičů v drážce tedy $2N_c$ = 36, průměr každého vodiče je d = 1,5 mm. Cíle byly dva: zvýšení účinnosti a dosažení maximálního možného výkonu. Při pokusech o zvýšení účinnosti se musel brát ohled na to, aby byl motor schopný poskytovat požadovaný výkon. Při pokusech o dosažení maximálního výkonu se musel brát ohled na to, aby byl motor schopný dlouhodobého provozu. Nejdříve se pracovalo s počtem závitů, který se snižoval a zvyšoval. Pro oba stroje a každou jejich délku kroku se tak kromě základní varianty získala varianta s menším počtem závitů a s větším počtem závitů cívky.

Při snižování počtu závitů roste sycení stroje. Proto se snižoval počet závitů vždy jen tak dlouho, dokud v kritické části stroje nebylo dosaženo hraniční hodnoty, kde již bylo plné sycení. Tato hranice byla přibližně 1,6 T s tím, že nejvíce sycenou částí statoru bylo u šestipólového stroje jho statoru a u dvanáctipólového zub rotoru. Tyto hodnoty tedy bylo třeba sledovat, aby nebyla překročena hranice, ale zároveň byl využit potenciál stroje při této úpravě. Rovněž bylo třeba dávat pozor na zvyšující se proudovou hustotu ve vinutí statoru, aby nenarostla do nebezpečných hodnot.

U zvyšování počtu závitů sycení stroje klesá, není tedy potřeba na něj brát ohled. Rychle však klesá i výkon stroje, přestože se málo zvyšuje účinnost. Hranice pro zastavení zvyšování počtu závitů tak nebyla jasně dána jako u předchozího příkladu, byl jednoduše brán ohled na výkon, aby stroj neztratil mnoho ze svých možností, tedy aby pro jmenovité otáčky nebyl výkon stroje o mnoho nižší. Účinnost narůstala navíc čím dál pomaleji až po zanedbatelné přírůstky, pro které již nebylo záhodno obětovat výkon stroje.

Tato manipulace se závity cívky byla prováděna v programu RMxprt, který podával hodnoty o sycení i výkonu stroje, také však například o měnící se účinnosti. Velmi důležitou hodnotou pro toto nastavování, kterou počítal RMxprt, je procento plnění drážky. Tento údaj byl potřeba pro poslední krok.

Maximální možné plnění drážky bylo uvažováno 50 % a bylo potřeba se k této hodnotě přiblížit zespodu z původně nižších hodnot. K tomu přirozeně posloužilo zvětšení průměru vodičů a tedy ve výsledku jejich průřezu a celkové plochy. Dle normy tak byl volen průměr vodiče (případně bylo požadovaného průřezu dosaženo paralelním spojením několika tenčích vodičů) tak, aby bylo hodnoty blízké 50 % dosaženo. Tím vždy došlo k navýšení účinnosti a výkonu stroje. Výsledkem tak byly u každého stroje a jeho kroku

tři varianty vinutí: se základním počtem, sníženým a zvýšeným počtem závitů. Celkem tedy patnáct možných vinutí, devět pro šestipólový stroj a šest pro stroj dvanáctipólový.

5.3 Hledané výsledky simulace – vlastnosti a veličiny motoru

Pro zjištění vlivu změn ve vinutí statoru na vlastnosti trojfázového asynchronního motoru bylo tedy potřeba provést simulace s nastavenými modely. Jejich účelem bylo nalézt vlastnosti stroje pro každé zvolené provedení vinutí a srovnat výhody a nevýhody jednotlivých úprav kroku a závitů cívky.

U každého modelu tak byly získány následující veličiny:

Moment na hřídeli asynchronního motoru. Program RMxprt poskytl hodnoty momentu pro zvolené otáčky, ale také moment záběrný a moment zvratu. V programu Maxwell, který byl schopen zachytit zvlnění momentu, byla získána hodnota momentu pro zvolené otáčky průměrná (bylo potřeba odečíst moment mechanických ztrát) a dále jeho maximální a minimální hodnota, které od sebe byly odečteny. Rozdíl mezi maximem a minimem periodicky se opakující pulzace momentu tak udává velikost zvlnění.

Příkon a mechanický výkon byly poskytnuty programem RMxprt, i program Maxwell vydal hodnoty elektrického příkonu i mechanického výkonu na hřídeli (opět však musely být odečteny mechanické ztráty).

Ztráty v železe byly poskytnuty opět oběma programy, přičemž RMxprt vypisuje jen celkovou hodnotu, Maxwell podal hodnoty u statoru i rotou pro hysterezní ztráty, ztráty vířivými proudy i dodatečné ztráty. Pro tuto práci byly uvažovány pouze celkové ztráty stroje v železe.

Zatímco **účinnost** stroje jako jeden z nejdůležitějších parametrů stroje vydal jako hodnotu RMxprt přímo, v programu Maxwell byla získána výpočtem, a to prostým podělením mechanického výkonu na hřídeli a příkonu.

Proud záběrný i proud v pracovním bodě byly získány v programu RMxprt, program Maxwell poskytl časový průběh fází proudu, ze kterých byla efektivní hodnota snadno vypočítána.

Podobně **proudová hustota** vodičů statoru i hliníkových tyčí rotoru byly poskytnuty programem RMxprt přímo, u Maxwellu bylo třeba tuto veličinu u statoru získat výpočtem. Sloužila především v programu RMxprt při návrhu možných variant vinutí s nižším počtem závitů jako kontrolní prvek pro případné poškození motoru, tedy aby simulovaný model byl v praxi použitelný a nedošlo k jeho tepelnému poškození a zničení.

Zajímavé bylo sledovat i **účiník** stroje, v případě Maxwellu bylo opět nutno jej vypočítat z obecně známého vztahu.

Magnetická indukce je základní veličinou magnetického obvodu, byla proto sledována

jak v průřezu stroje, aby mohla být jasně vidět úroveň sycení jednotlivých částí statoru a rotoru, tak ve vzduchové mezeře. Zde byla zachycena v jednom čase její radiální složka, její odlišnost od sinusoidy mající negativní vliv na moment stroje. Také bylo možné provést pomocí programu Matlab Fourierovým rozkladem spektrální analýzu, aby bylo lépe vidět, jaké harmonické snižují kvalitu stroje. Tedy kromě harmonické pracovní, která je rovna počtu pólových dvojic. Bylo také sledováno v programu RMxprt číselně vyjádřené sycení jednotlivých částí motoru, což posloužilo především při návrhu provedení cívky, aby nedošlo k přesycení při snižování počtu závitů.

Také byl pouze v programu RMxprt v jednodušší podobě prozkoumán pracovní bod nikoli pro jmenovité štítkové otáčky, ale pro jmenovitý výkon stroje, a tedy otáčky, proud, účinnost a moment v tomto pracovním bodě.

Přestože sledovaných i po simulaci zpracovaných hodnot bylo relativně veliké množství, z důvodu přehlednosti a cíle této práce nebyly použity všechny v textu následující kapitoly, týkající se výsledků simulace. Část sledovaných hodnot byla totiž užita například pro návrh správných, definitivních modelů, jiná posloužila k posouzení, které modely je výhodnější a potřebnější v textu této práce srovnávat pro poukázání na vliv vinutí statoru na práci motoru, aby potřebné výsledky nezanikly v přebytečných a často i ve své podstatě redundantních datech.

6 VÝSLEDKY PROVEDENÝCH SIMULACÍ, SROVNÁNÍ VINUTÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍHO VINUTÍ

Všechna zvolená provedení vinutí statoru asynchronního motoru byla nasimulována v programech RMxprt a Maxwell 2D, přičemž ve druhém jmenovaném programu byla délka simulace nastavena na 0,3 s. Tento čas byl zhodnocen jako postačující pro získání ustálených hodnot simulovaných a hledaných veličin, resp. v některých případech k jednoznačnému odlišení stále ještě probíhajícího přechodného děje po startu simulace od periodicky se opakujících změn pozorované veličiny. Nicméně počáteční přechodný děj a hodnoty z něj získatelné nebyly v této práci nijak využity a zájem byl soustředěn jen na ustálený stav.

6.1 Hodnocené veličiny asynchronního motoru

Po simulacích byly některé veličiny získány z programu přímo, jiné vypočítány, jak je vypsáno v kapitole 5.3. V tabulce 6.1 jsou zobrazeny přehledně pro všechny simulované stroje některé jejich základní veličiny. Pro přehlednost jsou zde zobrazeny pouze hodnoty získané z programu Maxwell, považované za přesnější. V tabulce i dále v kapitole se bude pracovat s počtem vodičů v drážce, tedy dvojnásobkem počtu závitů cívky.

Tabulka 6.1: Přehledné srovnání základních veličin simulovaných strojů

$2p$ [-]	Y [-]	$2N_c$ [-]	P_m [W]	η [-]	M [Nm]	cosφ [-]	I_{jm} [A]
6	6	34	2865	0,891	29,4	0,780	5,9
		36	2461	0,871	25,3	0,810	5,0
		40	2065	0,894	21,2	0,821	4,1
	7	32	2959	0,892	30,4	0,773	6,2
		36	2246	0,874	23,1	0,824	4,5
		38	2087	0,895	21,4	0,817	4,1
	8	32	2946	0,891	30,3	0,776	6,2
		36	2234	0,872	22,9	0,822	4,5
		38	2078	0,893	21,3	0,819	4,1
12	3	34	2459	0,821	50,5	0,406	10,7
		36	2132	0,780	43,8	0,447	8,8
		42	1607	0,841	33,0	0,439	6,3
	4	32	2519	0,824	51,8	0,397	11,1
		36	1931	0,788	39,7	0,450	7,7
		40	1602	0,840	32,9	0,435	6,3

V následujících podkapitolách, věnujících se vybraným důležitým vlastnostem strojů, se pak nacházejí další, podrobnější tabulky s těmito i dalšími veličinami, a to z obou užitých programů pro simulaci.

6.1.1 Magnetická indukce

Došlo vždy ke grafickému zobrazení magnetické indukce v průřezu stroje na konci simulace v čase 0,3 s. Ve stejném čase byla také zachycena i radiální složka indukce ve vzduchové mezeře, resp. po obvodu vzduchové mezery, tato složka magnetické indukce byla rozložena Fourierovou transformací na složky. Ke sledování sycení v průřezu stroje bylo nastaveno měřítko grafické legendy od 0 T do 1,8 T, což je už hodnota nadsazená, která dle grafu 5.2 jasně ukazuje na přesycení materiálu.

