

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

Bc. Tadeáš Holý



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce**

**Analýza a porovnání vlastností asynchronních strojů s různými typy
statorového vinutí**

**Analysis and comparison of induction machines characteristics with
distinct types of stator winding**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Elektrické pohony

Vedoucí práce: doc. Ing. Miroslav Chomát, CSc.

Bc. Tadeáš Holý

Praha 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Datum: 24. 5. 2019

.....
Bc. Tadeáš Holý

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Miroslavovi Chomátovi, CSc. za ochotu, trpělivost, čas věnovaný při konzultacích a řadu cenných rad, které mi dopomohly k dosažení stanovených cílů. V neposlední řadě bych rád poděkoval firmě ATAS elektromotory Náchod a.s. Jmenovitě mé díky patří vedoucímu prodeje firmy ATAS, panu Ing. Leoši Kuchařovi, a Ing. Karlu Dandovi, konstruktérovi asynchronních motorů, který mi poskytl potřebnou dokumentaci motoru a ochotně odpověděl na veškeré mé dotazy. Dále bych rád poděkoval Ing. Radkovi Fajtlovi, který mi poskytl cenné rady a informace pro sestavení modelů strojů v programu ANSYS.

.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Holý** Jméno: **Tadeáš** Osobní číslo: **420066**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza a porovnání vlastností asynchronních strojů s různými typy statorového vinutí

Název diplomové práce anglicky:

Analysis and comparison of induction machines characteristics with distinct types of stator winding

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s různými typy a způsoby realizace statorových vinutí asynchronních strojů
2. Pomocí metody konečných prvků vytvořte numerické modely asynchronních strojů s různými typy vinutí
3. Na základě simulací analyzujte a porovnejte vlastnosti asynchronních strojů s různými typy statorových vinutí

Seznam doporučené literatury:

- [1] MĚŘIČKA, J., HAMATA V. a VOŽENÍLEK, P. Elektrické stroje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [2] MAYER, D.: Aplikovaný elektromagnetismus. 2. vydání, České Budějovice: KOPP, 2012.
- [3] LIPO, T.A. Introduction to AC Machine Design. Madison: University of Wisconsin ? Madison, 1996.
- [4] ŠTĚPINA, J. Prostorové fázory jako základ teorie elektrických strojů. Plzeň: Fakulta elektrotechnická ZČU, 1993.
- [5] JENSEN, B. B., JACK, A. G., ATKINSON, G. J., MECROW, B. C., Performance of a Folded-Strip Toroidally Wound Induction Machine. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.: 59, No. 5, 2012
- [6] JENSEN, B. B., JACK, A. G. Toroidally Wound Induction Machines. Proc. 19th ICEM, Rome, Italy, 2010
- [7] SAKAI K., SUZUKI M., TAKISHIMA K. Induction Machines with Novel Concentrated Windings. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, 2017,

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Miroslav Chomát, CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.01.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.5.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

doc. Ing. Miroslav Chomát, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

7. 5. 2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním různých typů statorového vinutí třífázového asynchronního motoru T22V525 s kotvou nakrátko o jmenovitém výkonu 600 W vyráběného firmou ATAS elektromotory Náchod a.s. Je porovnáno konvenční jednovrstvé soustředné pólové vinutí s experimentálně navinutým toroidním vinutím, které není u asynchronních strojů běžné. Stručně je popsán princip asynchronních strojů, různé typy vinutí a nastíněna problematika modelování magnetického pole pomocí metody konečných prvků. Bylo provedeno měření obou strojů s konvenčním a toroidním statorovým vinutím spolu s 2D simulací v softwaru ANSYS. Získaná data byla porovnávána a vyhodnocena.

Klíčová slova:

Asynchronní stroj, vinutí motoru, toroidní vinutí, magnetické pole, metoda konečných prvků

Summary:

This master thesis focuses on the comparison of different types of three-phase induction motor stator winding. Motor T22V525 with squirrel cage rotor and nominal power of 600W was made by company ATAS elektromotory Náchod a.s. Winding was modified into toroidal stator winding, which is not common for induction machines. The principle of induction machines together with necessary winding theory is presented. Furthermore, principle and application of finite element method in magnetic field modelling is described. Motors with toroidal and standard one-layer winding are compared based on measurements and 2D simulations using software ANSYS. Moreover, evaluation of comparison of machines mentioned above is presented.

Index Terms:

Induction machine, motor winding, toroidal winding, magnetic field, finite element method

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Asynchronní stroje	11
2.1 Princip činnosti.....	11
2.1 Konstrukční uspořádání.....	12
2.2 Náhradní schéma	14
3. Vinutí točivých elektrických strojů	17
3.1 Základní pojmy v teorii vinutí.....	17
3.2 Vícefázové konvenční vinutí.....	18
3.3 Třífázové konvenční statorové vinutí.....	23
3.3.1 Jednovrstvé vinutí.....	24
3.3.2 Dvouvrstvé vinutí.....	27
3.4 Toroidně vinutý asynchronní motor	29
4. Řešení okrajových úloh v elektromagnetickém poli	31
4.1 Metoda konečných prvků	31
4.2 Obecná formulace okrajové úlohy.....	31
4.3 Princip MKP.....	32
4.4 Řešení elektromagnetických úloh softwarovými nástroji	34
5. Konvenčně vinutý motor T22V525.....	35
6. Toroidně navinutý motor T22V525 pro účely porovnání	37
6.1 Provedení toroidně vinutého stroje.....	37
7. Porovnání parametrů strojů T22V525 s různým typem vinutí.....	42
7.1 Délka čel vinutí	42
7.2 Odporů vinutí	43
7.3 Reaktance čel vinutí	44
7.4 Zatěžovací charakteristika	45
8. Modely asynchronních strojů s různým typem vinutí	48
8.1 Tvorba modelů	48
8.1.1 Tvorba modelu v RMXprt.....	48
8.1.2 2D model motoru s klasickým vinutím	51
8.2 2D model s toroidním vinutím	52
8.3 Analýza průběhů ze simulací.....	53
8.4 Verifikace modelu s konvenčním vinutím	56
8.5 Porovnání strojů na základě simulací	58
9. Závěr.....	61
Seznam použitých zdrojů	63
Seznam použitých symbolů a zkratk	65

Seznam obrázků	68
Seznam tabulek	70
Obsah přiloženého DVD	71
Seznam příloh.....	72
Příloha A	73
Příloha B.....	76
Příloha C.....	78

1. Úvod

Asynchronní motory, zejména s kotvou nakrátko, se pro svoji jednoduchost a spolehlivost staly nejpoužívanějšími pohonnými stroji. Od patentování před 130 lety jsou vlastnosti asynchronních strojů, zvláště jejich účinnost, předmětem neustálého vývoje a v současnosti je kladen stále větší důraz na ekologii provozu, zejména na snižování spotřeby elektrické energie. Spotřeba motorů představuje téměř 65% veškeré spotřeby energie a náklady na energii během životnosti převyšují až stokrát náklady na pořízení motoru. Nové evropské normy zavádějí rozdělení motorů do účinnostních tříd, standardizují a zpřísňují metody měření účinnosti motoru. Cesty ke zlepšení parametrů strojů jsou hledány jak v jejich konstrukčním uspořádání, tak v použití kvalitnějších materiálů. (např. zmenšování rozměru vzduchové mezery mezi rotorem a statorem, použití kvalitních materiálů v magnetickém obvodu, nahrazení hliníku v tlakově lité kotvě mědí atd.) Protože účinnost motoru je ze 30% až 50% dána tepelnými ztrátami ve vinutí statoru, je nutno hledat cesty ke zlepšení právě zde.

Cílem této práce je porovnání vlastností konvenčně vinutého, sériově vyráběného motoru T22V525 o jmenovitém výkonu 600 W z produkce společnosti ATAS elektromotory Náchod a.s. a jeho varianty s toroidním vinutím statoru. Toroidní vinutí se u asynchronních strojů běžně nepoužívá, ačkoliv lze předpokládat, že může přinést řadu konstrukčních výhod i vyšší účinnost stroje. Toroidní vinutí zkracuje výšku čel vinutí, tedy i celkovou délku vodičů vinutí. Menší ohmický odpor vinutí oproti konvenčně vinutému stroji znamená vyšší účinnost a také úsporu mědi.

V práci popisují postup zhotovení toroidního vinutí a jeho odlišnosti oproti konvenčně vinutému stroji T22V525. Na měřicím pracovišti v Ústavu termomechaniky AV ČR, v. v. i. jsem zjistil vlastnosti při měření zatěžovacích charakteristik obou strojů s různým typem statorového vinutí. Měření jsem provedl při sníženém napětí a frekvenci 25 Hz, čímž jsem snížil synchronní otáčky stroje. Pro snížení otáček jsem se rozhodl kvůli bezpečnosti, neboť experimentální motor s toroidním vinutím není mechanicky tak robustní. Vycházel jsem z předpokladu, že byla-li zachována geometrie statorových a rotorových plechů, magnetický tok se bude u obou strojů uzavírat stejnou cestou a stroje změní jen parametry příslušící různému provedení statorového vinutí, tj. rozptylová reaktance a činný odpor vinutí.

V softwaru ANYS jsem vytvořil 2D modely obou strojů, které poměrně přesně vystihují základní chování obou strojů, a pomocí metody konečných prvků jsem získal charakteristiky chování pro různé otáčky rotoru. Protože je magnetický tok u obou strojů téměř shodný, lze očekávat, že podobné budou i provozní vlastnosti simulovaných strojů.

2. Asynchronní stroje

Asynchronní stroje si pro svou jednoduchost, spolehlivost, minimální údržbu a nízké výrobní náklady našly uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích a staly se nejběžnějšími pohonnými jednotkami. Vyrábějí se o příkonech od jednotek wattů do jednotek megawattů, nevyžadují náročnou údržbu a jejich životnost je omezena převážně trvanlivostí ložisek. Technologie výroby je nenáročná, vstupní materiály jsou běžně dostupné. Výrobní proces asynchronních strojů, především o malém výkonu, je možné z velké části automatizovat a vyrábět je ve velkých sériích s nízkými výrobními náklady [1].

Mezi nevýhody asynchronních motorů v minulosti patřila obtížná regulace otáček. Asynchronní motory byly proto běžně používány pro aplikace, kde nebyla potřeba měnit rychlost otáčení. Dalším úskalím je značný proudový náraz při rozběhu přímým připojením na distribuční síť. Záběrný proud je při rozběhu omezen pouze impedancí motoru nakrátko a u asynchronních strojů s kotvou nakrátko běžně převyšuje jmenovitý proud čtyřnásobně až sedminásobně, čemuž se musí přizpůsobit i použité jističe a pojistky[2]. Oba tyto problémy lze nyní řešit použitím soustavy s měničem. Vzhledem k rapidnímu poklesu ceny elektroniky se tak pro asynchronní motory otvírají další oblasti uplatnění.

Soustavy měnič-motor lze dobře přizpůsobit danému účelu a asynchronní motory pak nacházejí uplatnění v aplikacích, ve kterých by dříve nemohly být provozovány. Mezi takovéto aplikace patří například použití asynchronního motoru jako trakčního pohonu [1].

V poslední době rostou nároky na provozní ekonomiku a ekologii provozu elektromotorů a novodobé evropské normy umožňují uvádět na trh jen výrobky splňující předepsaný limit účinnosti. Tuto oblast upravuje norma ČSN EN 60034-30-1: Točivé elektrické stroje, část 30-1: Třídy účinnosti střídavých motorů provozovaných ze sítě. Tato norma, jež je účinná od 01/2015, zavádí soubor mezních hodnot účinnosti stanovený v závislosti na kmitočtu, počtu pólů a výkonu motoru.

2.1 Princip činnosti

Princip činnosti asynchronního (indukčního) stroje je založen na elektromagnetické indukci napětí v rotorovém vinutí proměnným (točivým) magnetickým polem statoru. Indukované napětí způsobí průchod proudu ve vinutí rotoru, čímž vzniká magnetické pole rotoru. Magnetické pole rotoru a statoru spolu navzájem reagují a vytváří točivý moment ve směru otáčení magnetického pole statoru. Rotor není zapotřebí elektricky napájet, potřebné napětí v rotorovém vinutí vzniká elektromagnetickou indukcí, a klecové vinutí rotoru lze snadno vyrobit tlakovým odlitím (viz následující kapitola).

Statorové vinutí je napájeno střídavým elektrickým proudem, který vybudí proměnné magnetické pole otáčející se rychlostí danou napájecí frekvencí. Pro synchronní úhlovou rychlost ω_s točivého magnetického pole napájeného frekvencí f_s je možné psát:

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot f_s}{p}, \quad (2.1)$$

kde p je počet pólových dvojic.

Rotující magnetické pole indukuje v rotorovém vinutí proudy, podobně jako tomu je u transformátoru, z tohoto důvodu jsou si podobná i náhradní schémata těchto elektrických strojů. Pro vznik potřebného momentu je zapotřebí, aby se rotor otáčel o něco pomaleji, než je otáčivá rychlost magnetického pole statoru. Velikost indukovaného napětí, a tím pádem i provozní vlastnosti asynchronního stroje, závisí na rozdílu točivé rychlosti magnetického pole statoru ω_s a rotoru ω .

Pro relativní rychlost rotoru vůči statoru ω_{rel} , která je také známá jako rychlost skluzová, tedy musí platit:

$$\omega_{\text{rel}} = \omega_S - \omega . \quad (2.2)$$

Pro asynchronní stroje se navíc zavádí pojem skluz, který je definován jako poměr relativní rychlosti rotoru vůči statoru ω_{rel} a synchronní rychlosti statoru ω_S , tedy:

$$s = \frac{\omega_{\text{rel}}}{\omega_S} = \frac{\omega_S - \omega}{\omega_S} . \quad (2.3)$$

Frekvence rotorového proudu, respektive napětí, je dána napájecí frekvencí a skluzem. Platí tedy:

$$f_R = f_S \cdot s . \quad (2.4)$$

Zpomalením rotoru se do rotorového vinutí bude indukovat vyšší napětí a tím pádem bude vyšší i proud procházející vinutím. Větší proud vytvoří magnetické pole rotoru o větší intenzitě, čímž se zvyšuje i elektrický moment stroje. Asynchronní stroj v tomto případě pracuje jako motor.

Začneme-li asynchronní stroj pohánět a otáčky rotoru budou vyšší než otáčky synchronní, začnou se do statorového vinutí indukovat proudy. Vlivem statorových proudů vznikne také točivý moment, který má ovšem opačný smysl, než je tomu u motorického režimu. Dodávaná mechanická energie rotoru se tak přeměňuje na energii elektrickou. Asynchronní stroj v tomto případě pracuje jako generátor.

Budeme-li rotorem asynchronního stroje otáčet proti směru točení magnetického pole statoru, je třeba překonávat motorický moment stroje. Hnací moment hřídele v tomto případě působí proti momentu stroje, který má motorický charakter. Do stroje je nutné přivádět jak energii mechanickou, tak i energii elektrickou. Asynchronní stroj v tomto případě pracuje jako brzda.