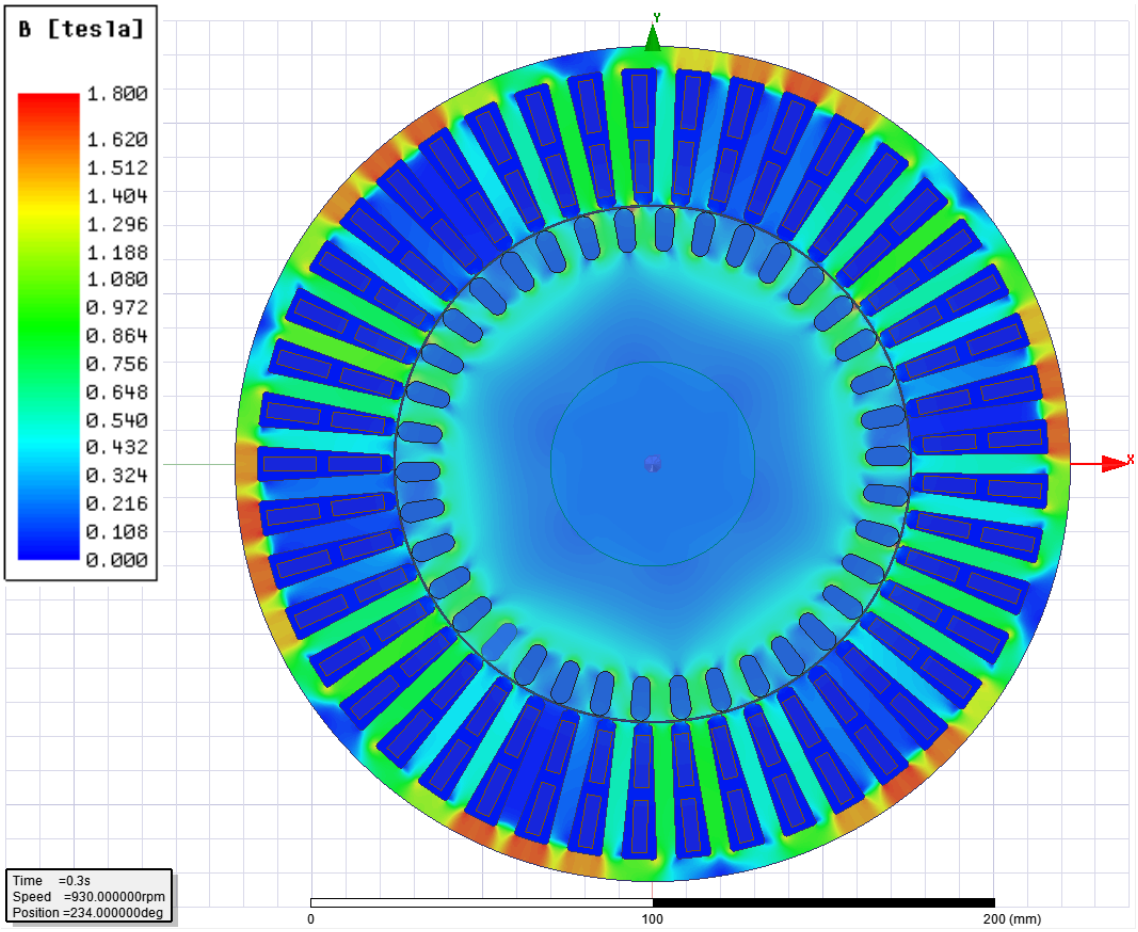
V programu RMxprt byly získány hodnoty sycení pro zuby rotoru i statoru a jho rotoru i statoru, u šestipólového stroje mělo nejvyšší sycení jho statoru, u dvanáctipólového zuby rotoru. Mimo jiné i podle těchto hodnot byly navrhovány cívky simulovaných strojů. Přehled hodnot sycení pro jmenovité rychlosti strojů ukazuje tabulka 6.2.

Tabulka 6.2: Srovnání sycení ASM motoru při jmenovitých otáčkách pro různá vinutí

$2p$ [-]	Y [-]	$2N_c$ [-]	B [T]			
			Zub statoru	Zub rotoru	Jho statoru	Jho rotoru
6	6	34	0,79	0,91	1,60	0,17
		36	0,74	0,85	1,45	0,16
		40	0,68	0,77	1,37	0,15
	7	32	0,81	0,92	1,63	0,17
		36	0,71	0,81	1,43	0,15
		38	0,68	0,78	1,38	0,15
	8	32	0,81	0,92	1,62	0,17
		36	0,71	0,81	1,42	0,15
		38	0,68	0,78	1,37	0,15
12	3	34	1,39	1,57	1,33	0,15
		36	1,31	1,48	1,24	0,14
		42	1,14	1,29	1,08	0,12
	4	32	1,39	1,57	1,33	0,15
		36	1,23	1,39	1,17	0,13
		40	1,12	1,27	1,06	0,12

Z tabulky lze na první pohled vidět zanedbatelné sycení jha rotoru, navíc jen málo se měnící. Lze také spatřit zajímavou záležitost: na sycení jednotlivých částí nemá změna kroku (v rámci zvolených velikostí kroku k simulaci) významný vliv, někdy dokonce prakticky nulový. Pro snížený počet vodičů u různých kroků se hodnoty téměř neliší. Totéž platí pro zvýšený počet vodičů a různých kroků. U šestipólového stroje je tento fakt zřetelnější než u dvanáctipólového, kde v případě středního počtu vodičů (36) je změna mezi kroky viditelnější, ale jedná se o jedinou výjimku.

Je potřeba si uvědomit, že u dvanáctipólového stroje je krok 3 zkrácený a 4 prodloužený a u šestipólového 6 a 7 zkrácené a 8 prodloužený. Zatímco díky pouhým dvěma volbám kroku u dvanáctipólového stroje to nelze posoudit, díky třem krokům u šestipólového stroje je vidět následující: Při přibližování se délce pólové rozteče (plnému kroku, v obou



Obrázek 6.1: Pole magnetické indukce v průřezu asynchronního motoru u $2p = 6$, $Y = 7$, $2N_c = 32$

případech však neuskutečnitelnému, jelikož se jedná o desetinné číslo) z kroku 6 na krok 7 se u sníženého i navýšeného počtu vodičů sycení zvyšuje, naopak se překvapivě snižuje pro původní počet vodičů, tedy 36. Při prodloužení z kroku 7 na 8 se dostáváme délkou kroku přes pólovou rozteč (délku nerealizovatelného plného kroku) a hodnoty sycení se téměř vůbec nemění, což je možné vidět velmi dobře především u zubů, kde jsou hodnoty totožné. Tyto délky kroků na opačných stranách od plného kroku si v sycení zubů prakticky odpovídají, u jha statoru jsou hodnoty také velmi blízké.

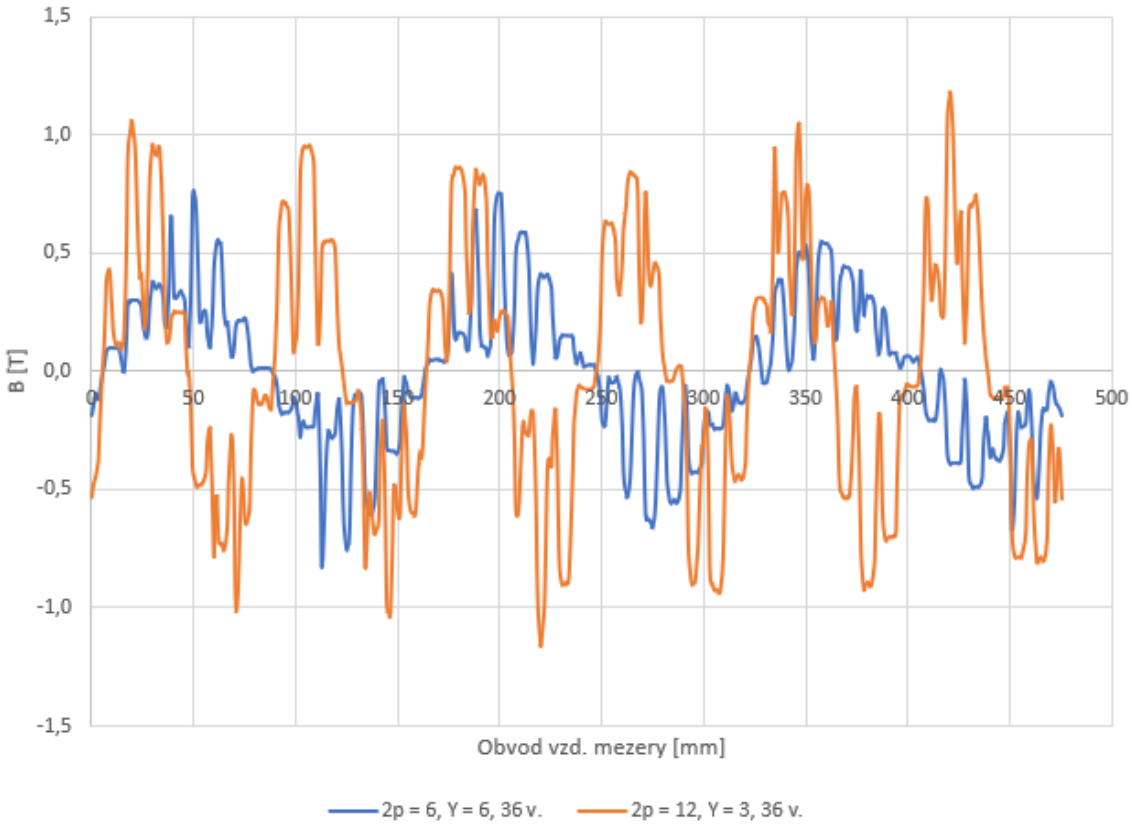
Naopak oproti tomu změna počtu vodičů v rámci každého kroku měla vliv významný, a to někdy více, někdy méně. Zvyšování počtu vodičů vždy snižuje sycení.

U šestipólového stroje je nejvyšší hodnota sycení u jha statoru, jak zmíněno, ale lze rovněž vidět, že v sycení daleko přesahuje ostatní části šestipólového stroje, které se pohybují vždy pod hodnotou 1 T, někdy i značně.

U dvanáctipólového stroje a jeho nejvíce sycených zubů rotoru tento rozdíl není velký, kromě jha rotoru jsou hodnoty téměř vyrovnány.

Ať už se hodnoty sycení pohybovaly ve vyšších, či nižších hodnotách, je možné prohlásit ke všem simulovaným modelům, že v žádném případě nedošlo k přesycení stroje.

Zajímavé pro srovnání jsou stroje s vyšším sycením a místa s nejvyšším sycením. To platí pro varianty se sníženým počtem vodičů, proto grafické zobrazení indukce v materiálu bylo pro tuto práci vybráno z nich.