Hodnota skluzu udává, v jaké provozním režimu se stroj nachází. Rozlišujeme tři provozní stavy:

- $s \in (-\infty, 0)$ stroj pracuje jako generátor
- $s \in (0, 1)$ stroj pracuje jako motor
- $s \in (1, \infty)$ stroj pracuje jako brzda

Jak u transformátoru, tak i u asynchronního stroje, rozlišujeme dva základní stavy – stav naprázdno a stav nakrátko. Stroj se nachází ve stavu naprázdno, pokud se rotor otáčí synchronně s točivým polem statoru. Skluz je v tomto případě roven nule a do rotoru se nemůže indukovat napětí. Tohoto stavu lze v praxi dosáhnout pouze při pohánění rotoru. Asynchronní stroj totiž samostatně nemůže dosáhnout synchronní rychlosti, protože stroj musí překonávat moment daný mechanickými ztrátami v ložiscích a odporem ventilátoru. Nenulový zátěžný moment způsobí zpomalení rotoru a otáčky stroje jsou pak nižší než synchronní otáčky, do rotoru se indukují nenulové napětí.

Stroj se nachází ve stavu nakrátko, pokud je rotor zabrzděn, a tedy skluz je rovný jedné. V tomto stavu nelze provozovat motor dlouhodobě, protože při jmenovitém napájecím napětí překračuje statorový proud několikanásobně jmenovitou hodnotu. Statorové vinutí se průchodem proudu zahřívá a po delší době by mohlo být nenávratně zničeno. Parametry motoru nakrátko se proto měří při jmenovitém proudu, kterého je dosaženo snížením napájecího napětí.

Tato podkapitola byla zpracována na základě literatury [1], [2]

2.1 Konstrukční uspořádání

Stator asynchronního motoru je tvořen statorovým svazkem (tzv. paketem) vzájemně izolovaných plechů z křemíkové oceli, ve kterém je v drážkách uloženo vícefázové vinutí. Magnetický obvod statoru spolu s vinutím je uložen v kostře motoru, která bývá vyráběna jako

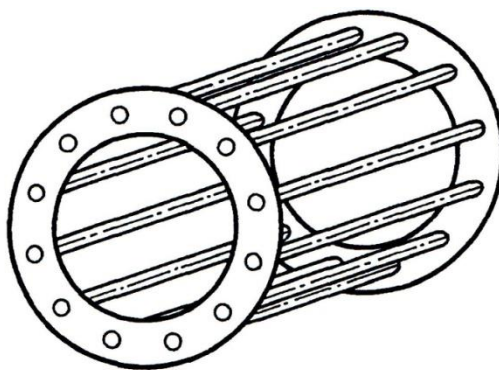
železný či hliníkový odlitek. Na kostru dosedají víka, do kterých jsou vsazena ložiska, která nesou hřídel s rotorem. Kostra motoru a víka musejí být dostatečně tuhá a přesně opracovaná, protože zajišťují přesné usazení rotoru vůči statoru a vymezení vzduchové mezery mezi nimi. Velikost a pravidelnost vzduchové mezery je u asynchronních strojů klíčovým parametrem. Účinnost motoru a další vlastnosti se s velikostí vzduchové mezery zhoršují. Výrobci se snaží minimalizovat velikost vzduchové mezery, avšak při optimálních výrobních nákladech a dobré mechanické spolehlivosti výrobku. Vzduchová mezera bývá široká pouze několik desetin milimetrů u malých strojů, u větších až několik milimetrů [1].

Magnetický obvod asynchronního motoru musí být zhotoven z materiálu s dobrou magnetickou vodivostí, s minimálními ztrátami vířivými a hysterezními proudy. Používají se tzv. plechy pro elektrotechniku (dřívější název "dynamové plechy"). Vířivé proudy se indukují díky střídavému magnetického toku, a takto vzniklé proudy se uzavírají uvnitř vodiče v podobě smyček. Proudové smyčky se snaží působit proti změně magnetického toku, která jej vyvolala, a tím magnetický tok zeslabují. V praxi se vířivé proudy eliminují právě plechy pro elektrotechniku, které jsou navzájem izolovány a mají malou tloušťku. Vířivé proudy se tak nemohou uzavírat mezi jednotlivými plechy. Plechy navíc obsahují malou příměs křemíku nebo u nových materiálů kobaltu či niklu pro zvýšení elektrického odporu, čímž dochází k snížení těchto proudů.

Z plechů pro elektrotechniku je ze stejného kusu vystřižena statorová a rotorová část s drážkami pro uložení vinutí. Plechy se následně skládají na sebe do tzv. paketů. Plechové pásy, z kterých jsou rotorové a statorové části vystřihovány, nemají vlivem výrobní nedokonalosti po stranách stejnou tloušťku, jsou tzv. klínovité. Z tohoto důvodu se v praxi plechy se překládají o 180°, čímž se účinně vyrovnává tloušťková nesymetrie plechů. Rotorový paket je navíc složen tak, aby jeden konec vinutí byl prostorově posunut vzhledem k druhému konci [3].

U vinutých rotorů se vinutí vkládá do drážek rotoru, přičemž počet pólů se musí shodovat s počtem pólů statorového vinutí. Konec vinutí je spojen s kroužkem na hřídeli, na které dosedají kartáče. Vinuté rotory se používají především při omezování záběrného proudu, protože se dá do obvodu rotoru přes kroužky připojit spouštěcí odpor. Po rozběhu stroje je možné odklopit kartáče a kroužky stroje permanentně zkratovat. Kartáče se tak dále neopotřebovávají a nezpůsobují ztráty třením[1].

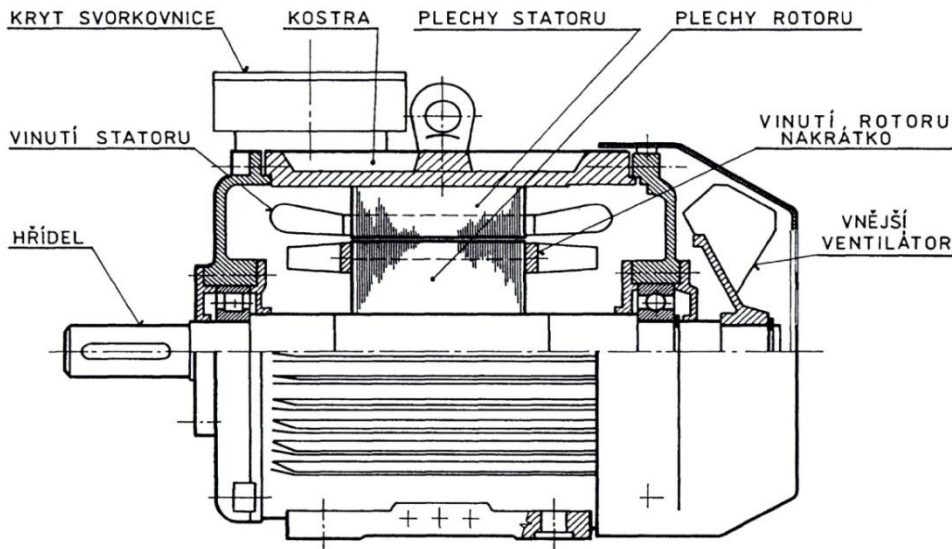
Klecové vinutí rotoru je nejběžnějším typem a kvůli své jednoduchosti a nenáročnosti výroby nachází uplatnění u většiny asynchronních strojů. Toto vinutí tvoří nejčastěji hliníkové či měděné tyče, které jsou na koncích propojeny zkratovacími prstenci z téhož materiálu. Celé vinutí je pod tlakem lito přímo do rotorového paketu. Na většině prstenců můžeme najít i jednoduché ventilátory v podobě nálitků ve tvaru lopatek. Protože jsou tyče vinutí permanentně zkratovány prstenci, uchytilo se pro toto vinutí označení kotva nakrátko. Každá tyč tvoří pomyslnou fázi rotoru, spojenou nakrátko prstenci. Je zřejmé, že počet drážek rotoru musí odpovídat počtu pomyslných fází klecového rotoru[1]. Konstrukce klecové kotvy je patrná z obr 2.1.



Obr. 2.1 Klecová kotva (převzato z [1])

Rotorový paket spolu s vinutím je usazen na hřídel, která je na jednom konci osazena ventilátorem. Ventilátor zajišťuje odvod tepla vzniklého ztrátami ve stroji. Ztráty v motoru se dělí na ztráty mechanické, ztráty v magnetickém obvodu (ztráty v železe), ztráty ve vinutí statoru a rotoru, a přídavné ztráty. Jak bylo výše zmíněno, některé stroje jsou opatřeny jednoduchým ventilátorem na kroužcích klecové kotvy. Do statorových drážek je uloženo vinutí, kterému bude věnována kapitola 3.

Konstrukce asynchronního stroje je zobrazena v příčném řezu na obr. 2.2



Obr. 2.2 Řez asynchronním motorem s klecovým vinutím (převzato z [1])

2.2 Náhradní schéma

Asynchronní stroje mají podobné vlastnosti jako je tomu u transformátorů, proto i náhradní schéma je podobné. Podobně jako u transformátoru, jsou dvě vinutí magneticky vázána. V případě asynchronního stroje je magnetický tok veden vzduchovou mezerou. Analogicky jako pro transformátor můžeme psát napěťové rovnice pro stator a rotor (dle [1]):

$$\begin{aligned}\hat{U}_S &= R_S \cdot \hat{I}_S + j \cdot X_{S\sigma} \cdot \hat{I}_S + \hat{U}_{iS} \\ \hat{U}_{iR} &= R_R \cdot \hat{I}_R + j \cdot X_{R\sigma} \cdot \hat{I}_R + \hat{U}_R.\end{aligned}\quad (2.5)$$

Statorové veličiny jsou označovány s indexem „S“, rotorové veličiny s indexem „R“. Rovnice 1.5 byly odvozeny pro třífázový souměrný motor se zabrzděným rotorem (stav nakrátko). \hat{U}_S označuje napětí na statoru, \hat{U}_R označuje napětí na rotoru. R_S a R_R jsou odpory statorového a rotorového vinutí, $X_{S\sigma}$ a $X_{R\sigma}$ jsou rozptylové reaktance vinutí. Indukovaná napětí rotoru a statoru jsou označena s indexem „i“, tedy \hat{U}_{iR} pro rotor a \hat{U}_{iS} pro stator. Pro rovnice indukovaných v efektivních hodnotách napětí platí:

$$\begin{aligned}U_{iS} &= 4,44 \cdot \Phi \cdot f_S \cdot N_S \cdot k_{vS} \\ U_{iR} &= 4,44 \cdot \Phi \cdot f_R \cdot N_R \cdot k_{vR},\end{aligned}\quad (2.6)$$

kde Φ je magnetický indukční tok, N_R je počet závitů jedné cívky rotorové fáze a N_S je počet závitů jedné cívky statorové fáze. Pro asynchronní motor s kotvou nakrátko je počet fází rotoru dán počtem rotorových drážek. V tomto případě tvoří cívku jedné fáze pouze jedna rotorová tyč, tudíž je $N_R = 0,5$. Konstanty k_{vR} a k_{vS} je tzv. činitel vinutí rotoru, respektive statoru. Činitel vinutí respektuje rozložení vinutí po obvodu statoru a rotoru.

Pokud se rotor otáčí, mění se skluz a tím pádem i rotorová frekvence $f_R = s \cdot f_S$. Uvažujeme-li rotorové vinutí s vinutím nakrátko, je $\hat{U}_R = 0$. Pro indukované napětí rotoru lze psát:

$$s \cdot \hat{U}_{iR} = R_R \cdot \hat{I}_R + j \cdot s \cdot X_{R\sigma} \cdot \hat{I}_R. \quad (2.7)$$

Úpravou pak dostáváme:

$$\hat{U}_{iR} = \frac{R_R}{s} \cdot \hat{I}_R + j \cdot X_{R\sigma} \cdot \hat{I}_R = R_R \cdot \hat{I}_R + j \cdot s \cdot X_{R\sigma} \cdot \hat{I}_R + \frac{1-s}{s} \cdot R_R \cdot \hat{I}_R. \quad (2.8)$$

Aby bylo možné obvod rotoru a statoru spojit v jeden celek, je nutné jako u transformátoru přepočítat rotorové veličiny na statorové. Přepočet musí splnit následující podmínky [1]:

- Rotorové vinutí má stejný počet fází $m_S = m_R$, stejný počet závitů $N_S = N_R$ i stejný činitel vinutí $k_{vR} = k_{vS}$ jako statorové vinutí
- Přepočet nesmí ovlivnit úhly mezi fázory na straně statoru
- Nesmí se změnit energetické poměry stroje

Podmínky jsou splněny, jestliže se přepočtem nezmění magnetomotorické napětí, které vyvolá indukční magnetický tok Φ . Transformační rovnice pro přepočet mají následující tvar[2]:

$$\begin{aligned} k_U &= \frac{k_{vS} \cdot N_S}{k_{vR} \cdot N_R} = \frac{U_S}{U_R} \\ k_I &= \frac{m_R \cdot k_{vR} \cdot N_R}{m_S \cdot k_{vS} \cdot N_S} \\ k_Z &= \frac{k_U}{k_I}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

kde k_U je přepočítávací konstanta napětí, k_I je přepočítávací konstanta proudu a k_Z je přepočítávací konstanta impedance a činných odporů. Protože platí $m_S = m_R$, pak $k_I = \frac{1}{k_U}$ a $k_Z = k_U^2$. Přepočtené veličiny budou označovány s indexem „'“. Pro přepočet rotorových parametrů na stator platí:

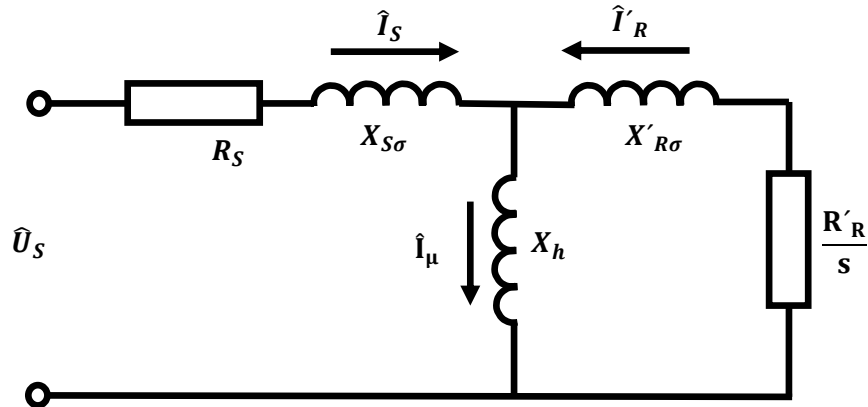
$$\begin{aligned} U'_{iS} &= U'_R = U_R \cdot k_U = U_R \cdot \frac{k_{vS} \cdot N_S}{k_{vR} \cdot N_R} \\ I'_R &= I_R \cdot k_I = I_R \cdot \frac{m_R \cdot k_{vR} \cdot N_R}{m_S \cdot k_{vS} \cdot N_S} \\ R'_R &= R_R \cdot \frac{m_S}{m_R} \cdot k_U^2 = R_R \cdot \frac{m_S}{m_R} \left(\frac{k_{vS} \cdot N_S}{k_{vR} \cdot N_R} \right)^2 \\ X'_R &= X_R \cdot \frac{m_S}{m_R} \cdot k_U^2 = X_R \cdot \frac{m_S}{m_R} \left(\frac{k_{vS} \cdot N_S}{k_{vR} \cdot N_R} \right)^2. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Po zavedení přepočítaných parametrů rotoru lze pro napěťové rovnice statoru a rotoru psát:

$$\begin{aligned} \hat{U}_S &= R_S \cdot \hat{I}_S + j \cdot X_{S\sigma} \cdot \hat{I}_S + \hat{U}_{iS} \\ \hat{U}'_{iR} &= \frac{R'_R}{s} \cdot \hat{I}'_R + j \cdot X'_{R\sigma} \cdot \hat{I}'_R. \end{aligned} \quad (2.11)$$

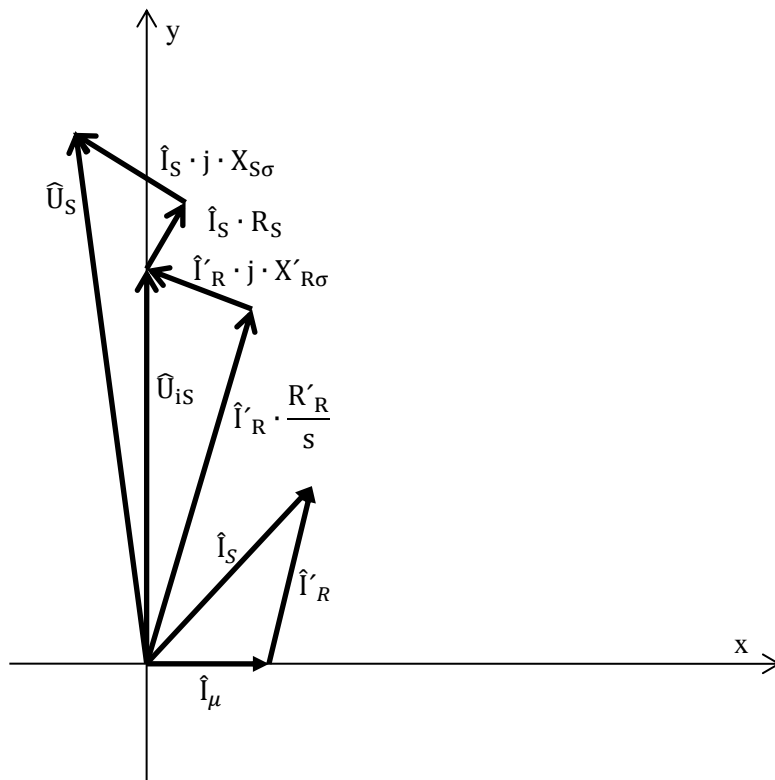
Detailní odvození náhradního schématu je popsáno v [4] dle matematického modelu asynchronního stroje.

Dle výše zmíněných rovnic lze sestavit náhradní schéma ve tvaru π -čláčku. Ztráty v železe se často pro asynchronní stroj zanedbávají. Kde R_S a R'_R jsou odpory statorového a rotorového vinutí, $X_{S\sigma}$ a $X'_{R\sigma}$ jsou rozptylové indukčnosti statoru a rotoru, X_h označuje hlavní (magnetizační) reaktanci. Rotorové veličiny jsou označeny s indexem „‘“, protože musí být přepočteny na stator.



Obr. 2.3 Náhradní schéma asynchronního motoru

Pro náhradní schéma vyobrazeného na obr 2.3 je níže nakreslen fázorový diagram (obr 1.4). Většinou se volí poloha fázoru magnetizačního proudu \hat{I}_μ souběžně s osou x, fázor indukovaného napětí statoru \hat{U}_{iS} pak musí ležet na imaginární ose y.



Obr. 2.4 Vektorový diagram asynchronního stroje

3. Vinutí točivých elektrických strojů

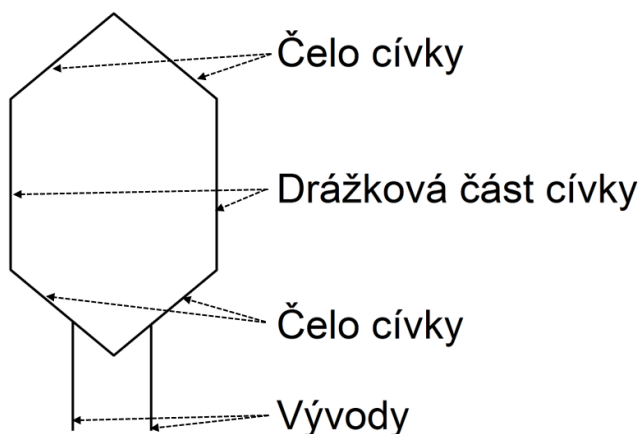
Vinutí elektrických strojů mají za úkol vytvářet elektromotorické napětí a budit potřebný magnetický tok ve stroji tak, aby byla zajištěna přeměna energie. Magnetická pole statoru a rotoru spolu navzájem interagují a vytváří elektromagnetický točivý moment stroje, čímž je zajištěna přeměna elektrické energie na mechanickou. U asynchronních strojů jsou drážky statoru a rotoru rovnoměrně rozloženy podél vzduchové mezery, přičemž rozměr a počet drážek se musí volit tak, aby nedocházelo k magnetickému přesycení zubů.[5].

Statorové vinutí musí být prostorově rozmístěno tak, aby udržovalo rovnoměrnou a stálou magnetickou indukci ve vzduchové mezeře stroje s ideálně sinusovým průběhem a minimálním obsahem vyšších harmonických kmitočtů. Pro různá provedení a velikost stroje se magnetická indukce v mezeře pohybuje v rozmezí 0,6 až 0,8 T. Přitom nesmí být překročena maximální indukce v magnetickém obvodu stroje daná typem použitého magnetického materiálu.

Ztráty ve vinutí stroje se podstatnou měrou podílejí na účinnosti motoru, a proto musí být co možno nejmenší. Protože průměr vodiče nelze libovolně zvětšovat, je nutné minimalizovat délku vodičů, zejména délku neaktivních částí (čel) vinutí.

3.1 Základní pojmy v teorii vinutí

Vodiče statorového vinutí (cívky) vyrobené z elektrovodné mědi s povrchovou lakovou (smaltovou) izolací jsou uloženy izolovaných drážkách statoru. Každá cívka má dvě drážkové části a dvě čela (viz obr. 3.1), která jsou vedena mimo magnetický obvod stroje.



Obr. 3.1 Znáornění cívky

Části cívky, uložené v drážkách magnetického obvodu, jsou aktivními částmi, protože se podílí na buzení magnetického toku ve stroji. Oproti tomu čela vinutí jen zvyšují ztráty ve vinutí, na buzení motoru se nepodílejí a jejich délku je třeba minimalizovat.

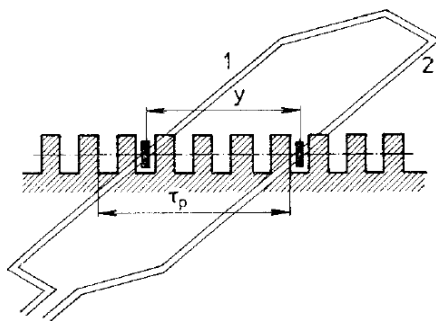
Aktivní části uložené v samostatných drážkách mají přední a zadní stranu. Počet závitů vinutí musí být vždy celočíselně dělitelný dvěma tak, aby cívka byla započata i zakončena na stejné straně. Cívky bývají zapojeny obvykle sériově, u speciálních typů vinutí mohou být cívky zapojeny i paralelně [5]. Propojením cívek vzniká tzv. cívková skupina.

Počtem pólů stroje, označovaného $2p$, se rozumí počet magnetických pólů ve stroji. Počet pólových dvojic se označuje p . Pojem pólové rozteče τ_p udává obvodovou vzdálenost dvou sousedních pólů stroje. Pólová rozteč je vždy rovna 180° elektrickým stupňům, alternativně může

být taky udávána pomocí počtu drážek, které se mezi sousedními póly nacházejí. Musí platit, že podíl celkového počtu drážek statoru Q_S a počtu pólů $2p$, je roven pólové rozteči, tedy:

$$\tau_p = \frac{Q_S}{2p} \quad (3.1)$$

Cívkový krok y udává počet drážek mezi aktivními cívkovými stranami cívky. Pokud má cívka krok rovný pólové rozteči, jedná se o cívku s plným krokem. Pokud má cívka krok menší než pólová rozteč, jedná se o cívku se zkráceným krokem. Cívka o jednom závitě se zkráceným krokem je znázorněna na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Cívka o jednom závitě se zkráceným krokem (převzato z [5])

Vhodným zkrácením cívkového kroku lze dosáhnout lepšího tvaru magnetického pole stroje.

Konvenčně vinuté stroje využívají otevřené drážky, do kterých se vinutí tzv. vsypává při ručním navíjení, nebo vtahuje při strojovém navíjení. Elektromagnetické požadavky však vyžadují co nejmenší otevření drážek. Asynchronní motory se vyrábějí ve velkých sériích, vinutí je možné navíjet na speciálních strojích a je následně do statorových paketů vkládat automaticky. Takto vinuté stroje dosahují ovšem poměrně špatný činitel plnění drážky, který je definován[6]:

$$k_{ptn} = \frac{\text{celkový průřez mědi}}{\text{průřez drážky}} \quad (3.2)$$

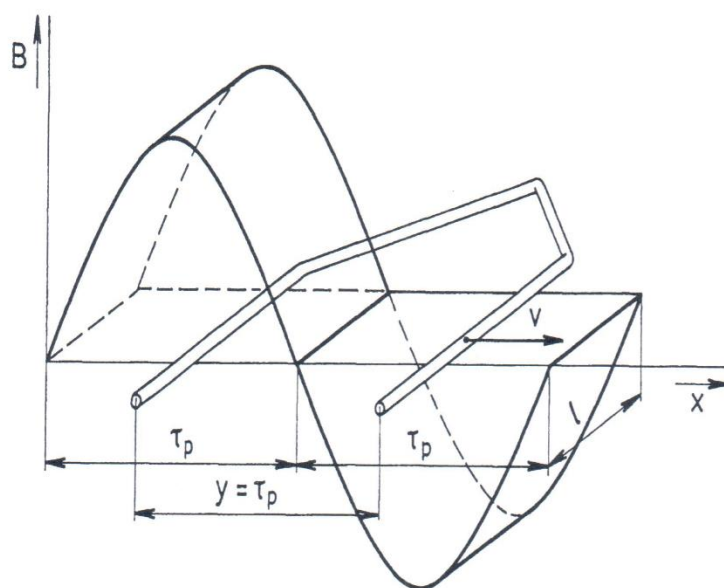
3.2 Vícefázové konvenční vinutí

U ideálního stroje na střídavý elektrický proud je radiální složka magnetické indukce podél obvodu vzduchové mezery rozložena sinusově. U reálných strojů je však průběh deformován vlivem drážkování stroje a vlivem vyšších prostorových harmonických. Reálné průběhy magnetické indukce ve vzduchové mezeře lze nalézt v [7].

Pro objasnění problematiky předpokládejme ideální stroj se sinusovým rozložením radiální složky magnetické indukce podél vzduchové mezery. S tímto předpokladem lze magnetickou indukci v místě x podél vzduchové mezery vyjádřit vztahem[5]:

$$B_{(x)} = B_{max} \cdot \sin\left(\frac{x}{\tau_p} \cdot \pi\right) \quad (3.3)$$

Dále předpokládejme, že závit o délce l , jehož cívkový krok je shodný s pólovou roztečí $y = \tau_p$, se pohybuje ve směru osy x stálou rychlostí v ve výše zmíněném sinusovém magnetickém poli (viz. obr. 3.3).



Obr. 3.3 Závít v sinusovém magnetickém poli (převzato z [1])

Elektromotorické napětí u_z indukovaného v závitu je dáno rozdílem elektromotorických napětí v každém z vodičů, protože každý z vodičů se nachází pod opačnou polaritou magnetického indukce. Platí tedy:

$$u_z = u_1 - u_2 = B_{max} \cdot l \cdot v \cdot \left[\sin\left(\frac{x}{\tau_p} \cdot \pi\right) - \sin\left(\frac{x}{\tau_p} \cdot \pi + \pi\right) \right], \quad (3.4)$$

kde l je délka aktivního vodiče a v je rychlost, kterou se cívka v magnetickém poli pohybuje.