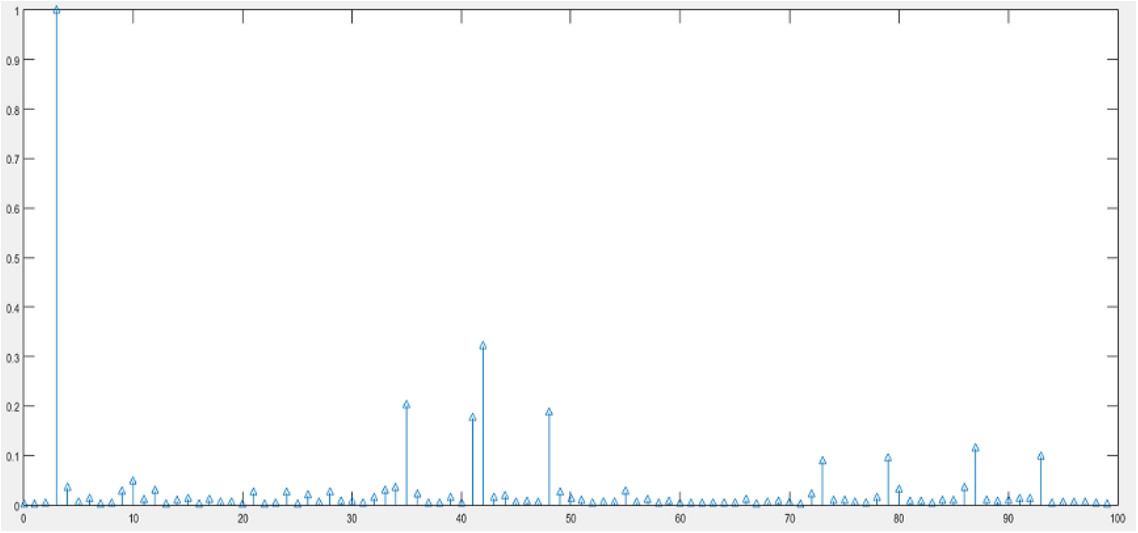


Obrázek 6.2: Příklady radiální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Na obrázku 6.1 je motor $2p = 6$, $Y = 7$ s 32 vodiči. Lze vidět, že nejvyšší sycení je v okolí fáze s nejvyšším proudem, menší sycení v okolí fází s nižšími proudy. Nejvíce zatíženou částí je vskutku jho statoru, kde se dostává indukce na kritickou, ale ještě akceptovatelnou hodnotu. Lze spatřit to, co u dvanáctipólového stroje nalézt nelze: vysoký rozdíl mezi sycením jha statoru a zbytkem stroje. Při pozornějším pohledu lze dobře spatřit v některých místech, kde je rotorová drážka naproti statorovému zubu, větší indukci na okraji zubů, ovšem ne všude, v závislosti na proudech fázemi.

Co se týče magnetické indukce ve vzduchové mezeře, na obrázku 6.2 lze spatřit tvar její radiální složky pro šestipólový stroj $2p = 6$, $Y = 6$, 36 vodičů a dvanáctipólový stroj $2p = 12$, $Y = 3$, 36 vodičů. Lze vidět, že počet period radiální složky magnetické indukce se rovná počtu polových dvojic p. Tvar je jen vzdáleně podobný funkci sinus. Při srovnání tvaru radiální složky u odlišných provedení vinutí však nelze vyčíst mnoho.

Fourierův rozklad na složky poskytuje více informací, jak ukazuje obrázek 6.3 opět pro stroj $2p = 6$, $Y = 6$, 36 vodičů. Graf je vztažen k pracovní harmonické, kterou je p, v tomto případě třetí harmonická. Z rušivých harmonických jsou v pořadí od nejvyšší vidět především 42., 35., 48., 41., o něco méně 87., 93., 79. a 73. Tyto harmonické významně odlišují tvar radiální složky indukce od funkce sinus, mají ve výsledku negativní vliv na mecha-



Obrázek 6.3: Spektrální složky magnetické indukce ve vzduchové mezeře pro $2p = 6$, $Y = 6$, 36 vodičů

nický moment tím, že způsobují jeho pulzace, jak popsáno v části věnující se momentu. U dvanáctipólového stroje s šestou pracovní harmonickou jsou nejvýznamnější vyšší harmonické 39., 84., 32., 44., 51. a 96. Při zkoumání okolí pracovního bodu při otáčkách větších a menších o 5 rpm bylo zjištěno, že vliv vyšších harmonických je menší při vyšších otáčkách a vyšší při otáčkách menších, ne však výrazně a nelze žádnou výraznou odlišnost vypozorovat ani při srovnání změn kroku a počtu vodičů. To lze daleko přehledněji poznat analyzováním velikosti zvlnění momentu, které je způsobeno těmito vyššími harmonickými, kde velikost zvlnění v jedné hodnotě přehledněji shrne jejich negativní důsledky.

6.1.2 Moment motoru na hřídeli

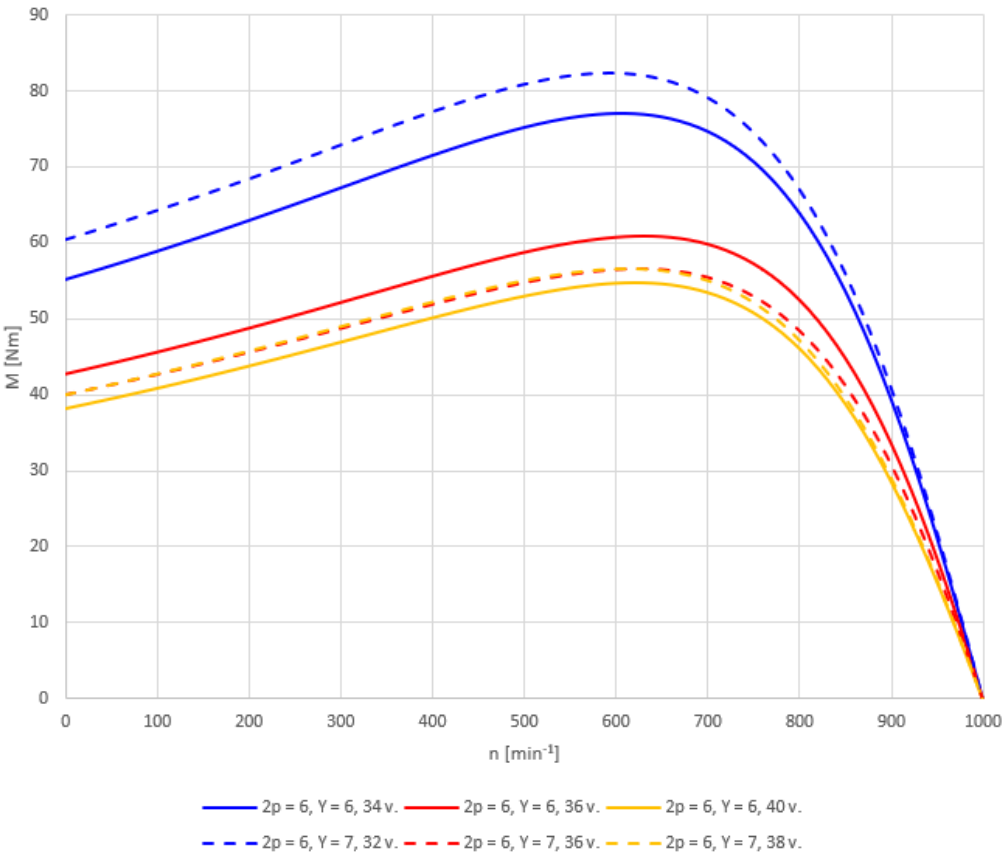
Moment na hřídeli a vliv na něj změnou provedení vinutí statoru byl nasimulován a hodnoty srovnány. Přehledně jsou hlavní hodnoty vypsány v tabulce 6.3.

Z této tabulky lze poznat mnoho závislostí. Vždy v rámci daného kroku s přibývajícími vodiči rychle klesá záběrný moment i moment zvratu, tento pokles se však zpomaluje až zastavuje, někdy jsou hodnoty pro střední a zvýšený počet vodičů stejné. Tedy tato úměra je výraznější pro menší počet vodičů. Pro stejné otáčky s přibývajícími vodiči klesá i nejdůležitější, jmenovitý moment, přičemž u dvanáctipólového stroje je pokles relativně veliký, u šestipólového je menší – na první pohled v absolutních číslech. Procentuálně však je obdobný, jelikož jmenovitý moment u šestipólového stroje je přibližně dvoutřetinový oproti dvanáctipólovému.

Změna kroku bude pro největší přesnost srovnání uvažována jen u původního počtu vodičů, který je všude stejný, tedy 36 vodičů. Při zvýšení zkráceného kroku 6 na zkrácený krok 7 u šestipólového stroje dochází k poklesu jmenovitého momentu asi o 10 %. Další prodloužení na krok 8 už moment ovlivní minimálně, nicméně – a platí to i u zvolených

Tabulka 6.3: Hodnoty momentů a jejich zvlnění u simulovaných strojů s různým vinutím

$2p$ [-]	Y [-]	$2N_c$ [-]	M [Nm]				
			RMxprt			Maxwell 2D	
			M_{zab} [Nm]	M_{zv} [Nm]	M_{jm} [Nm]	M_{jm} [Nm]	ΔM [Nm]
6	6	34	55,2	76,9	28,9	29,4	1,9
		36	42,7	60,8	24,9	25,3	1,6
		40	38,2	54,8	20,9	21,2	1,3
	7	32	60,5	82,1	29,9	30,4	2,5
		36	40,0	56,6	22,8	23,1	1,8
		38	40,0	56,5	21,3	21,4	1,7
	8	32	59,0	80,8	29,8	30,3	2,5
		36	39,2	55,7	22,7	22,9	1,7
		38	39,2	55,7	21,2	21,3	1,6
12	3	34	82,1	120,1	46,4	50,5	10,5
		36	67,6	99,5	40,5	43,8	9,1
		42	52,0	78,0	30,6	33,0	6,7
	4	32	79,8	118,3	46,2	51,8	12,0
		36	57,6	86,6	35,8	39,7	8,7
		40	48,9	74,5	29,7	32,9	7,1

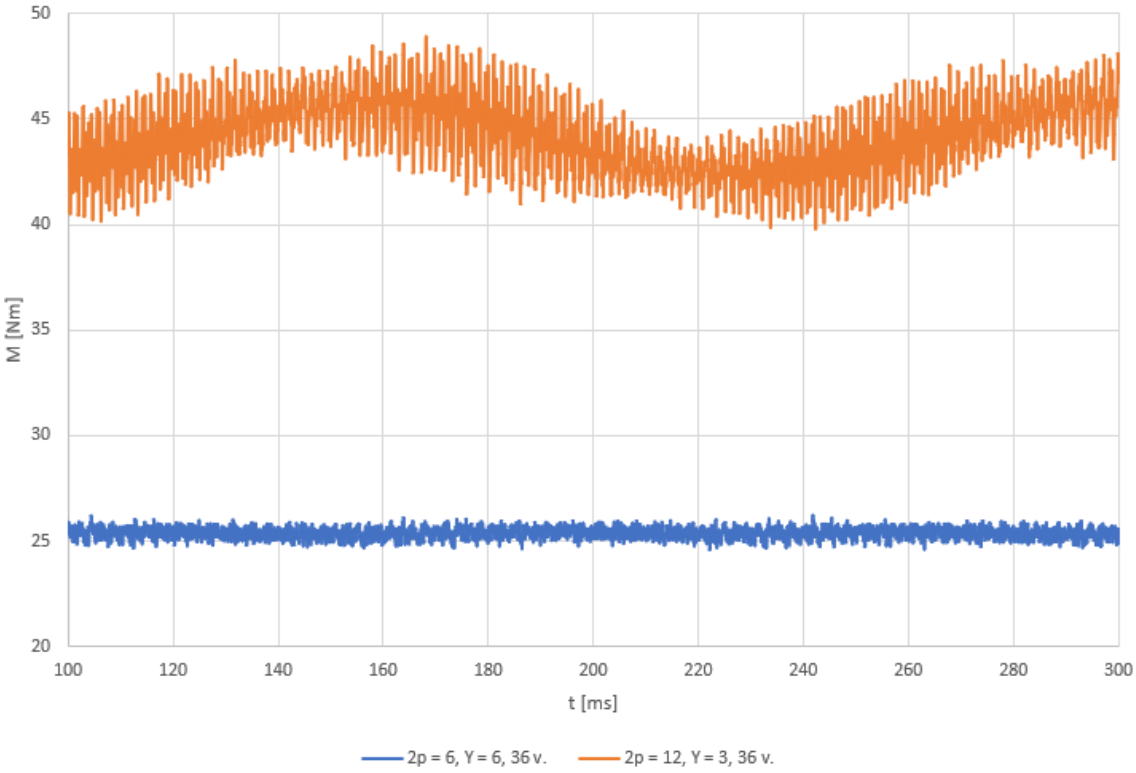


Obrázek 6.4: Závislost momentu na otáčkách u šestipólových strojů

kroků dvanáctipólového stroje – nejedná se o stejné prodloužení jako z kroku 6 na 7, ale jde o změnu kroku přes délku pólové rozteče, tedy změnu ze zkráceného kroku na krok prodloužený. Z tohoto pohledu lze s trochou matematické tolerance říci, že se vinutí s kroky 7 a 8 na opačné straně pólové rozteče chovají navzájem zrcadlově a jejich hodnoty jsou téměř totožné u všech bodů v tabulce.