Závít se za čas t posune o vzdálenost x , za periodu T se posune právě o dvě pólové rozteče, pak lze psát:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{2 \cdot \tau_p \cdot p}{T \cdot p} = 2 \cdot \tau_p \cdot f, \quad (3.5)$$

kde f je kmitočet magnetického pole podél vzduchové mezery. Pro úhlovou rychlost magnetického pole platí:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f. \quad (3.6)$$

Pro magnetický tok jedné pólové rozteče platí:

$$\Phi = \frac{\pi}{2} \cdot B_{max} \cdot l \cdot \tau_p. \quad (3.7)$$

Rovnici 2.4 lze pak upravit na tvar[1]:

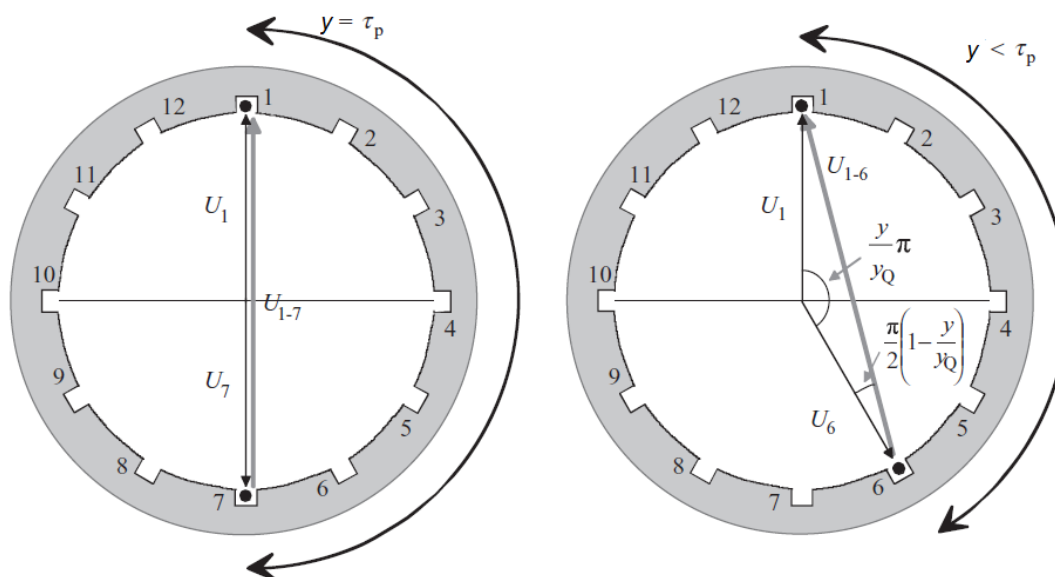
$$\begin{aligned} u_z &= B_{max} \cdot l \cdot v \cdot (\sin \omega \cdot t - \sin(\omega \cdot t + \pi)) = 2 \cdot B_{max} \cdot l \cdot v \cdot \sin \omega \cdot t \\ &= 2 \cdot \pi \cdot \Phi \cdot f \cdot \sin \omega \cdot t, \end{aligned} \quad (3.8)$$

kde Φ je magnetický tok. Uvažujeme-li cívku s N závitů, bude pro indukované napětí cívky u_i platit:

$$u_i = 2 \cdot \pi \cdot \Phi \cdot f \cdot N \cdot \sin \omega \cdot t. \quad (3.9)$$

Nahradíme-li indukované napětí fázorem \widehat{U}_i , platí pro jeho efektivní hodnotu:

$$\widehat{U}_i = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot \Phi \cdot f \cdot N = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N. \quad (3.10)$$



Obr. 3.4 Znárodnění činitele kroku vinutí pro zkrácený krok cívky (převzato z[8])

Pokud cívka nemá plný krok, tedy $y < \tau_p$, nemohou se napětí indukovaná ve vodičích aritmeticky odečíst. Indukované napětí je dáno geometrickým rozdílem indukovaných napětí (viz obr3.4) dle vztahu:

$$\widehat{U}_i = \widehat{U}_1 - \widehat{U}_2 = 2 \cdot \widehat{U} \cdot \sin \frac{x}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2} = 2 \cdot \widehat{U} \cdot k_y, \quad (3.11)$$

kde:

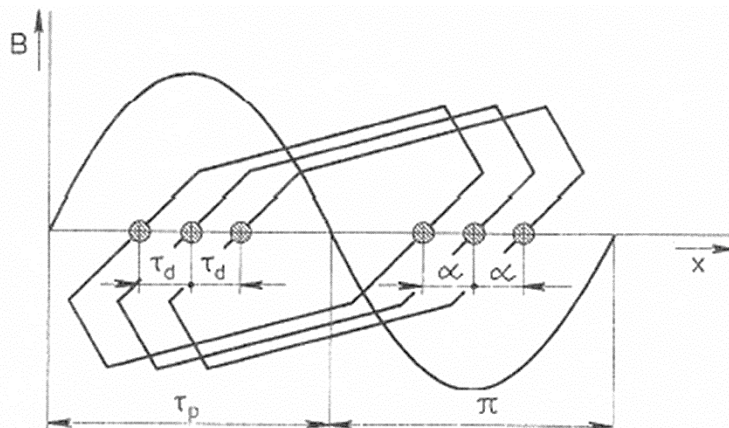
$$k_y = \sin \left(\frac{x}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.12)$$

je činitel kroku, pokud je $y = \tau_p$ tak $k_y = 1$.

Ve skutečnosti, zejména vlivem drážkování, magnetické pole podél vzduchové mezery nemá nikdy ideální sinusový průběh a obsahuje vyšší prostorové harmonické. Pro harmonickou v -tého řádu pro činitel kroku platí:

$$k_{yv} = \sin v \cdot \left(\frac{x}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2} \right). \quad (3.13)$$

Uvažujeme-li, že se v sinusovém magnetickém poli pohybuje více stejných cívek spojených do série, budou se do aktivních částí cívek indukovat napětí o stejné velikosti, avšak časově posunutá o úhel α . Fáze posunu napětí α je dána drážkovou roztečí τ_d (tedy vzdáleností sousedních drážek), čemuž odpovídá i prostorový úhel natočení drážek α (viz obr.3.3)

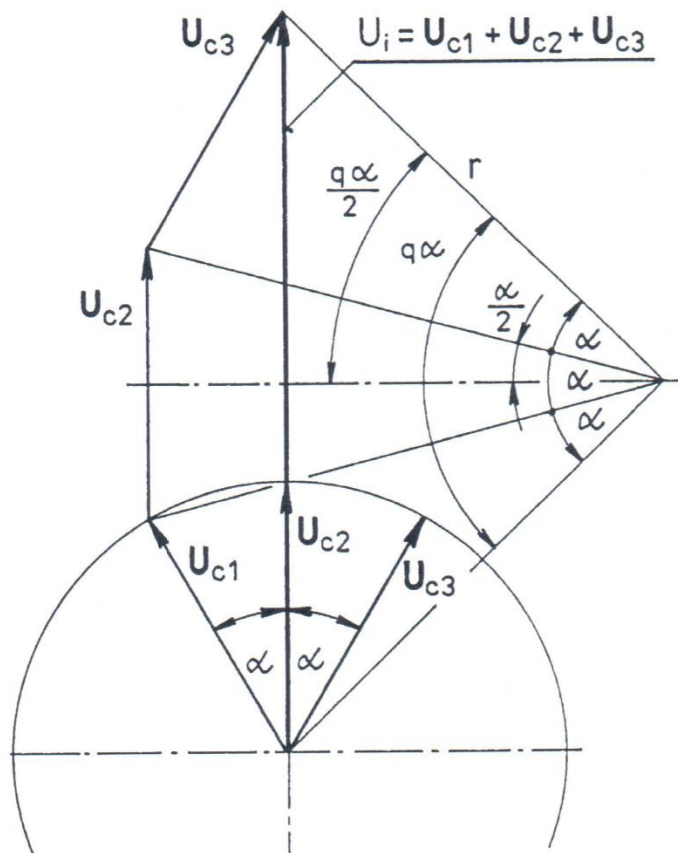


Obr. 3.5 Vinutí uložené do tří sousedních drážek (převzato z [1])

Pro další úvahy zavedeme pojem počet drážek na pól a fázi q pro m -fázové vinutí vztahem:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} \quad (3.14)$$

Vinutí se ve většině případů navrhuje tak, aby fázory indukovaného napětí vytvořily tzv. symetrický vějíř. (viz 3.6) [5], čehož lze dosáhnout posunem fázorů napětí jednotlivých cívek o stejný úhel α .



Obr. 3.6 Fázorový diagram výpočtu činitele rozlohy (převzato z [1])

Celkové indukované napětí jedné fáze je dáno geometrickým součtem indukovaných napětí jednotlivých cívek. Časový posun jednotlivých fázorů cívek vlivem uložení do několika drážek způsobí, že výsledné indukované napětí bude menší v poměru geometrického a aritmetického součtu napětí jednotlivých cívek. Tento fakt vyjadřuje tzv. činitel rozlohy k_r :

$$k_r = \frac{\text{geometrický součet induk. napětí}}{\text{aritmetický součet induk. napětí}} = \frac{\sin q \cdot \frac{\alpha}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (3.15)$$

Pro harmonickou v -tého řádu pro činitel rozlohy analogicky platí:

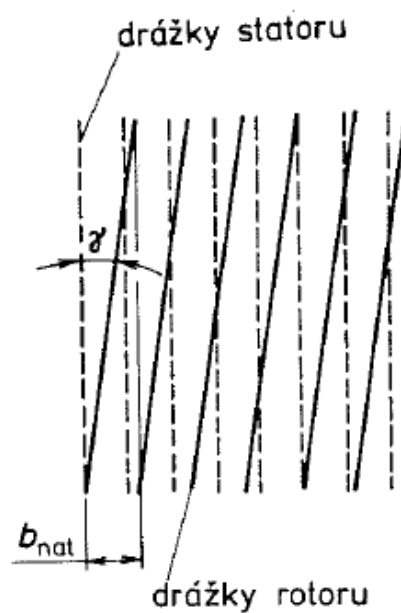
$$k_{rv} = \frac{\sin v \cdot q \cdot \frac{\alpha}{2}}{q \cdot \sin v \cdot \frac{\alpha}{2}}. \quad (3.16)$$

Pokud jsou však fázory jednotlivých napětí cívek nesymetrické, nelze použít obecný zápis výše uvedeného vzorce s podílem funkcí sinus. Je nutné stanovit aritmetických a geometrických součtů napětí a jejich podílem pak získat činitel rozlohy.

Součinem činitele zkrácení kroku a činitele rozlohy dostáváme tzv. činitel vinutí k_v . Obecně lze pro efektivní hodnotu fázoru celkového indukovaného napětí jedné fáze psát:

$$\hat{U}_l = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N \cdot k_v. \quad (3.17)$$

U rotorových klecových vinutí asynchronních motorů se s výhodou používá natočení drážek. Osa drážky, ve které je uloženo vinutí, není rovnoběžná s osou hřídele (viz. obr. 3.7).



Obr. 3.7 Natočení rotorové drážky (převzato z [9])

Při natočení drážky se indukované napětí v cívce snižuje. Je-li úhel mezi vstupem a výstupem drážky γ , můžeme definovat tzv. činitel natočení drážek:

$$k_\gamma = \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}}. \quad (3.18)$$

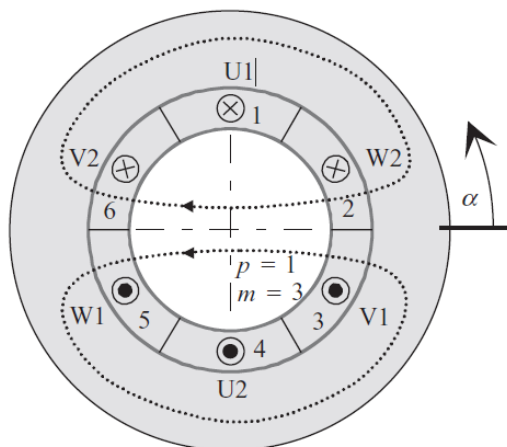
V praxi se často úhel natočení drážky udává jako část drážkové rozteče, o kterou je pootočena osa drážky. Zpravidla se drážka natáčí o jednu drážkovou rozteč rotoru. Pro takové natočení je úhel γ pro první harmonickou velmi malý. Činitel natočení drážky k_γ je velmi blízký jedné a z tohoto důvodu se při výpočtu činitele vinutí zanedbává [9]. Pro vyšší harmonické, včetně těch, které vznikají vlivem drážkování statoru, roste úhel γ s řádem harmonické. Pro vyšší harmonické je tedy činitel natočení drážky menší než jež jedna, čímž se snižuje jejich vliv na chování stroje. Natočení drážky má příznivý vliv na hluk motoru. Stroje se sníženou hladinou hluku se proto vyrábějí s natočenými drážkami.

3.3 Třífázové konvenční statorové vinutí

Prvním požadavkem při návrhu asynchronního motoru je optimalizace průběhu magnetického pole ve vzduchové mezeře. Magnetický tok ve vzduchové mezeře by měl být rovnoměrně rozložený, sinusový s minimálním obsahem vyšších prostorových harmonických kmitočtů. Letitý vývoj dospěl k mnoha sofistikovaným způsobům rozložení vinutí po obvodu statoru volbou různého počtu drážek na pól a fázi stroje, zkráceného kroku vinutí nebo provedení vinutí (např. vinutí rozložené, soustředné, vícevrstvé atd.).

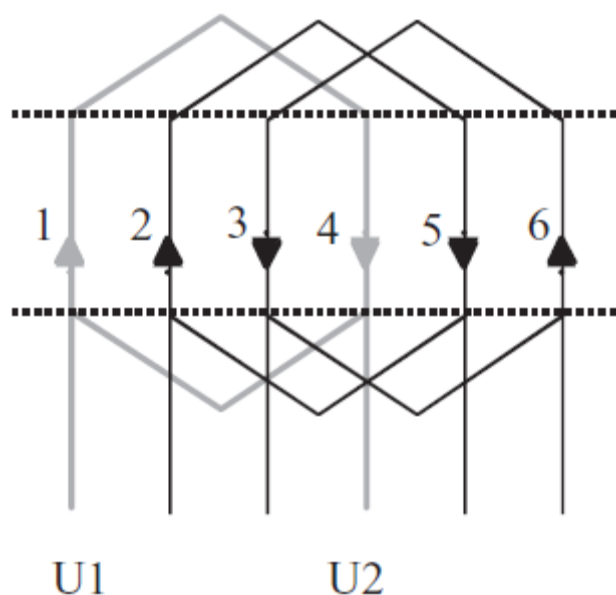
Druhým požadavkem, vzhledem na účinnost motoru, je minimalizace ohmického odpor statorového a rotorového vinutí. Toho lze dosáhnout tím, že neaktivní části vinutí (tzv. čela vinutí) budou navržena s minimální délkou.

Vinutí konvenčních třífázových elektrických strojů je obvykle rozloženo do statorových drážek tak, aby vytvářelo magnetické pole ve vzduchové mezeře co nejvíce podobné sinusovému průběhu. Pro vytvoření kruhového točivého magnetického pole jsou zapotřebí minimálně tři fáze. Nejjednodušší třífázové vinutí o třech cívkách, které jsou uloženy v šesti drážkách ($Q = 6$), a s plným krokem ($\gamma = \tau_p$), je zobrazeno na obr.3.8.



Obr. 3.8 Trojfázové vinutí s 6 drážkami (převzato z [8])

Siločáry magnetického toku jsou znázorněny tečkovanou čarou. Je zřejmé, že se jedná o stroj s jedním pólpárem ($p = 1$). Vinutí takového stroje by mohlo být provedeno dle schématu na obr. 3.9.

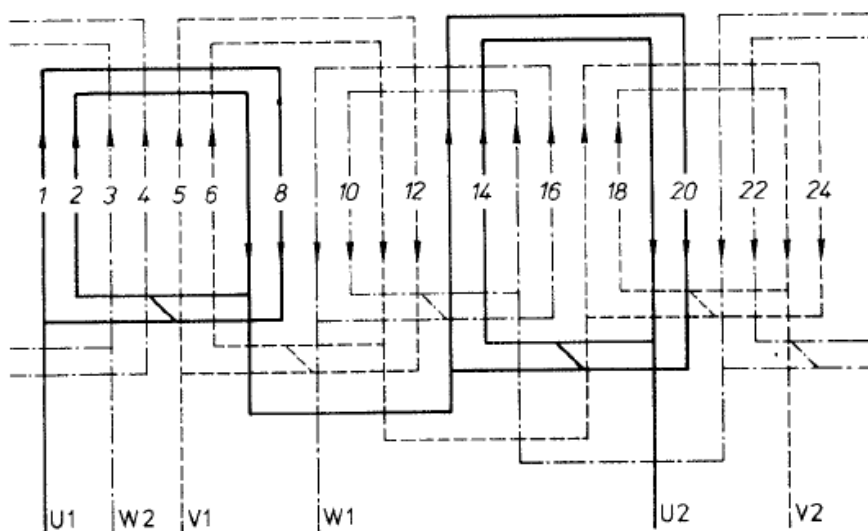


Obr. 3.9 Provedení trojfázového vinutí pro 6 drážek (převzato z [8])

Takovéto vinutí má zásadní nevýhodu v tom, že vytváří magnetomotorické napětí o vysokém obsahu vyšších prostorových harmonických. Z tohoto důvodu se používají vinutí, která mají více než jednu drážku na pól a fázi, tedy $q > 1$.