Také v případě dvanáctipólového stroje došlo ke zvětšení ze zkráceného kroku na prodloužený, tedy přes délku pólové rozteče, nicméně podobnost hodnot je menší.

Závislost na otáčkách ukazuje obrázek 6.4, kde jsou zobrazeny stroje $2p = 6$, $Y = 6$ a $2p = 6$, $Y = 7$ pro všechny simulované vodiče. Zdaleka největší momenty mají jednoznačně vinutí se sníženým počtem vodičů obou kroků. Krok 7 má oproti kroku 6 o něco vyšší hodnoty momentu, nicméně v oblasti jmenovitých otáček rozdíly mizí. V souladu s



Obrázek 6.5: Moment metodou konečných prvků pro $2p = 6$, $Y = 6$ a $2p = 12$, $Y = 3$

tabulkou 6.3 vyšší vodiče dávají stroji menší moment, nicméně u kroku 7 jsou při střední variantě vodičů tentokrát hodnoty nižší než u kroku 6, u zvýšeného počtu vodičů je tomu opět obráceně, krok 7 dává vyšší moment, nicméně rozdíl mezi kroky je velmi malý, u jmenovitých otáček 930 min^{-1} prakticky nulový. Také je zajímavé, že stroj s krokem 7 a středním počtem vodičů má od záběru po zvrat, ale i později velmi podobnou až shodnou charakteristiku s krokem 7 a zvýšenými vodiči.

Zvlnění momentu bylo záležitostí programu Maxwell 2D, stejně jako opět výpočet jmenovitého momentu. V tabulce 6.3 lze vidět, že metoda konečných prvků podává u jmenovitého výkonu vyšší hodnoty než analytická metoda programu RMxprt, u dvanáctipólového stroje výrazněji.

Důležitým výstupem programu Maxwell je především zvlnění momentu. Zde je závislost dobře vidět. Menší počet vodičů dává stroji větší zvlnění, větší počet vodičů snižuje zvlnění momentu. Rozdíl mezi kroky není veliký, nicméně při zvýšení kroku z 6 na 7 u šestipólového stroje se zvlnění poněkud zvýšilo, při zvýšení ze 7 na 8, tedy ze zkráceného na prodloužený přes hodnotu pólové rozteče, jsou hodnoty velmi podobné.

Dále je jasně vidět, že dvanáctipólový stroj má daleko větší zvlnění než stroj šestipólový. Obrázek 6.5 srovnává tyto dva stroje pro krok 6 a 3 a střední počet vodičů. Obzvláště u dvanáctipólového stroje lze vidět pulzace momentu s nízkou frekvencí. Tloušťka průběhu jsou vlastně výkyvy momentu s frekvencí velmi vysokou. Oproti tomu u šestipólového stroje se o výrazných pulzacích téměř nedá mluvit, rušení vysokou frekvencí však zůstává, přestože v malém rozsahu.

6.1.3 Mechanický výkon, účinnost

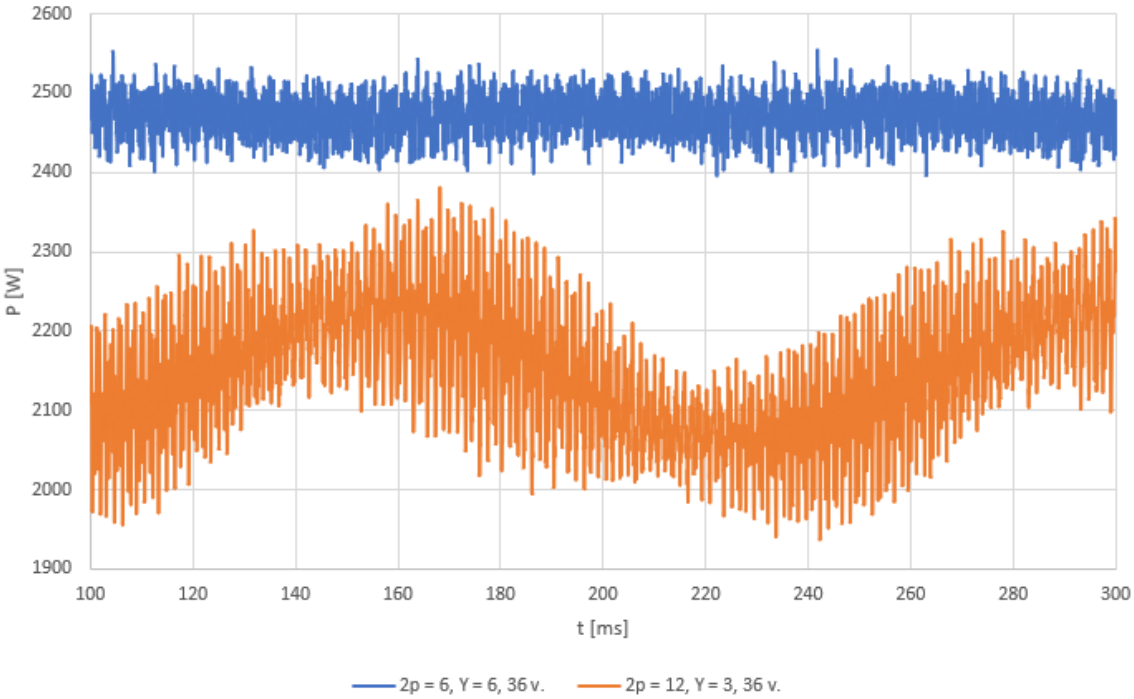
Mechanický výkon a účinnost stroje jsou důležitými vlastnostmi asynchronního motoru, které jsou zpravidla hlavním předmětem zájmu při jeho volbě. Je proto vhodné srovnat i je u simulovaných strojů, toto srovnání umožňuje přehledně tabulka 6.4. Mohl být zmíněn elektrický příkon stroje, jelikož je však výsledkem prostého podílu těchto dvou hodnot, tak není pro srovnání vinutí potřeba.

Tabulka 6.4: Srovnání mechanických výkonů a účinností simulovaných strojů v obou programech

$2p$ [-]	Y [-]	$2N_c$ [-]	RMxprt		Maxwell 2D	
			P_m [W]	η [-]	P_m [W]	η [-]
6	6	34	2811	0,838	2865	0,891
		36	2426	0,818	2461	0,871
		40	2040	0,836	2065	0,894
	7	32	2909	0,841	2959	0,892
		36	2225	0,819	2246	0,874
		38	2070	0,837	2087	0,895
	8	32	2897	0,840	2946	0,891
		36	2213	0,817	2234	0,872
		38	2062	0,836	2078	0,893
12	3	34	2260	0,753	2459	0,821
		36	1973	0,713	2132	0,780
		42	1492	0,756	1607	0,841
	4	32	2252	0,759	2519	0,824
		36	1742	0,717	1931	0,788
		40	1448	0,758	1602	0,840

Lze vidět očekávaný výsledek, že při zvyšování počtu vodičů klesá výkon, naopak při jejich snižování výkon vzrůstá. Účinnost se měnila trochu složitěji. Především vychází u dvanáctipólového stroje nižší než u šestipólového. Zpravidla platí, že při snižování počtu vodičů se účinnost snižuje, při zvyšování počtu vodičů se účinnost zvyšuje. Nicméně

u původní cívky, tj. při základním počtu vodičů, bylo plnění drážky jen 26,9 % a navýšena na necelých 50 % byla až po snížení/zvýšení počtu vodičů. Před zaplněním drážky účinnost stroje původně splňovala očekávanou úměru, tedy navýšením počtu vodičů došlo ke zvýšení účinnosti, snížením došlo ke snížení účinnosti. Zaplnění drážky pak účinnost v obou případech navýšilo nad původní účinnost prostředního počtu vodičů, dokonce PO zaplnění drážky platí i to, že v oblasti s původně menší účinností bylo dosaženo účinnosti vyšší než v oblasti s původně vyšší účinností. Tedy jednodušeji: srovnáváme-li jen zaplněné drážky, tedy pouze snížený a zvýšený počet vodičů, varianta s nižším počtem vodičů má nejenom vyšší výkon, ale také vyšší účinnost, kromě dvanáctipólového stroje s krokem tři, nicméně hodnoty jsou u něj zanedbatelně odlišné. Nicméně to platí pouze pro výsledky metodami programu RMxprt, u programu Maxwell je tomu u účinnosti naopak, dle očekávání: menší počet vodičů nabízí zanedbatelně menší účinnost, u dvanáctipólového stroje v řádech jednotek procenta.



Obrázek 6.6: Mechanický výkon metodou konečných prvků pro $2p = 6$, $Y = 6$ a $2p = 12$, $Y = 3$

Co se týče změny kroku, bude opět srovnáván jen jednotný počet vodičů u všech modelů, tedy střední hodnota 36. U šestipólového stroje došlo prodloužením kroku ze 6 na 7 ke snížení výkonu asi o 8 %, tedy 200 W. Účinnost se zvýšila nepatrně. Krok 8 je již však prodloužený, za pólovou roztečí, a jeho výkon tak téměř zrcadlově odráží výkon při kroku 7. Obdobně, přestože ne tak přesně, je to u dvanáctipólového stroje a jeho kroků.

Maxwell svojí metodou konečných prvků vždy vypočítal výkon (po uživatelově odečtení mechanických ztrát) o jistou hodnotu vyšší, v případě šestipólového stroje v rámci desítek Wattů, u dvanáctipólového stroje šlo o stovky Wattů. Již byla zmíněna jiná úměra účinnosti oproti programu RMxprt, kdy u vyššího počtu vodičů vychází zanedbatelně, ale přesto vyšší účinnost než u nižšího počtu vodičů. Účinnost, a to platí pro všechny hodnoty bez rozdílu, je vždy z programu Maxwell vyšší oproti programu RMxprt.