3.3.1 Jednovrstvé vinutí

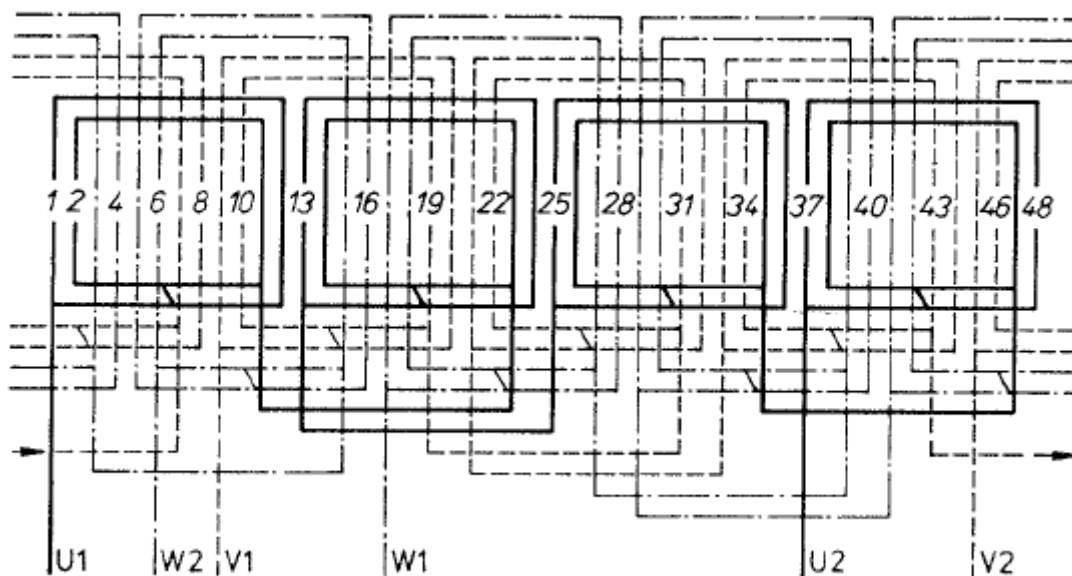
Leží-li v drážce pouze jedna strana jedné cívky, jedná se o jednovrstvé vinutí. Různé typy jednovrstvého vinutí se liší především dle tvaru čel. Jedna možná varianta provedení čel je tzv. soustředné vinutí je vyobrazené na obr. 3.10.



Obr. 3.10 Jednovrstvé soustředné vinutí s $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [9])

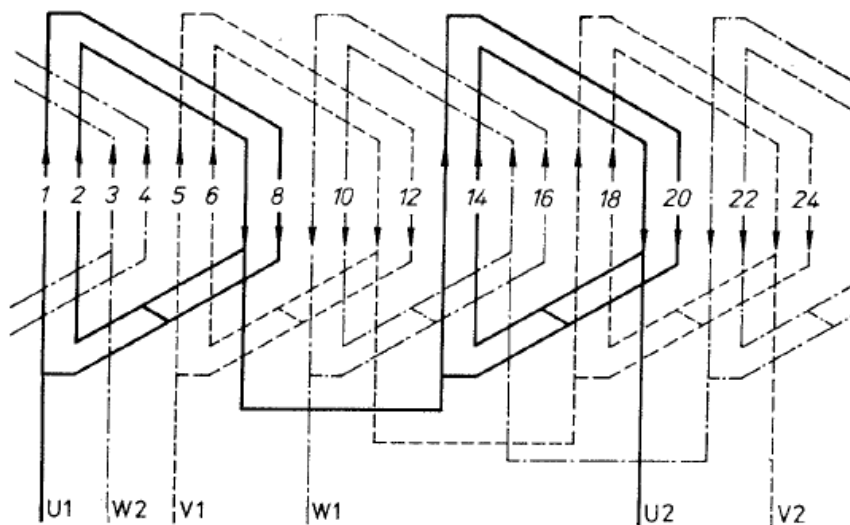
Toto vinutí je charakterizováno tím, že jedna cívka leží uvnitř druhé, tedy cívky jsou soustředné. Cívky se liší délkou i šířkou v sousedních skupinách, vznikají tak skupiny „malých“ a „velkých“ cívek. Čela vinutí jsou uložena ve dvou patrech, toto vinutí se proto označuje jako dvoupatrové.

Třípatrové uspořádání vinutí se používá při sudém počtu drážek na pól a fázi. V takovém případě je nutné změnit směr ohybu čel poloviny cívek v každé cívkové skupině. Takové vinutí je vyobrazeno na obr. 3.11. Počet cívkových skupin tohoto vinutí je roven počtu pólů stroje, hovoříme o tzv. pólových cívkových skupinách. Každé fázi je přiřazeno jedno patro vinutí a z tohoto důvodu je vinutí nesymetrické. Nesymetrie může být snížena uložení cívek tak, že cívka „velké“ cívkové skupiny je na opačné straně uložena do drážky příslušící „malé“ cívkové skupině a naopak.

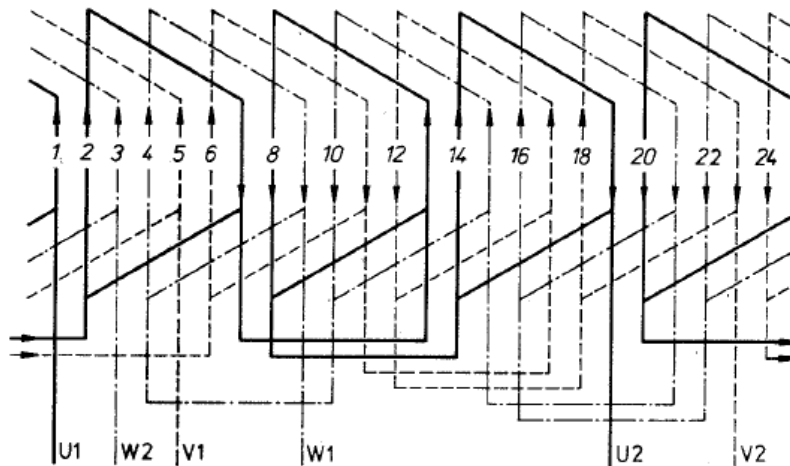


Obr. 3.11 Jednovrstvé soustředné vinutí s čely uloženými ve třech patrech s $Q=48$ a $2p=4$ (převzato z [9])

Vinutí zobrazené na obr 3.10 lze provést i jiným způsobem. Takové uspořádání je patrné z obr 3.12, kvůli tvaru použitých cívek se označuje jako vinutí lichoběžníkové. Vinutí se navzájem liší pouze tvarem čel cívek, cívkové skupiny a jejich spojení se nemění. Lichoběžníkové vinutí lze navinout i pro stroje s lichým počtem pólových dvojic, přičemž vinutí zůstává zcela symetrické. Pro sudý počet drážek na pól a fázi je opět možné zkonstruovat vinutí s pólovými cívkovými skupinami. Takové vinutí je vyobrazeno na obr 3.13.

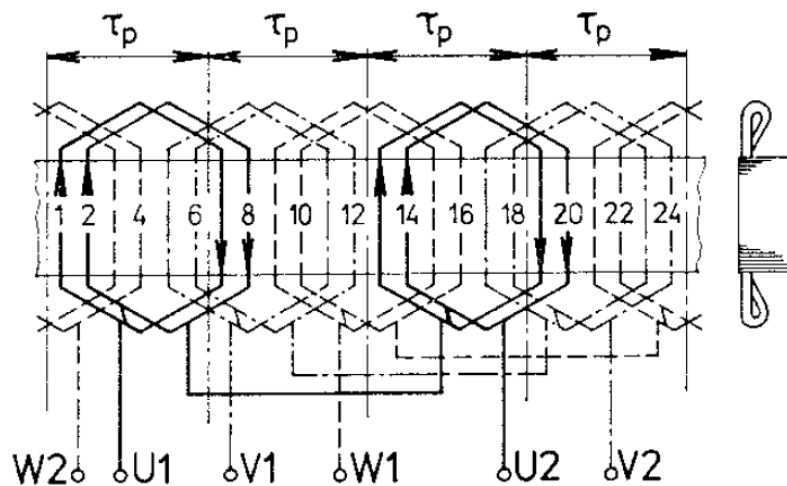


Obr. 3.12 Jednovrstvé soustředné vinutí s lichoběžníkovými pól párovými cívkami pro $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [9])



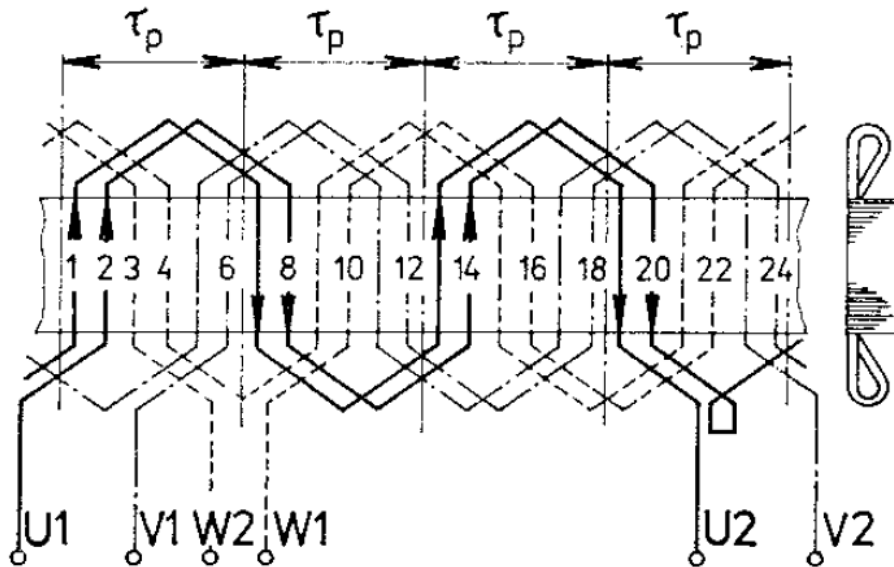
Obr. 3.13 Jednovrstvé soustředné vinutí s lichoběžníkovými pólovými cívkovými skupinami pro $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [9])

Výše zmíněná vinutí vždy používala odlišné cívky v jedné cívkové skupině, lze však sestavit i vinutí, které používá cívky stejných tvarů. Takové vinutí je zobrazeno na obr. 2.14 a kvůli tvaru cívek se označuje jako smyčkové vinutí.



Obr. 3.14 Jednovrstvé smyčkové vinutí s cívkami stejného tvaru s plným krokem $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [5])

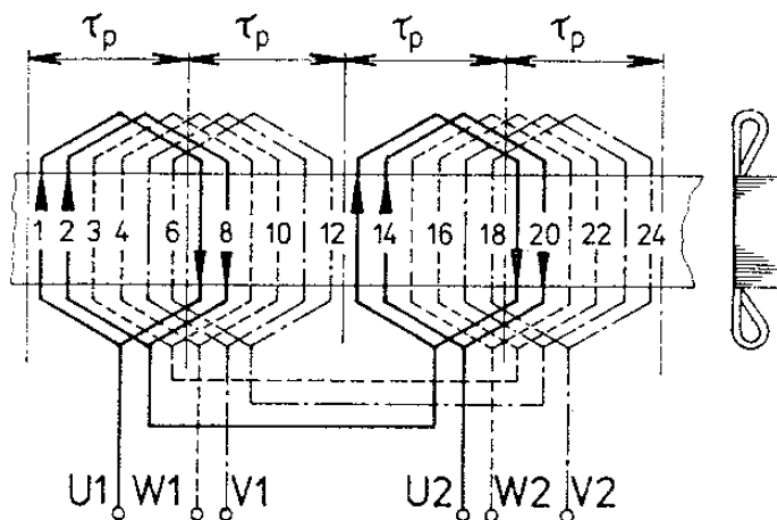
Další možností konstrukce vinutí je tzv. vlnové provedení vyobrazené na obr 3.15. Toto vinutí má menší spotřebu drátu na spojky mezi cívkovými skupinami. Vlnové vinutí se používá u stejnosměrných strojů.



Obr. 3.15 Jednovrstvé vlnové vinutí s $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [5])

Výše probraná schémata vinutí se používají především pro stroje o malých výkonech. Činitel vinutí je v těchto případech vždy roven činiteli rozlohy, a to i v případě, kdy se cívkový krok zkracuje.

V praxi je nutné občas statorový paket, a tím pádem i vinutí, rozdělit na dvě části. Pro tento případ musí být vinutí navrženo tak, aby se cívky při montáži či demontáži obou částí statoru spojovaly či rozpojovaly pouze ve spojkách mezi skupinami vinutí. Příklad takového vinutí je na obr 3.16.