Na obrázku 6.6 lze vidět grafický výstup z programu Maxwell 2D zobrazující výkon na hřídeli, a to pro stroje stroje $2p = 6$, $Y = 6$ a $2p = 6$, $Y = 7$ pro srovnání s obdobným grafem z předchozí kapitoly, který zobrazoval moment na hřídeli. Čeho si lze u průběhu výkonu všimnout na první pohled, je nesmírná podobnost s grafem momentovým, kterou lze však snadno vysvětlit. I zde je přítomno zvlnění, i zde je výkon rušen výkyvy o dvou různých frekvencích, i zde jsou ve zvlnění rozdíly mezi strojem šestipólovým a dvanáctipólovým. Důvod je jednoduchý: mezi výkonem a momentem je úměrou konstantní úhlová rychlost, tedy změny na momentu se jasně podepisují i na výkonu.

Tabulka 6.5: Veličiny simulovaných strojů v programu RMxprt při jmenovitém výkonu

$2p$ [-]	Y [-]	$2N_c$ [-]	n [min^{-1}]	η [-]	M_{jm} [Nm]	I_{jm} [A]
6	6	34	941,9	0,840	24,3	5,1
		36	930,9	0,818	24,6	5,0
		40	914,2	0,829	25,1	4,9
	7	32	944,0	0,842	24,3	5,2
		36	922,9	0,815	24,8	5,0
		38	915,8	0,831	25,0	4,9
	8	32	943,8	0,841	24,3	5,2
		36	922,3	0,813	24,9	4,9
		38	915,3	0,829	25,0	4,9
12	3	34	479,7	0,703	27,9	8,8
		36	476,6	0,677	28,1	7,8
		42	467,6	0,752	28,6	6,1
	4	32	479,6	0,710	27,9	8,9
		36	473,0	0,697	28,3	7,1
		40	466,4	0,756	28,7	6,1

V tomto místě práce je vhodné se zmínit také o pracovním bodě se jmenovitým výkonem oproti pracovnímu bodu se jmenovitými otáčkami. V tabulce 6.5 jsou vypsány základní charakteristiky simulovaných asynchronních motorů v programu RMxprt v pracovním bodě, který odpovídá výkonu 1400 W a 2400 W u dvanáctipólového a šestipólového stroje.

Udržujeme-li konstantní výkon, otáčky s narůstajícím počtem vodičů klesají. Pro šestipólový stroj při zvyšování počtu vodičů klesá také účinnost, nicméně účinnost u základní varianty s 36 vodiči toto narušuje, jelikož základní cívka nebyla navržena na vyplnění celé drážky při dvouvrstvém vinutí, ale jen 26,9 %. Lze předpokládat, že pokud by tomu tak bylo, potom by pro rostoucí počet vodičů platil pokles u účinnosti přes všechny tři případy vodičů u každého kroku, takto se lze orientovat vždy pouze podle nejnižšího a nejvyššího počtu vodičů, jako prvního a třetího (a posledního) bodu klesající posloupnosti. Zajímavý je opačný trend u dvanáctipólového stroje. Dáme-li opět stranou prostřední počet vodičů z důvodu výše zmíněného, je vidět, že se zvyšujícím se počtem vodičů při stejném výkonu se účinnost naopak zvyšuje.

Moment se při konstantním výkonu a zvyšování vodičů zvyšuje, zde úměra platí bez

výjimky, nejde však o změny příliš viditelné. Se zvyšováním vodičů se naopak snižuje odebíraný proud, přičemž znatelnější rozdíly lze nalézt u dvanáctipólového stroje.

6.1.4 Ztráty v železe

Ztráty v železe jsou významným úbytkem na potenciálu stroje, který je dobré znát a dle vinutí statoru srovnat. Pro srovnání však poslouží jen celkové ztráty v železe. Důvodem je především to, že poměr jednotlivých ztrát (vířivými proudy, hysterezní, dodatečné) v rámci celkových ztrát v železe byl prakticky konstantní pro všechny simulované stroje.

Tabulka 6.6: Tabulka ztrát v železe pro simulované asynchronní motory

$2p$ [-]	Y [-]	$2N_c$ [-]	P_{ztr} [W]	
			RMxprt	Maxwell
6	6	34	178	164
		36	153	145
		40	129	126
	7	32	184	169
		36	141	136
		38	131	128
	8	32	183	168
		36	140	134
		38	130	127
12	3	34	280	215
		36	246	192
		42	187	153
	4	32	279	219
		36	217	178
		40	181	152

Jak je vidět v tabulce 6.6, program Maxwell svojí metodou konečných prvků dává o něco nižší hodnoty, v případě dvanáctipólového stroje o mnoho nižší. Úměra je i zde vidět velice dobře. Se zvyšujícím se počtem vodičů se velmi znatelně snižují ztráty. Pokud je srovnáváno ve vztahu k původní hodnotě vodičů, tj. 36, pak snížení počtu vodičů z 36 vede ve většině případů ke větší změně ztrát než zvýšení počtu vodičů z 36, kde je změna znatelně menší. Malé výjimky jsou způsobené značně odlišnou vzdáleností nových (menších či větších) počtů vodičů od prostřední hodnoty 36.

Při srovnání srovnatelných cívek s jednotným počtem vodičů, tj. prostřední hodnoty 36, pro všechny kroky dochází při změně kroku k následujícím změnám. Zvětšení kroku ze zkráceného 6 na zkrácený 7 u šestipólového stroje snižuje ztráty. Zajímavé srovnání: odlišné a tím pádem nesrovnatelné cívky se sníženým (34, 32) a zvýšeným (40, 38) počtem vodičů ukazují pravý opak, tedy při zvýšení kroku z 6 na 7 dojde k navýšení ztrát. Při dalším prodloužení kroku cívky se středním počtem vodičů z délky 7 na délku prodlouženého kroku 8, tedy přes délku pólové rozteče, nedochází téměř k žádné změně. Snížené a

zvýšené počty vodičů mají v tomto případě dokonce přesně stejný počet, tedy lze srovnat. Opět délka pólové rozteče vytváří jakousi osu souměrnosti a protilehlé hodnoty kroků na její opačné straně si tak navzájem v hodnotách ztrát odpovídají. U dvanáctipólového stroje již prodloužení přes pólovou rozteč nedává tak blízké hodnoty, jsou však podobné.

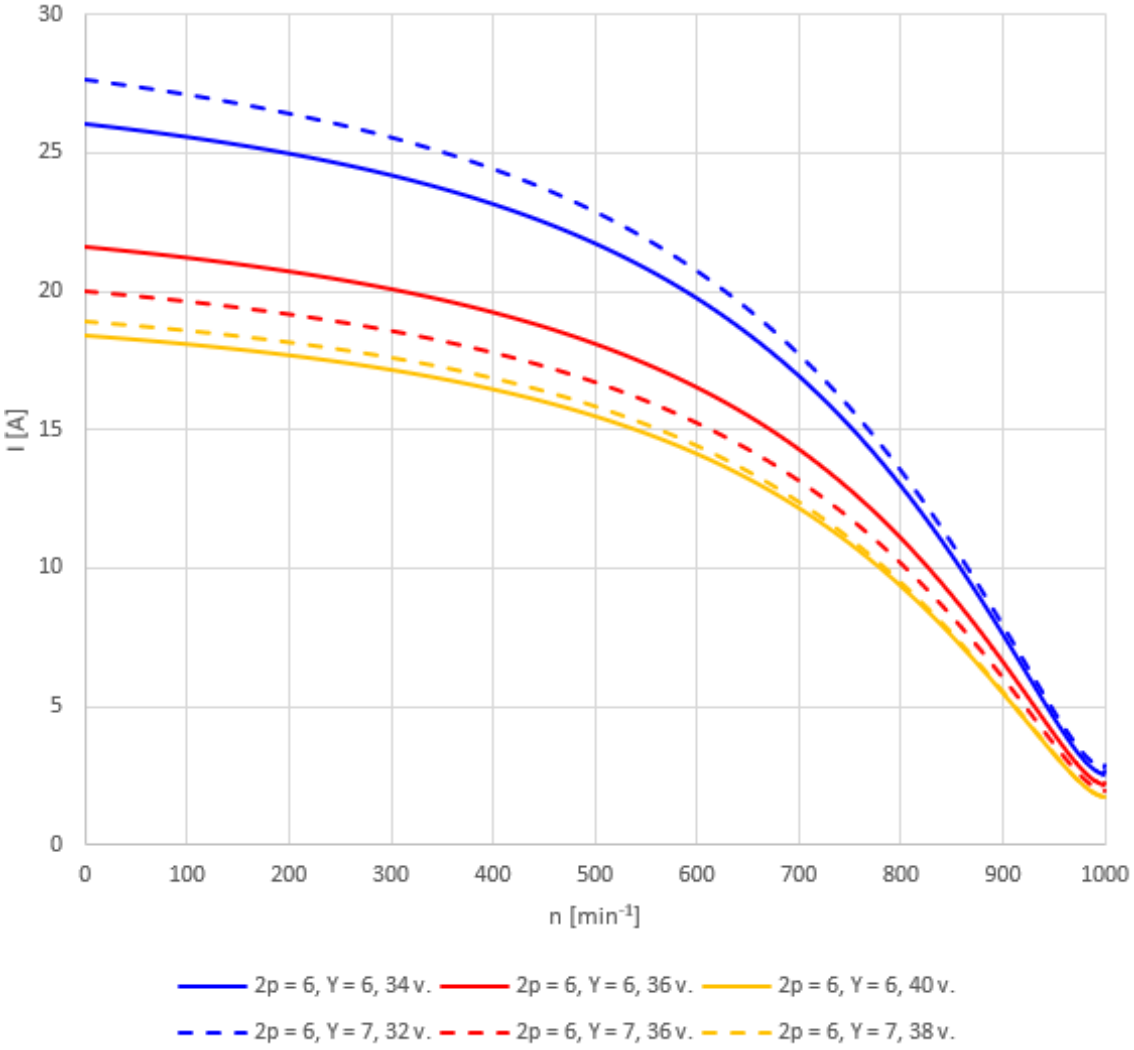
6.1.5 Vstupní proud

Proud odebíraný asynchronním motorem při rozběhu a jmenovitých otáčkách je poslední zde probíranou veličinou. Efektivní hodnoty proudů shrnuje přehledně tabulka 6.7. Z tabulky je jasně patrné, že záběrný proud je u šestipólového stroje vždy přibližně 4,3násobek jmenovitého, zatímco u dvanáctipólového stroje se průměrně nejedná ani o trojnásobek jmenovitého proudu. U záběrného proudu, a platí to i pro jmenovitý proud, platí nepřímá úměra s počtem vodičů: s vyšším počtem vodičů klesá proud. Srovnají-li se jen vinutí se stejným počtem vodičů, původních 36, pak při změně kroku z 6 na 7 u šestipólového stroje proudy poklesnou, zajímavé je, že u sníženého a zvýšeného počtu vodičů dojde naopak k nárůstu proudu. Jako u předchozích srovnávaných vlastností motoru, i zde si zkrácený krok před pólovou roztečí 7 a za délkou pólové rozteče 8 téměř odpovídají ve svých hodnotách. U zkráceného kroku 3 a prodlouženého kroku 4 dvanáctipólového stroje dochází k poklesu proudu při prodloužení kroku, kromě snížených vodičů, kde proud nepatrně naroste.