Obr. 3.16 Jednovrstvé vinutí smyčkové vinutí stejného kroku pro dělený stator s $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [5])

3.3.2 Dvouvrstvé vinutí

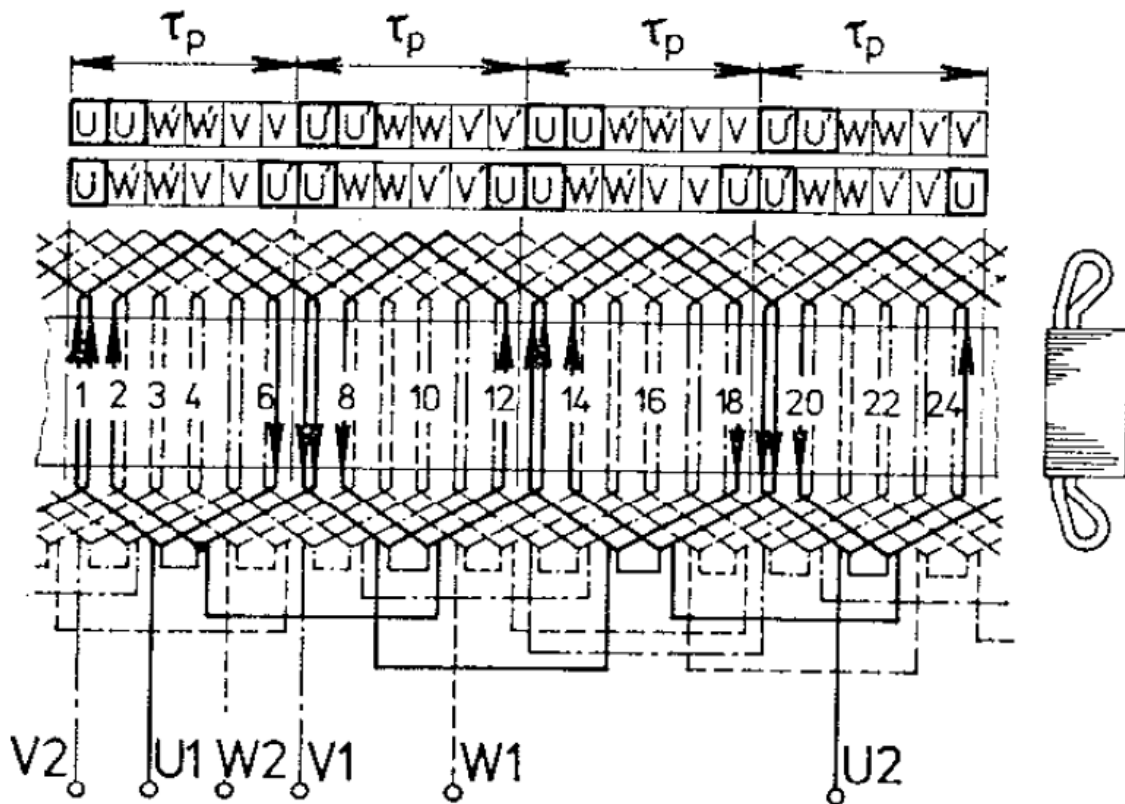
Leží-li v drážce dvě aktivní strany cívek, jedná se o dvouvrstvé vinutí. V jedné drážce jsou uloženy jak horní, tak dolní aktivní strany cívek. Dvouvrstvé vinutí se používá pro stroje o vyšších výkonech a u strojů přesahující výkon 15kW se dvouvrstvé vinutí používá téměř ve všech strojích [9]. Přednost dvouvrstvého vinutí tkví především v možnosti vhodně zkrátit krok cívky a tím

dosáhnout menšího obsahu vyšších harmonických. Vhodným zkrácením kroku cívky se dá dosáhnout téměř nulového činitele kroku pro 5. a 7. harmonickou. Harmonické nižších řádů se podílí větší měrou na chování stroje, proto by se mělo při návrhu stroje dbát právě na 5. a 7. harmonickou, které snižují účinnost stroje nejvíce. Zkrácením kroku cívky se také zkrátí délka čel, čímž klesne spotřeba materiálu potřebného pro navinutí čel[5].

Pro dvouvrstvá vinutí se používají cívky stejného tvaru (smyčkové či vlnové), což přináší řadu výhod jak při samotné výrobě vinutí, tak i z hlediska práce stroje, kdy je zachována celková symetrie všech fází i paralelních větví vinutí. Dvouvrstvá vinutí mají však také řadu nevýhod, mezi ty nejzásadnější patří především (dle [5]):

- Složitě zakládání do drážek (v drážce jsou dvě strany cívek)
- Složitější oprava cívek, zvláště při opravách vinutí uloženého v dolní vrstvě drážky
- Není možné provést dělení stator (pouze s demontáží vinutí v místech dělení)

Příklad dvouvrstvého vinutí s krokem zkráceným o jednu drážkovou rozteč statoru je patrný z obr. 3.17.



Obr. 3.17 Dvouvrstvé smyčkové vinutí se zkráceným krokem o jednu drážkovou rozteč statoru (převzato z [5])

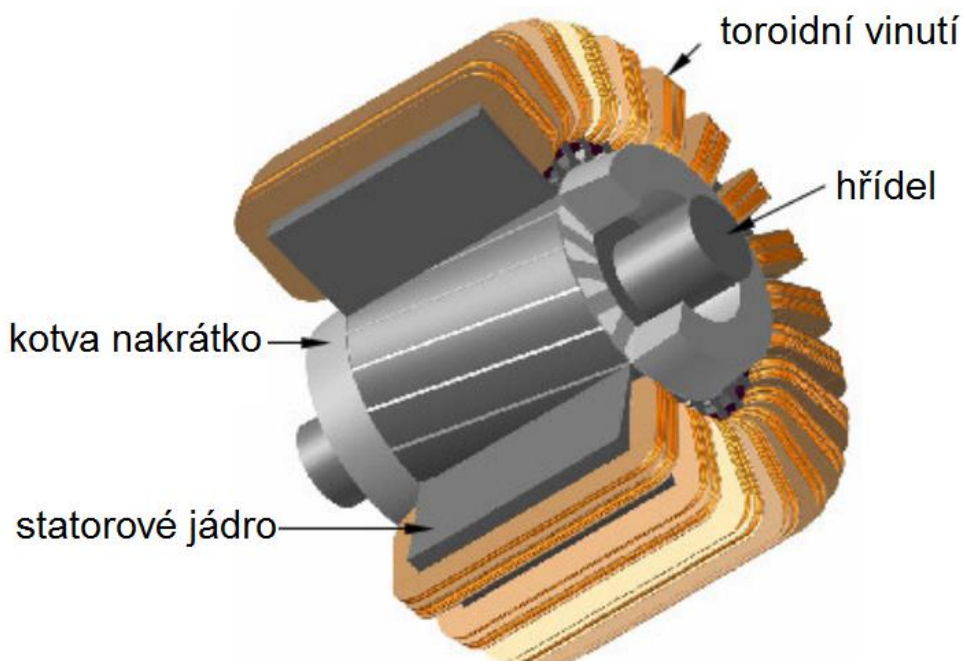
V horní části obr.3.17 je znázorněno rozložení vodičů různých fází do horní a spodní vrstvy. Je patrné, že horní vrstva je vzhledem k dolní vrstvě posunutá vlivem zkrácení kroku cívky. Dvouvrstvé vinutí se zkráceným krokem se tím pádem podobají svými elektromagnetickými vlastnostmi dvěma vinutím vzájemně posunutých o $Q - y$ (počet drážek - cívkový krok) [5].

3.4 Toroidně vinutý asynchronní motor

Ve své diplomové práci se zabývám porovnáním toroidně navinutého stroje s konvenčně vinutým strojem. Myšlenka toroidně vinutého asynchronního motoru není nová. Patent z roku 1968 podaného G. Caficim [10] tvrdí, že asynchronní motory s toroidním vinutím mohou být zkonstruovány s podstatně menšími čely vinutí, a tedy s menšími ztrátami ve vinutí. Toto uspořádání dává předpoklad také ke zmenšení celkové délky motoru. Zkrácení osové délky motoru se stává výhodou ve specifických případech, například u trakčních motorů určených k umístění do nábojů kol, kde je právě celková délka motoru limitujícím faktorem.

Elektromechanický moment vyvíjený elektrickým motorem je závislý na elektrickém a magnetickém zatížení. Elektrické zatížení je limitováno tepelným namáháním stroje, limitujícím faktorem je tedy maximální proud, který může po určitou dobu procházet vinutím statoru, aniž by došlo k poškození izolace. Magnetické zatížení je omezeno schopností přenášet vzduchovou mezerou magnetickou energii, obvyklé hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře motoru jsou mezi 0,6-0,9T., Tyto dva faktory mají své limity a pokud chceme zvýšit vyvíjený mechanický moment motoru, je nutné zvýšit objem motoru. Pokud je pro danou aplikaci motoru limitujícím faktorem jeho délka, musí být zvětšen průměr motoru. Tím docílíme také vyššího mechanického momentu stroje. Pokud by bylo použito konvenční vinutí pro takovýto motor o malém počtu pólpárů, čela vinutí by pro tento stroj vycházela velmi dlouhá kvůli velkému průměru stroje. Pasivní délka vodičů v tomto případě může několikanásobně přesáhnout aktivní délku vodičů. To by vedlo k velkým ztrátám ve statorovém vinutí a tím pádem i snížení účinnosti stroje[11].

Čela vinutí mohou být podstatně zkrácena toroidním vinutím statoru. Oproti klasickému vinutí by se měla snížit též rozptylová reaktance motoru. Toroidně vinutý asynchronní motor by měl dosahovat vyšší účinnosti oproti stroji navinutého běžnými metodami. Toroidní vinutí je navinuto okolo magnetického obvodu stroje. Aktivní strany vinutí cívek jsou uloženy jak po vnějším obvodu, tak po vnitřním obvodu ve drážkách statoru. Provedení toroidního vinutí je znázorněno na obr 3.18.



Obr. 3.18 Toroidní vinutí asynchronního stroje s kotvou nakrátko (převzato z [12])

Na rozdíl od klasického vinutí je v drážce statorových plechů uložena pouze jedna (vnitřní) strana cívky, a proto je nutné do série s touto cívkou zapojit druhou tj. párovou cívkou, která je uložena do drážky posunutá o pólou rozteč stroje. Orientace proudů v sériově zapojených cívkách (či cívkových skupinách) musí být opačná, aby vznikl potřebný magnetický tok procházející rotorem. Pro dvoupólový stroj je u konvenčního statorového vinutí zapotřebí nejméně jedna cívka pro jednu fázi (viz. obr. 3.8 a obr. 3.9), avšak u toroidně vinutého stroje jsou zapotřebí pro jednu fázi minimálně dvě cívky zapojené sériově.

Pokud má být zachováno indukované napětí jedné fáze, je nutné použít stejný počet závitů uložených v jedné drážce, jakým bylo navinuto konvenční vinutí. Při stejném počtu závitů v drážce může být celková délka vodiče použitá pro toroidní vinutí větší než u klasického vinutí, protože toroidní cívku je nutné vést i po vnějším obvodu stroje. Delší vodič znamená vyšší odpor vinutí. Toroidní vinutí se tak pro některé geometrie stroje stává nevýhodným. V porovnání s konvenčním vinutím se délka vodiče toroidního vinutí prodlužuje o část, která je vedena po vnějším obvodu statorových plechů, a zároveň se délka vodiče vinutí zkracuje vlivem kratších čel. Výhoda toroidního vinutí se tak projeví jen u geometrie stroje s kratší osovou délkou (nízkým statorovým paketem) v poměru k průměru rotoru.

4. Řešení okrajových úloh v elektromagnetickém poli

Při zkoumání vlastností reálného elektromagnetického zařízení se využívají více či méně zjednodušené modely. Při tvorbě modelu je třeba zobecnit reálný fyzikální systém tak, aby obsahoval veškeré podstatné vlastnosti, které zkoumaný systém ovlivňují a nelze je zanedbat. K danému fyzikálnímu systému je možné přiřadit více matematických modelů, které se liší svou složitostí, tudíž i přesností. Jednodušší matematické modely lze popsat spojitým analytickým modelem. Složitější modely se v dnešní době popisují diskretním matematickým modelem, který je vhodný pro numerické řešení počítači. Při numerickém řešení úloh je možné v modelu obsáhnout i složité struktury, mezi které patří například nelineární vlastnosti použitých materiálů či geometricky složitá složitost. Numerické modely se tak mohou více přiblížit fyzikální realitě daného systému [13].

Pro ověření správnosti výsledků simulace je vhodné tyto výsledky porovnat s důvěryhodnými údaji, například s výsledky měření na daném systému, porovnáním výsledků simulací podobných modelů či porovnání s empirickými hodnotami používanými v praxi. Jestliže vznikne nesouhlas mezi řešením a verifikačními údaji, je zapotřebí identifikovat chyby, které vedly k nesprávným výsledkům. Chyby výsledků mohou být zapříčiněny například přílišným zjednodušením či hrubou diskretizací spojitého systému (tj. malý počet prvků) [13].

4.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (dále jen MKP), (anglicky „Finite element method“ - FEM), je numerická metoda pro řešení matematických a technických problémů. MKP se například využívá vyšetřování proudění tepla, proudění tekutin, deformací těles a v neposlední řadě elektromagnetického potenciálu. Analytické řešení těchto problémů vyžaduje řešení parciálních diferenciálních rovnic v ohraničené definiční oblasti. Takovéto úlohy se nazývají okrajovými úlohami, MKP diakritizuje daný problém do řady jednodušších podproblémů popsaných algebraickými rovnicemi. Metoda konečných prvků využívá variační počet pro nalezení přibližného řešení úlohy, tak že minimalizuje chybu přidružených funkcí. Pomocí MKP lze řešit i poměrně složité úlohy, například řešení úloh s nelineárními, anizotropními či nehomogenními materiály [13],[14].

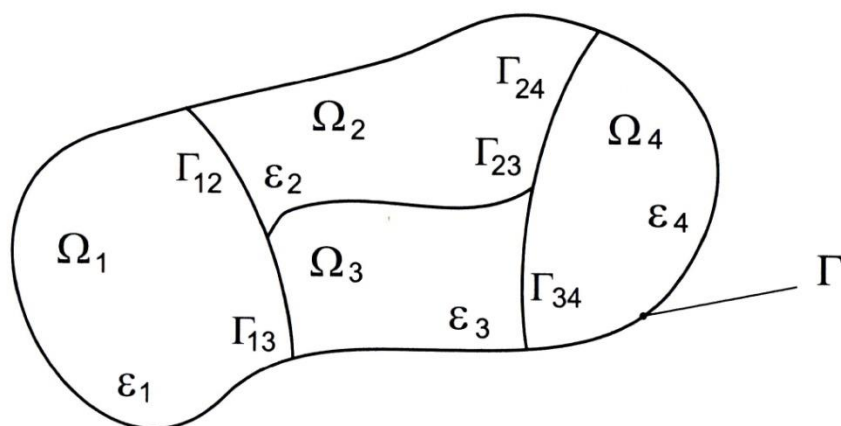
MKP byla poprvé použita rusko-kanadským inženýrem Alexandrem Hreinnikoffem a matematikem Richardem Courantem již v 40. letech 19. století. Postupem času byly objeveny další metody pro řešení složitých úloh, avšak jedno měli společné – rozdělení zkoumaného objektu do konečného počtu prvků, nazývané též elementy. Metoda konečných prvků byla například využita při výpočtech mechanického namáhání v programu Apollo v 50. letech minulého století. Svého rozmachu MKP dosáhla s rozvojem počítačové techniky a uvolnění prvního open-source software pro širokou veřejnost. Od té doby je MKP používána pro numerické modelování fyzikálních systémů v širokém spektru inženýrských oborů, které se dají i navzájem kombinovat. MKP lze tedy použít i pro řešení více druhů fyzikálních polí současně, v tomto případě hovoříme o tzv. sdružených problémech. Lze tak například řešit problémy elektromagneticko-tepelné při indukčním ohřevu materiálu [13].