Tabulka 6.7: Hodnoty vstupního proudu u simulovaných strojů

$2p$ [-]	Y [-]	$2N_c$ [-]	RMxprt			Maxwell
			I_{zab} [A]	I_{jm} [A]	I_{zab}/I_{jm} [-]	I_{jm} [A]
6	6	34	26,0	5,8	4,5	5,9
		36	21,6	5,1	4,2	5,0
		40	18,4	4,2	4,4	4,1
	7	32	27,6	6,1	4,5	6,2
		36	20,0	4,6	4,3	4,5
		38	18,9	4,3	4,4	4,1
	8	32	27,3	6,0	4,6	6,2
		36	19,8	4,6	4,3	4,5
		38	18,7	4,2	4,5	4,1
12	3	34	30,0	9,7	3,1	10,7
		36	22,2	8,4	2,6	8,8
		42	16,7	6,2	2,7	6,3
	4	32	25,8	9,8	2,6	11,1
		36	19,5	7,5	2,6	7,7
		40	16,2	6,1	2,7	6,3

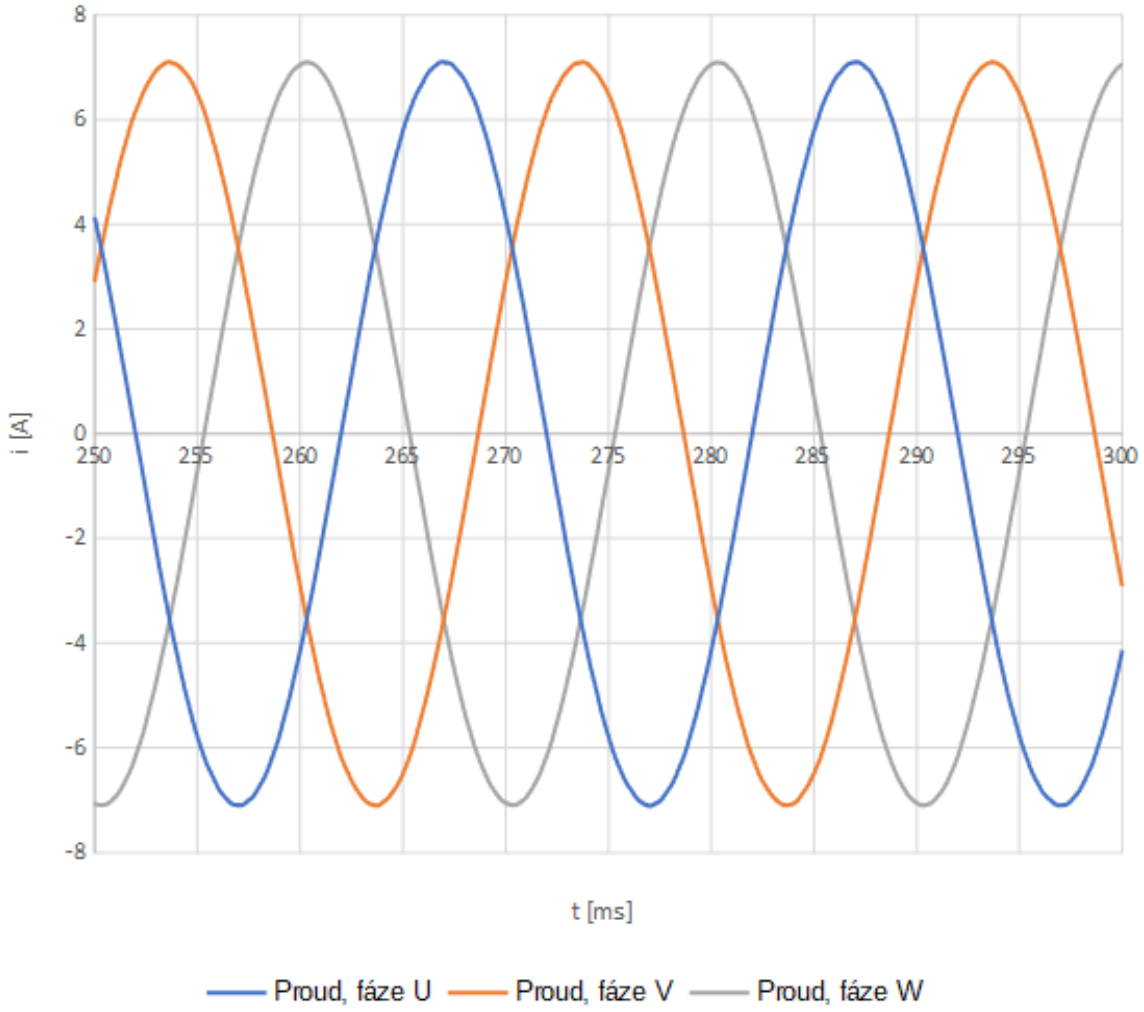
Co je zajímavé a liší se od předchozích srovnávaných veličin, je srovnání hodnot proudu z programu RMxprt a Maxwell. Zatímco u předchozích veličin oba programy nabízely sice odlišné hodnoty, nicméně buď vyšší, nebo nižší vůči druhému, v případě proudu numerická metoda konečných prvků podává jmenovitý proud někdy vyšší a někdy nižší než



Obrázek 6.7: Závislost vstupního proudu na otáčkách u šestipólových strojů

analytická metoda programu RMxprt. Důvod takového číselného výstupu je záležitostí vnitřního fungování programů, hodnoty z programu Maxwell lze však, jak již předesláno, považovat za přesnější.

Pro grafické porovnání je závislost vstupního proudu na otáčkách u dvou šestipólových strojů s odlišným krokem znázorněna na obr. 6.7. Varianta se sníženým počtem vodičů má jednoznačně nejvyšší hodnoty proudu po celé charakteristice, přičemž u stroje s krokem 7 nezanedbatelně vyšší oproti kroku 6. Zbylé stroje mají proud o mnoho menší, přičemž větší rozdíly jsou viditelně při rozběhu stroje při nulových otáčkách, s nabírající rychlostí ke jmenovitým otáčkám rozdíly klesají. U varianty se středním počtem vodičů jsou výsledkem rovněž střední hodnoty proudu, přičemž tentokrát je u šestipólového stroje proud naopak nižší o přibližně stejnou hodnotu. Nejvyšší počty vodičů zajišťují stroji nejmenší odebíraný proud, šestipólový stroj tu má tentokrát vyšší hodnoty, ale jen nepatrně. U jmenovitých otáček křivky strojů s tímto vinutím splývají v jednu. Na obrázku 6.8 je zachycen průběh všech tří fází v posledních 50 ms simulace, jak jej vypočítal Maxwell 2D. Prakticky zcela odpovídá sinusovému tvaru se stejnou amplitudou u všech fází.



Obrázek 6.8: Vstupní proud metodou konečných prvků pro $2p = 6$, $Y = 6$, 36 vodičů

6.2 Výběr optimálního vinutí

Po srovnání z pohledu jednotlivých veličin je potřeba vybrat, které ze simulovaných vinutí statoru je pro stroj optimální, a to jak pro šestipólový stroj, tak pro stroj dvanáctipólový. Za optimální může být obecně zvoleno různé vinutí dle priorit. Optimálním vinutím v této diplomové práci se má na mysli vinutí s nejvyšší hodnotou výkonu či účinnosti. I ostatní veličiny mohou teoreticky hrát jistou hodnotu při srovnávání a výběru dvou podobně kvalitních provedení, nicméně je jejich role jen podružná. V některých případech může být jejich úloha důležitější, ve skutečnosti však více či méně přímo odráží veličiny zvolené za primární, jen z jiného pohledu (ztráty v železe).

U **šestipólového** asynchronního motoru lze při pohledu do tabulky 6.1 vidět, že nejvyšší výkon z šestipólových variant nabízí vinutí se zkráceným krokem 7 a s 32 vodiči v drážce. Nejenže je výkon jednoznačně nejvyšší, ale i účinnost stroje je jedna z nejvyšších, překonána jen třemi dalšími variantami, navíc jen o zanedbatelnou hodnotu. Nejvyšší výkon se tu tedy snoubí i s téměř nejvyšší účinností. Moment je také nejvyšší ze všech variant, nicméně to vše je vykoupeno nízkým účiníkem a vysokou hodnotou odebíraného proudu.

Tabulka 6.8: Hodnoty původních a optimálních vinutí simulovaných asynchronních motorů

$2p$ = 6, n = 930 min^{-1}													
Y [-]	$2N_c$ [-]	P_m [W]	η [-]	P_{ztr} [W]	$P_{z,st}$ [W]	$P_{z,r}$ [W]	M_{jm} [Nm]	M_{zab} [Nm]	M_{zv} [Nm]	ΔM [Nm]	I_{jm} [A]	I_{zab} [A]	cosφ [-]
6	36	2461	0,871	145	156	176	25,3	42,7	60,8	1,6	5,0	21,6	0,810
7	32	2959	0,892	169	106	215	30,4	60,5	82,1	2,5	6,2	27,6	0,773
$2p$ = 12, n = 465 min^{-1}													
Y [-]	$2N_c$ [-]	P_m [W]	η [-]	P_{ztr} [W]	$P_{z,st}$ [W]	$P_{z,r}$ [W]	M_{jm} [Nm]	M_{zab} [Nm]	M_{zv} [Nm]	ΔM [Nm]	I_{jm} [A]	I_{zab} [A]	cosφ [-]
3	36	2132	0,780	192	415	171	43,8	67,6	99,5	9,1	8,8	22,2	0,447
4	32	2519	0,824	219	314	208	51,8	79,8	118,3	12,0	11,1	25,8	0,397

Výpis hodnot původního a optimálního vinutí ukazuje tabulka 6.8. V případě dvojího zdroje hodnot jsou uvedeny pouze hodnoty z programu Maxwell 2D. U optimálního vinutí oproti původnímu došlo tedy k prodloužení kroku na krok 7, stále však jde o krok zkrácený. Počet vodičů v drážce, tedy i závitů cívky, byl snížen o 4 vodiče resp. 2 závity. Výkon značně narostl téměř o 500 W, došlo i k menšímu navýšení účinnosti. Cenou bylo nemalé zvýšení ztrát v železe. Pro srovnání jsou uvedeny i ztráty ve vinutí statoru a v kleci. Lze vidět, že u původního vinutí odpovídají přibližně ztrátám v železe, u optimálního vinutí klesly ztráty ve vinutí statoru o třetinu, naopak došlo k nárůstu ztrát v kleci. Zato moment na hřídeli se opět zlepšil, u záběrného, maximálního i jmenovitého momentu lze vidět zřetelný posun k vyšším hodnotám. Bohužel malé zvlnění momentu, veliká výhoda oproti dvanáctipólovému stroje, se navýšilo. Vyšší výkon a schopnost stroje je přirozeně vykoupena vyšším odebíraným proudem při záběru i v pracovním bodě, účiník je nižší, ale je stále s velikou rezervou lepší než u dvanáctipólového stroje.