4.2 Obecná formulace okrajové úlohy

Při řešení stacionárních modelů v elektromagnetickém poli se v předem definované geometrické oblasti (tzv. definiční oblast) určují skalární nebo vektorové potenciály. Vektorové potenciály jsou popsány parciálními diferenciálními rovnicemi, které mohou mít formu například Poissonovy či Laplaceovy rovnice. Pro jednoznačnost řešení je nutné definovat známé hodnoty derivací v definiční oblasti modelu. V praxi se za známé hodnoty potenciálů považují ty, které leží na okraji definiční oblasti, mluvíme o tzv. vymezení okrajových podmínek. Protože rovnice

potenciálů platí jen pro regulární body, je třeba definovat podmínky na rozhraní dvou prostředí (tzv. podmínky přechodu) [13].

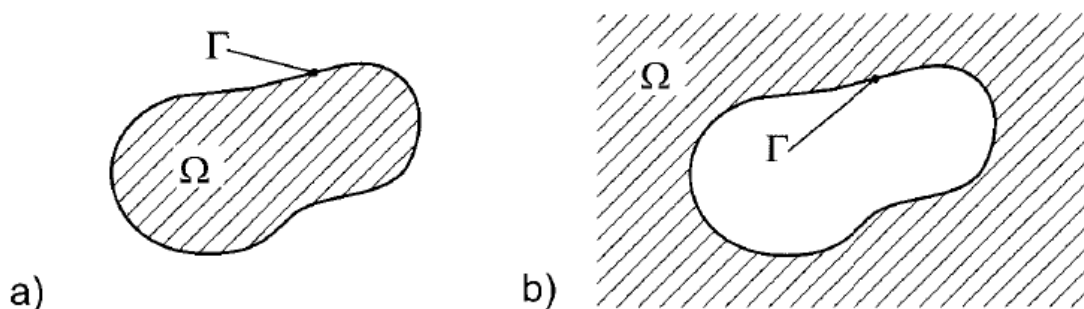
Pro názornost je uvedena problematika 2D okrajové elektromagnetické úlohy. Prostor vyšetřování, tzv. definiční oblast Ω , je dána jednak geometrií řešené úlohy, tak i z požadavku, kde chceme řešení nalézt. Necht' je definiční oblast Ω rozdělena na suboblasti Ω_i s odlišnými materiálovými vlastnostmi, pak musí platit $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \dots \cup \Omega_n$. Místo, kde se stýkají dvě prostředí (dvě domény s odlišnými materiálovými vlastnostmi) se nazývá rozhraní, značeného jako Γ_{ij} , přičemž $i \neq j$.



Obr. 4.1 Definiční oblast okrajové úlohy (převzato z [13])

Tvar definiční oblasti vyplývá z požadavku, kde chceme daný systém vyšetřovat. Z hlediska hranice Γ definiční oblasti Ω rozlišujeme, zda se jedná o hranici, která vnitřní okrajovou úlohu či vnější okrajovou úlohu. Pro vnější okrajovou úlohu platí, že

hranice Γ definiční oblasti Ω leží zcela nebo z části v nekonečnu (viz obr 4.2) [13].



Obr. 4.2 Obr. 3.2 a) vnitřní a b) vnější okrajová úloha (převzato z [13])

Prakticky má chování fyzikálně-technického systému vždy jen jediné řešení, to však neplatí pro matematický model, který s omezenou přesností jen imituje chování daného systému. Matematický model nemusí mít vlastnosti, které od něho očekáváme i přesto, že se zdá být popsán s dostatečnou přesností. Díky okrajovým podmínkám je možné z nekonečného počtu řešení vybrat jediné řešení, které odpovídá fyzikálnímu zjednodušení úlohy.

4.3 Princip MKP

Při vyšetřování problémů technického typu je zapotřebí najít hodnoty neznámých fyzikálních polí jako funkci prostorových souřadnic (x,y,z) . V případě proměnného pole je nutné nalézt hodnoty

neznámých nejen jako funkcí prostorových souřadnic, ale i funkcí času. Definiční oblast problému je často iregulární. Při prvním kroku MKP se definiční oblast rozdělí do několika podoblastí, které jsou již regulární. Hovoříme o tzv. diskretizaci definiční oblasti. Diskretizace definiční oblasti má podstatnou výhodu v tom, že nekonečný počet stupňů volnosti daného systému převádí na problém s konečným počtem stupňů volnosti [15].

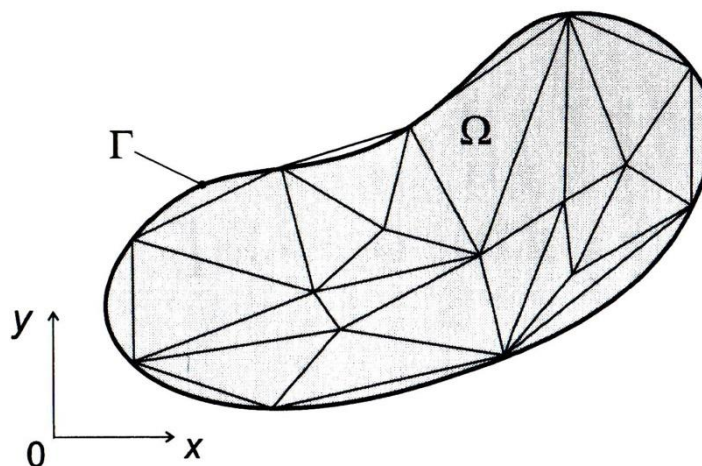
Rozdělení domény na konečný počet subdomén má několik výhod [16]:

- Reprezentace geometrie je dostatečně přesná
- Je možné zahrnout odlišné materiálové vlastnosti
- Jednoduchá reprezentace celkového řešení úlohy
- Chování je známé i v podoblastech systému

Diskretizace 2D definiční oblasti Ω provedeme tak, že tuto oblast aproximujeme elementy o zvoleném tvaru. Elementy mohou mít různý tvar, přičemž jejich tvar je také závislý na typu řešené úlohy. V praxi se nejčastěji používají elementy ve tvaru trojúhelníků, protože se tyto elementy dají dobře tvarově přizpůsobit. Diskretizace definiční oblasti trojúhelníkovou sítí je vyobrazena na obr 4.3, hovoříme o tzv. triangulaci. Pro realizaci triangulace musí pro libovolné dva trojúhelníky platit jeden z následujících případů:

- trojúhelníky nemají žádný společný bod
- trojúhelníky mají společnou jednu stranu
- trojúhelníky mají společný právě jeden vrchol

Při realizaci triangulace navíc musí platit, aby trojúhelník neprotínal rozhraní suboblastí s různými materiálovými vlastnostmi. Hrany trojúhelníků tudíž musí kopírovat jak tvar hranice Γ definiční oblasti Ω , tak i tvar rozhraní dvou prostředí Γ_{ij} .



Obr. 4.3 Triangulace oblasti Ω s okrajovou podmínkou Γ (převzato a upraveno z [13])

Diskretizační elementy, v tomto případě trojúhelníky, jsou spojovány v tzv. uzlových bodech. Pro dostatečně malý prvek, lze aproximovat rozložení potenciálu uvnitř trojúhelníku polynomem 1. stupně se znalostí souřadnic vrcholů (uzlových bodů) daného trojúhelníku (elementu). Z těchto rovnic je dále možné dopočítat hodnoty potenciálů uvnitř trojúhelníku. Tímto se zásadně liší MKP a metoda konečných diferencí (MKD), kde jsou známy jen potenciály uzlových bodů.

Pro každý trojúhelník určíme jeho energetický funkcionál. Funkcionál převádí diferenciální rovnici do integrálního tvaru, který je vhodný pro numerické řešení počítačem. Minimalizací funkcionálu pak získáme řešení původní diferenciální rovnice [17].

4.4 Řešení elektromagnetických úloh softwarovými nástroji

Mezi první software používající MKP byly poprvé používány na prvotřídních technických pracovištích typu NASA. Postupem času byly tyto softwarové nástroje odtajňovány a upravovány. Vznikly tak univerzální nástroje, které byly multifyzikální, tím pádem nebyly již vázány na daný typ aplikace. Zpočátku tvořila cena těchto softwarových nástrojů jen malou část celkové ceny použitého hardwaru. Koncem 70. let minulého století se již situace obrátila kvůli revoluci v počítačové technice.

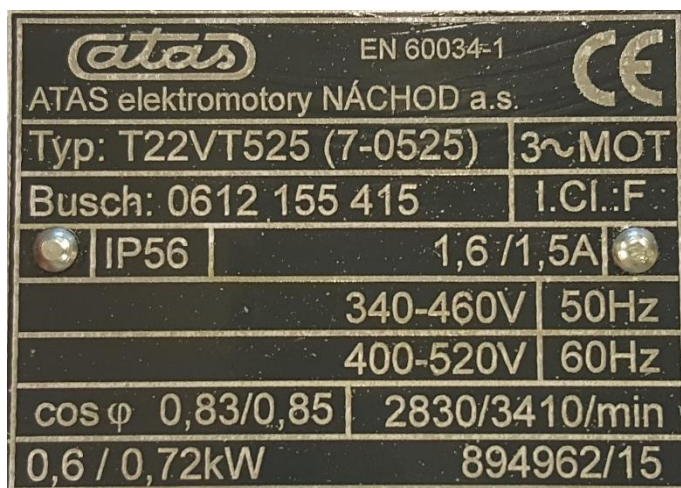
Výhody dnešních softwarových nástrojů tkví především v jejich široké univerzálnosti. Uživatel nemusí znát algoritmus výpočtů a stará se jen o správné sestavení zadané úlohy. Uživatel by měl však mít představu o použitelnosti zvoleného výpočetního programu pro danou úlohu. Úkolem uživatele je především (dle [13]):

- Správné sestavení modelu včetně vymezení definiční oblasti, okrajových podmínek, vymezení materiálových vlastností domén atd.
- Správné vyložení výsledků simulace a verifikace těchto výsledků

Ke spolehlivému používání těchto programů by měl mít uživatel dostatečný přehled o fyzikálních zákonech modelovaného problému a v neposlední řadě je důležité mít i v této oblasti zkušenosti.

5. Konvenčně vinutý motor T22V525

Motor T22V525 je 3-fázový asynchronní motor s kotvou nakrátko sériově vyráběný společností ATAS elektromotory Náchod a.s. Motor je určený pro práci s čerpadlem vody a. z tohoto důvodu je do čela stroje z výroby nasazen těsnící kroužek (gufero), který zabraňuje vniknutí vody do stroje. Stroj je konstruován na krátkodobý provoz, aby nedošlo k poškození těsnícího kroužku. Jedná se dvoupólový motor s jmenovitým výkonem 0,6kW a jmenovitými otáčkami 2830 ot/min. Další údaje jsou uvedeny na štítku stroje na obr. 5.1.

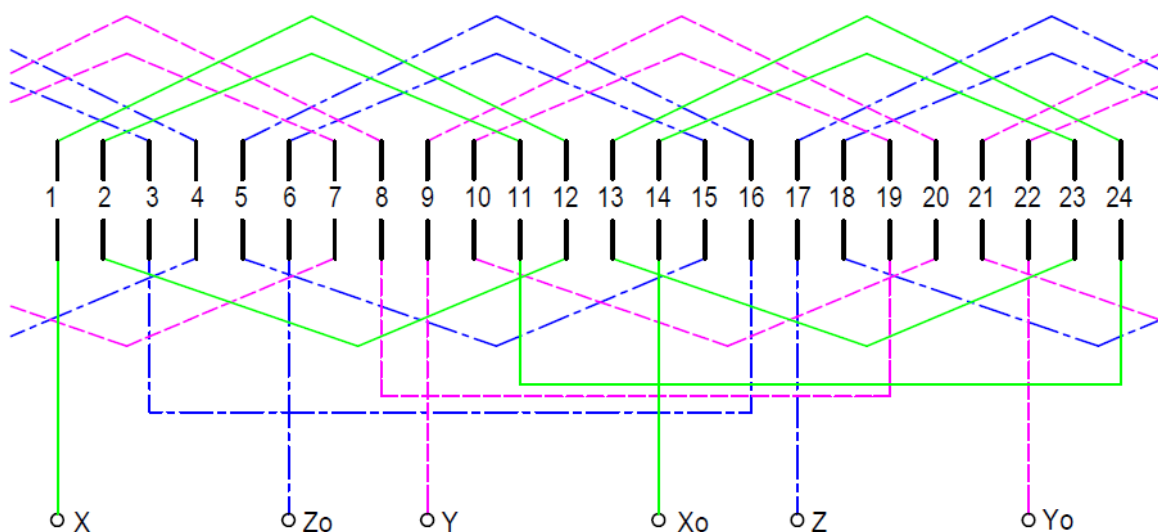


Obr. 5.1 Štítek stroje T22V525

Při chodu naprázdno pro technické podmínky stroje platí:

- otáčky rotoru minimálně 2980 ot/min
- elektrický příkon maximálně 200W
- proud jedné fáze maximálně 1A

Statorový paket motoru T22V525 s tloušťkou 60 mm má 24 drážek do nichž je uloženo jednovrstvé soustředné pólové vinutí (viz obr 5.2.). Konce vinutí X0, Y0 a Z0 jsou trvale propojeny, a nejsou vyvedeny na svorkovnici, tudíž je možné jen zapojení do hvězdy.



Obr. 5.2 Schéma vinutí motoru T22V525

Vinutí je navinuto drátem o průměru 0,53 mm, přičemž vinutí je vinuto pouze jedním vodičem a každá cívka má 92 závitů. Dle vzorce 2.2 lze spočítat koeficient plnění drážky pro známý průřez drážky $S_{dražky} = 67,7\text{mm}^2$:

$$k_{pln} = \frac{\text{celkový průřez mědi}}{\text{průřez drážky}} = \frac{N_S \cdot \pi \cdot r^2}{S_{dražky}} = \frac{92 \cdot \pi \cdot 0,265^2}{67,7} = 0,2998 \quad (5.1)$$

Rotor stroje má 17 drážek a jeho vinutí je vyrobeno tlakovým litím slitiny hliníku. Na zkratovacích prstencích jsou litím vytvořeny jednoduché lopatky plnící funkci ventilátoru. Vzduchová mezera mezi rotorem a statorem má světlost 0,3mm.

Parametry satorového vinutí a některé mechanické parametry stroje T22V525 shrnuje následující tabulka:

Parametr:		Hodnota:
N_S	počet vodičů satorové fáze	92
Q_S	počet drážek satoru	24
Q_R	počet drážek rotoru	17
D_{vod}	poloměr použitého vodiče	0,53mm
a_S	počet paralelních větví satorového vinutí	1
$S_{dražky}$	plocha satorové drážky	67,7mm ²
d_{vzduch}	radiální velikost vzduchové mezery	0,3mm
l	délka satorového paketu	60mm

Tab. 5.1 Základní parametry motoru T22V525

Změřené parametry náhradního schématu dle obr.2.3 jsou uvedeny v tabulce 5.2. Tyto naměřené údaje mi byly poskytnuty Oddělením elektrotechniky a elektrofyziiky Ústavu termomechaniky AV ČR.