V případě **dvanáctipólového** motoru je nejvyšší výkon v případě prodlouženého kroku 4 se sníženým počtem vodičů 32. Účinnost sice není nejvyšší ze simulovaných variant, nicméně patří do vyšších hodnot. Moment je jednoznačně nejvyšší, o mnoho vyšší než v případě některých jiných variant. Ovšem opět účiník a proud mají hodnoty nejhorší ze všech srovnávaných. I hodnoty tohoto optimálního vinutí lze nalézt v tabulce 6.8. Také u dvanáctipólového stroje má optimální vinutí delší krok, tentokrát se dokonce jedná o krok prodloužený, tedy za délkou pólové rozteče. Snížený počet vodičů je o stejné množství jako u šestipólového. Výkon narostl o něco méně než u stroje šestipólového, nicméně i tak je změna výrazná, opět se navíc zvýšila účinnost, tentokrát o viditelnější hodnotu, stále je však nižší než u šestipólového. Ztráty jsou vysoké, byly však již před změnou vinutí a nenarostly o mnoho. Ztráty ve vinutí statoru jsou v případě původního vinutí značné, po přechodu na optimální vinutí se o čtvrtinu zlepšily, zůstaly však relativně vysoké. Zajímavé je, že ztráty v kleci odpovídají šestipólovému stroji. Moment ve třech hodnotách ukazuje odlišným způsobem nárůst potenciálu stroje, lze si všimnout tříciferné hodnoty u momentu zvratu, nejvyšší ze všech simulovaných strojů. Opět je však navýšeno zvlnění momentu, tentokrát na nepříjemnou hodnotu 12 Nm. I proud bohužel navýšil svoji hodnotu oproti původnímu vinutí, záběrný proud však je nižší než u optimálního vinutí šestipólového stroje. U jmenovitého proudu se jedná o vyšší hodnotu, než jakou disponuje šestipólový stroj. Účiník je velmi nízký oproti šestipólovému stroji, navíc u optimálního vinutí poklesla jeho hodnota viditelně.

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala především vlivem změn statorového vinutí na vlastnosti asynchronního motoru. Nemalá část práce byla zasvěcena popisu teorie, odlišným druhům vinutí a hlavním metodám analýzy. Pomocí Tingleyho schématu bylo navrženo sedm možných statorových vinutí pro stator o vybraném počtu drážek, a to pro dva až čtrnáct pólů, dvouvrstvé a se zkráceným krokem na všeobecně doporučovanou hodnotu. Program vytvořený v prostředí Matlab následně vykreslil Görgesův diagram a teoretický tvar magnetické indukce, průběhy byly zanalyzovány a srovnány. K tomu pomohly vypočtené činitele vinutí až po jedenáctou harmonickou. S narůstajícím počtem pólů klesala podobnost tvaru magnetické indukce s tvarem funkce sinus, ale ne vždy klesala při nárůstu počtu pólů také samotná pravidelnost tvaru v rámci jednoho časového okamžiku, někdy naopak i rostla. Srovnání osmipólového a desetipólového stroje ukázalo tuto skutečnost nejlépe. Tato podrobná analýza teoretických hodnot a průběhů připravila cestu k analýze modelů skutečných strojů.

Často v praxi užívané varianty – šestipólová a dvanáctipólová – byly vybrány a jejich vinutí vloženo do kompletních modelů asynchronních motorů. Toto vinutí bylo poté upraveno změnou počtu závitů a velikosti kroku, čímž vznikla skupina modelů. Výsledky simulací v programech RMxprt a Maxwell 2D byly přehledně zpracovány podle veličin, údaje shrnuty v tabulkách a pro všechny analyzované stroje bylo popsáno, jakou měrou a s jakou úměrností se která veličina měnila při změnách kroku a počtu vodičů v drážce. V případech, pro které to bylo vhodné, bylo užito i grafického zobrazení.

Co se týče sycení stroje, důležité bylo především, že pro zvolená vinutí nedošlo nikdy k přesycení v žádné části stroje. U dvanáctipólového stroje byly všechny části kromě jha rotoru syceny přibližně stejně, nejvíce však zub rotoru, u šestipólového s velkým náskokem bylo nejvíce syceno jho statoru. Průřez s hodnotami indukce ukázal tento stav velmi názorně. Teoretické průběhy indukce ve vzduchové mezeře dostaly svoji praktickou podobu a bylo i ukázáno, které vyšší harmonické za ni mohou. Výsledek této degradace teoretického ideálního tvaru indukce v poněkud praktičtější podobě ukázala část práce o momentu na hřídeli a výkonu stroje. Pulzace těchto veličin, způsobené nedokonalým přenosem energie přes vzduchovou mezeru, byly popsány i srovnány, mimo jiné se ukázalo, že pulzace u šestipólového stroje jsou oproti dvanáctipólovému téměř zanedbatelné. V kapitole o výkonu a účinnosti byl také krátce popsán pracovní bod se jmenovitým výkonem, aby i z tohoto pohledu mohlo být srovnáno. Část věnující se ztrátám v železe ukázala vztah výkonu a účinnosti z jiného úhlu.

Ze simulací bylo mimo jiné zajímavé srovnání mezi největším zkráceným a nejmenším prodlouženým krokem šestipólového stroje, které vykazovaly velmi podobné vlastnosti a byly z pohledu všech zkoumaných veličin prakticky zaměnitelné.

Na závěr bylo dle velikosti výkonu stroje vybráno optimální vinutí pro motor o šesti a dvanácti pólech, u obou šlo o vinutí se sníženým počtem závitů cívky. Optimální vinutí lze zvolit i dle jiné veličiny, tato práce umožňuje ve svých výsledcích zájemci v rámci skupiny simulovaných strojů a popsaných změn jejich veličin vhodné vinutí vybrat.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje.* 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 221 s.

[2] BAŠTA, Jan, CHLÁDEK, Jaroslav a MAYER, Imrich. *Teorie elektrických strojů.* 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1968. 584 s.

[3] BOLDEA, Ion a NASAR, Syed A. *The Induction Machines Design Handbook.* 2. vyd. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 1951. 826 s. ISBN 978-1-4200-6668-5.

[4] CIGÁNEK, Ladislav. *Elektrické stroje. Působení, provedení a navrhování.* 6. vyd. Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1951. 801 s.

[5] CIGÁNEK, Ladislav a BAUER, Miroslav. *Elektrické stroje a přístroje.* 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955. 634 s.

[6] HRABOVCOVÁ, Valéria a RAFAJDUS, Pavol. *Elektrické stroje. Teória a príklady.* 2. vyd. Žilina: EDIS – vydavateľské centrum Žilinskej univerzity, 2015. 415 s. ISBN 978-80-554-0998-6.

[7] KELLENBERGER, Walter a WIEDEMANN, Eugen. *Konstrukce elektrických strojů.* 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1973. 652 s.

[8] KUBÍN, Tomáš. *Analytické vyjádření vlastností střídavých vinutí.* Brno, 2012. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/58382. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Čestmír Ondrůšek.

[9] KUČERA, Jaroslav a HAPL, Josef. *Vinutí elektrických strojů točivých.* 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. 899 s.

[10] ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony. Příručka techniky, volby a užití vybraných druhů.* 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2004. 192 s. ISBN 80-7300-092-X.

[11] SEQUENZ, Heinrich. *Technologie vinutí elektrických strojů točivých.* 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1980. 310 s.

[12] Katalogový list plechu M800-50A firmy Cogent Power, dostupný online na *http://cogent-power.com* [cit. 11.2.2020]. 1 s.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Příklady jednovrstvých soustředných vinutí

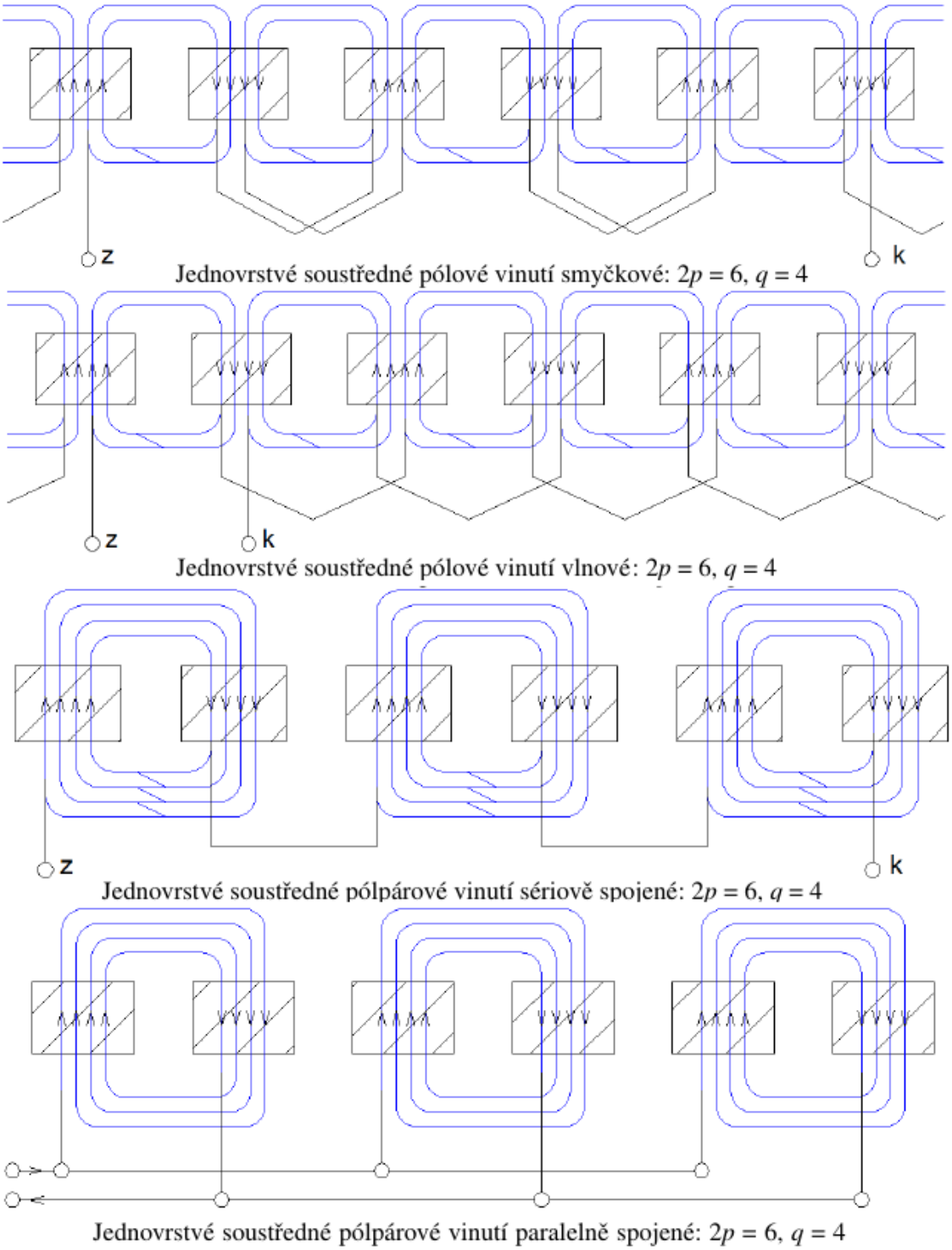
Příloha 2 – Příklady jednovrstvých vinutí s cívkami o stejném kroku

Příloha 3 – Příklady dvouvrstvých vinutí

Příloha 4 – Tingleyho schémata pro počet pólů statoru 2 – 8

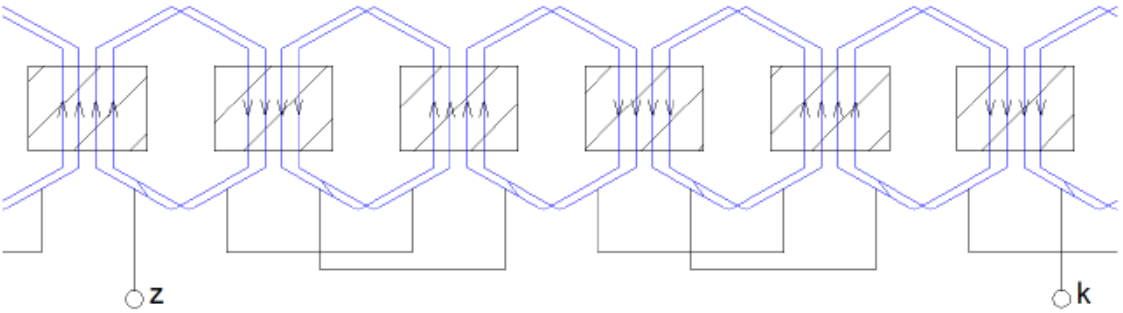
Příloha 5 – Tingleyho schémata pro počet pólů statoru 10 – 14

PŘÍLOHA 1 – PŘÍKLADY JEDNOVRSTVÝCH SOUSTŘEDNÝCH VINUTÍ

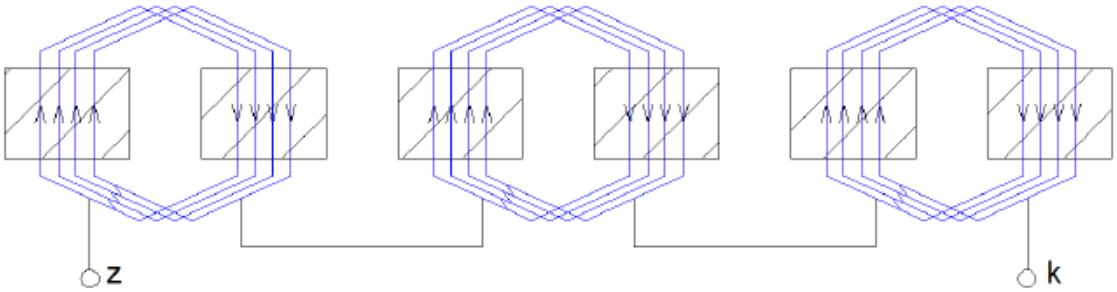


Obrázek 7.1: Příklady jednovrstvých soustředných vinutí [8], [9]

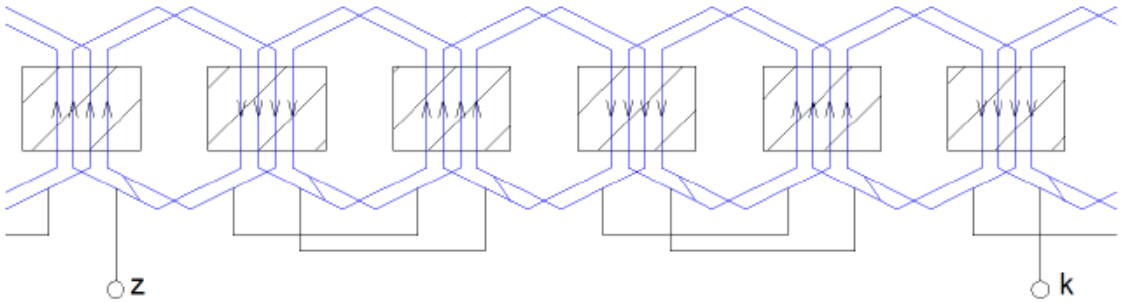
PŘÍLOHA 2 – PŘÍKLADY JEDNOVRSTVÝCH VINUTÍ S CÍVKAMI O STEJNÉM KROKU



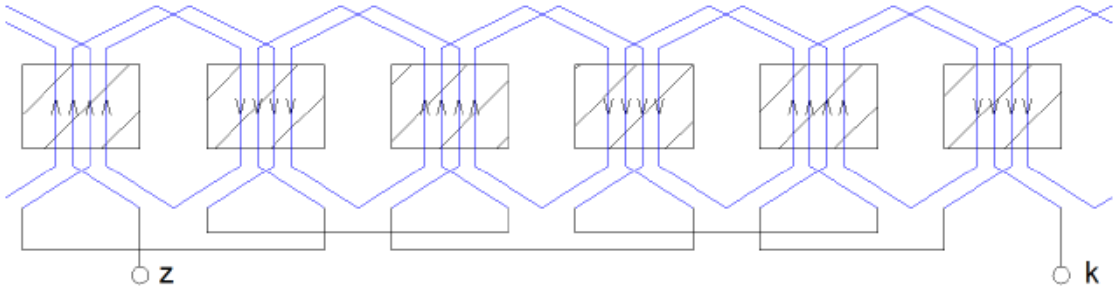
Jednovrstvé pólové vinutí smyčkové s cívkami stejného kroku: $2p = 6$, $q = 4$



Jednovrstvé pólpárové vinutí smyčkové sériově zapojené: $2p = 6$, $q = 4$



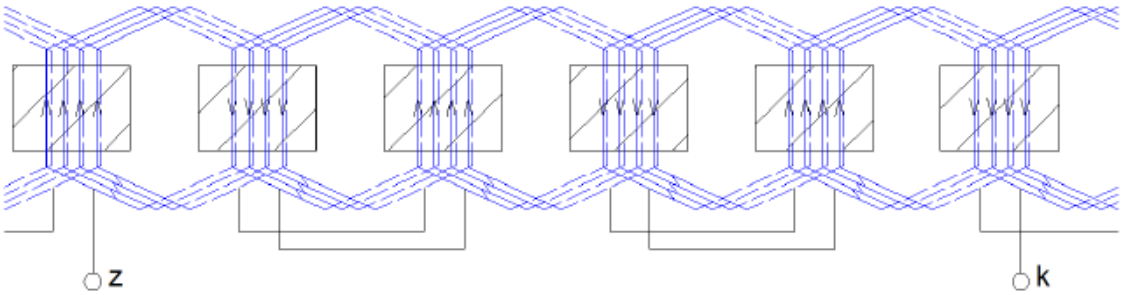
Jednovrstvé rozložené pólové smyčkové vinutí s cívkami stejného kroku: $2p = 6$, $q = 4$



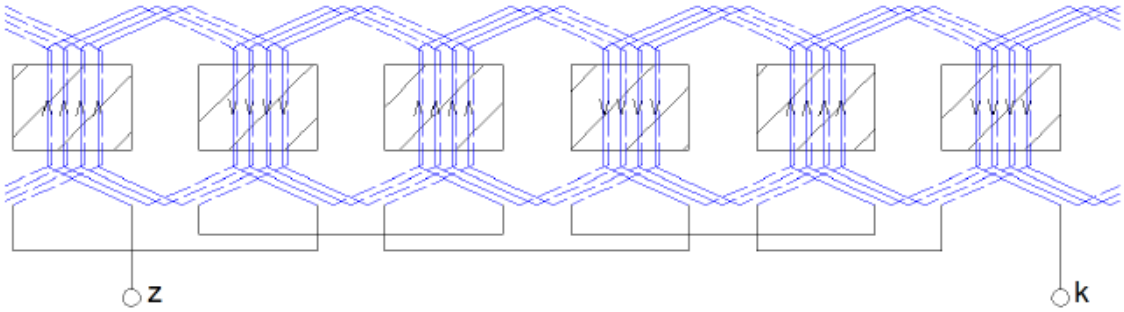
Jednovrstvé rozložené pólové vlnové vinutí s cívkami stejného kroku: $2p = 6$, $q = 4$

Obrázek 7.2: Příklady jednovrstvých vinutí s cívkami o stejném kroku [8], [9]

PŘÍLOHA 3 – PŘÍKLADY DVOUVRSTVÝCH VINUTÍ



Dvouvrstvé smyčkové vinutí se smyčkovými skupinovými spojkami: $2p = 6$, $q = 4$



Dvouvrstvé smyčkové vinutí s vlnovými skupinovými spojkami: $2p = 6$, $q = 4$

Obrázek 7.3: Příklady dvouvrstvých vinutí [8], [9]

PŘÍLOHA 4 – TINGLEYHO SCHÉMATA PRO POČET PÓLŮ STATORU 2 – 8

Tabulka 7.1: Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 2$, $q = 7\frac{1}{2}$

Pól	U															W															V														
I	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18		19		20		21		22		23
II		24		25		26		27		28		29		30		31		32		33		34		35		36		37		38		39		40		41		42		43		44		45	

Tabulka 7.2: Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 4$, $q = 3\frac{3}{4}$

Pól	U															W															V														
I	1				2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12
II				13				14				15				16				17				18				19				20				21				22				23	
III			24				25				26				27				28				29				30				31				32				33				34		
IV		35				36				37				38				39				40				41				42				43				44				45			

Tabulka 7.3: Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 6$, $q = 2\frac{1}{2}$

Pól	U					W					V				
I	1		2		3		4		5		6		7		8
II		9		10		11		12		13		14		15	
III	16		17		18		19		20		21		22		23
IV		24		25		26		27		28		29		30	
V	31		32		33		34		35		36		37		38
VI		39		40		41		42		43		44		45	

Tabulka 7.4: Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 8$, $q = 1\frac{7}{8}$

Pól	U															W															V														
I	1								2								3								4								5								6				
II				7								8								9								10								11								12	
III							13								14								15								16								17						
IV		18								19								20								21								22								23			
V					24								25								26								27								28								29
VI								30								31								32								33								34					
VII			35								36								37								38								39								40		
VIII						41								42								43								44								45							

PŘÍLOHA 5 – TINGLEYHO SCHÉMATA PRO POČET PÓLŮ STATORU 10 – 14

Tabulka 7.5: Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 10$, $q = 1\frac{1}{2}$

Pól	U			W			V		
I	1		2		3		4		5
II		6		7		8		9	
III	10		11		12		13		14
IV		15		16		17		18	
V	19		20		21		22		23
VI		24		25		26		27	
VII	28		29		30		31		32
VIII		33		34		35		36	
IX	37		38		39		40		41
X		42		43		44		45	

Tabulka 7.6: Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 12$, $q = 1\frac{1}{4}$

Pól	U					W					V				
I	1				2				3				4		
II		5				6				7				8	
III			9				10				11				12
IV				13				14				15			
V	16				17				18				19		
VI		20				21				22				23	
VII			24				25				26				27
VIII				28				29				30			
IX	31				32				33				34		
X		35				36				37				38	
XI			39				40				41				42
XII				43				44				45			

Tabulka 7.7: Tingleyho schéma pro $Q = 45$, $2p = 14$, $q = 1\frac{1}{14}$

Pól	U														
I	1														2
II											5				
III									8						
IV						11									
V			14												
VI														18	
VII											21				
VIII								24							
IX					27										
X		30													
XI													34		
XII										37					
XIII							40								
XIV				43											

Pól	W														
I														3	
II											6				
III								9							
IV					12										
V		15													
VI													19		
VII										22					
VIII							25								
IX				28											
X	31														32
XI												35			
XII									38						
XIII						41									
XIV			44												

Pól	V														
I													4		
II										7					
III							10								
IV				13											
V	16														17
VI												20			
VII									23						
VIII						26									
IX			29												
X														33	
XI											36				
XII								39							
XIII					42										
XIV		45													