Parametr:	Hodnota:	Jednotka:
X'_R	12,075	Ω
X_S	10,938	Ω
X_h	235,02	Ω
R'_R	11,78	Ω
R_S	10,26	Ω

Tab. 5.2 Parametry náhradního schématu pro klasický vinutý motor

6. Toroidně navinutý motor T22V525 pro účely porovnání

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.4, toroidní vinutí u asynchronních motorů podstatně zkracuje délku čel statorového vinutí. Při vhodně volené geometrii lze dále zmenšit odpor vinutí vlivem zkrácení čel vinutí. Jako nejvhodnější se pro užití toroidního vinutí jeví asynchronní motory, které mají krátkou osovou délku a rotor o velkém průměru. U takového stroje by byla čela klasicky navinutého stroje příliš dlouhá a ohmický odpor vinutí větší

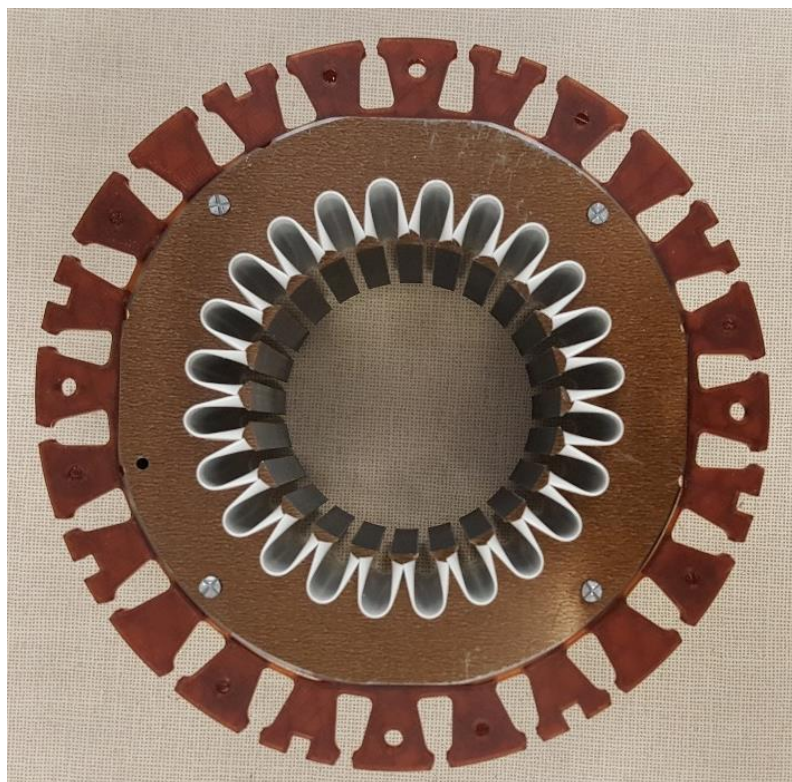
Účelem mé diplomové práce je porovnání vlastnosti toroidně navinutého stroje s konvenčně navinutým strojem. Pro ověření funkce toroidního motoru jsem zhotovil toroidní statorové vinutí na asynchronním motoru T22V525 vyrobeném společností ATAS elektromotory Náchod a.s., jehož popis je uveden v předchozí kapitole 5.

6.1 Provedení toroidně vinutého stroje

Kostra běžného asynchronního stroje není pro toroidní vinutí vhodná. Protože toroidní cívky musí být uloženy svou jednou stranou na vnějším obvodu statorového paketu, nelze takto navinutý stator vložit do původní kostry stroje těsně obepínající statorový paket. Kostru stroje jsem tedy nepoužil, na rozdíl od ostatních částí, které jsem nijak neupravoval. Všechny další komponenty pocházely z původního stroje T22V525, jmenovitě jsem použil následující součásti:

- Statorový paket plechů o tloušťce 60mm
- Rotor s klecovou kotvou a originální hřídelí
- Víka s ložisky pro usazení rotoru
- Svorníky pro dotáhnutí čel

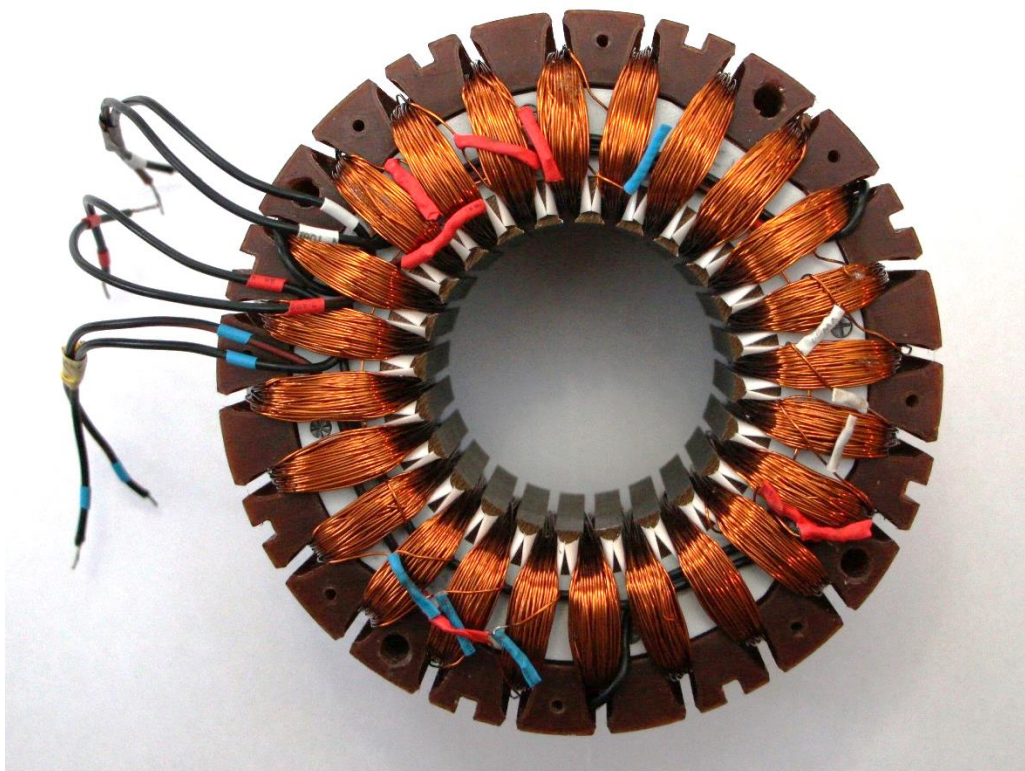
Pro uložení toroidního vinutí po vnějším obvodu statorového paketu stroje jsem navrhl a zhotovil plastový prstenec s drážkami pro uložení vnější strany vinutí. Tento prstenec je nasazený na vnější obvod statorového paketu. Sestava statorového paketu a plastového prstence s drážkami po vnějším i vnitřním obvodu je na obr. 6.1. Plastový prstenec fixuje statorové vinutí na obvodu statorového paketu a chrání izolaci vodičů proti poškození. Prstenec má stejnou tloušťku tj. 60 mm jako statorový paket plechů. Prstenec jsem navrhl a následně vytiskl pomocí 3D tiskárny z materiálu PETG.



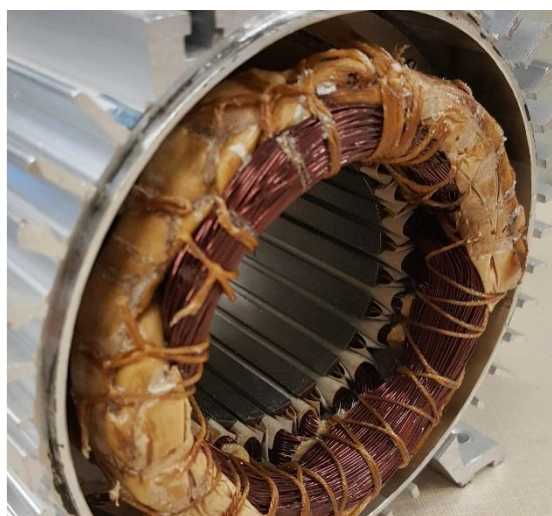
Obr. 6.1 Statorový paket s plastovým prstencem pro toroidní vinutí

Do protilehlých drážek statorového paketu a vnějšího plastového prstence jsem navinul cívky o stejném počtu závitů. Vinul jsem stejným průměrem vodiče, který byl použit u původního motoru T22V525. Každá toroidní cívka statoru má tedy 92 závitů vinutých vodičem o průměru 0,53mm. V drážkách statoru jsem ponechal původní plastovou izolaci. Potřebnou délku drátu jsem nejprve odměřil a poté navinul na provlékací člunek, s jehož pomocí jsem následně navinul jednotlivé cívky vinutí. Vinutí nelze do drážek vsypávat, jako je tomu u konvenčního navíjení, ale vinutí je nutno zhotovit provlékáním a člunek jsem při navíjení protahoval otvorem pro rotor.

Na obr 6.2 je toroidně navinutý motor T22V525. Hnědý plastový prstenec má na obvodu čtyři větší otvory pro svorníky a osm menších otvorů pro ukotvení šroubů prstence upevňující víka motoru. Z obr 6.2 a obr 6.3 je patrné, že na rozdíl od původního konvenčního vinutí, kde vinutí vyplňovalo téměř celou drážku, je u toroidního vinutí při stejném počtu závitů vodičem totožného průměru drážka statoru zaplněna méně než z poloviny. Zřejmě je to dáno výrobní technologií původního vinutí, které je do drážek vsypáváno a vodiče jsou v drážce uloženy volně. Při navíjení toroidního provlékaného vinutí jsem však jednotlivé závity cívky mohl více dotáhnout a vodiče tak na sebe doléhaly velmi těsně. U toroidně vinutého motoru lze tedy dosáhnout vyššího plnění drážky, než je tomu u klasicky vinutého stroje se vsypávaným nebo vtahovaným vinutím.



Obr. 6.2 Provedení toroidního vinutí pro motor T22V525



a)



b)

Obr. 6.3 Porovnání délky čel a) konvenčně navinutého stroje a b) toroidně navinutého stroje

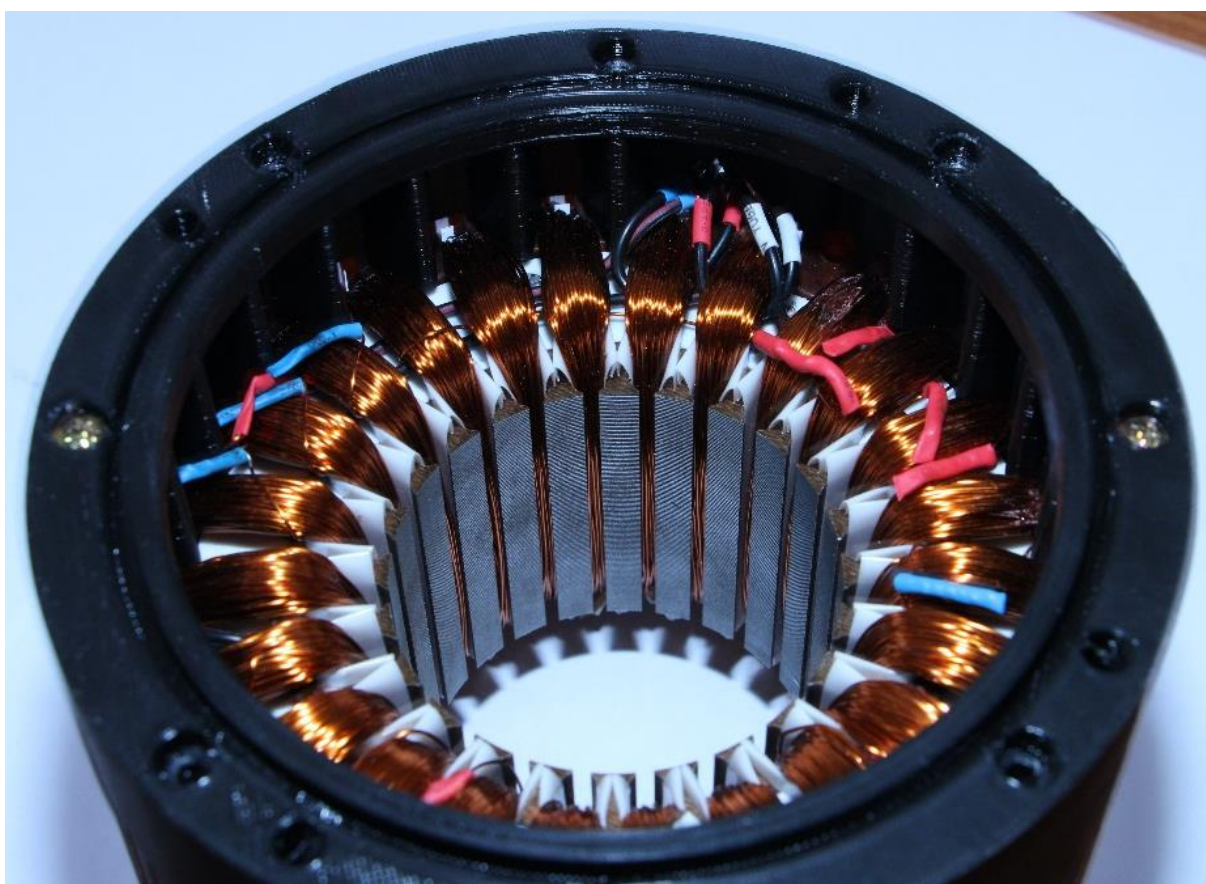
Obr. 6.3 dokumentuje snížení výšky čel statorového vinutí motoru toroidně navinutého ve srovnání s konvenčně navinutým motorem. Snížení výšky čel nejen zkrátí délku čel vinutí, ale umožní též zkrácení rozměru motoru v jeho ose. Měřením jsem ověřil, že výška čel statorového vinutí měřená od konce statorového paketu se s použitím toroidního vinutí zkrátila o 16,1mm ve srovnání s původní výškou čel konvenčního vinutí. Celková výška statorového paketu s vinutím se v ose motoru zkrátila o 32,2mm, což činí úsporu zhruba 28%, vzhledem k původní výšce konvenčně navinutého motoru. Výšku čel vinutí a celkovou osovou délku statorového paketu s různým typem vinutí porovnává

tabulka 6.1. Osová délka smontovaného stroje však zůstala zachována, protože jsem použil hřídel i víka z původního motoru.

	Výška čel statorového vinutí měřená od statorového paketu[mm]	Celková délka statorového paketu s vinutím[mm]
<i>Toroidně vinutý stroj</i>	10,6	81,2
<i>Konvenčně vinutý stroj</i>	26,7	113,4

Tab. 6.1 Výška čel statorových vinutí měřená od statorového paketu

Na prstencem dosedají z obou stran motoru konstrukce ve tvaru mezikruží upevňující víka, které jsem, obdobně jako prstencem statorového paketu, navrhl a zhotovil pomocí 3D tisku z materiálu PETG. Mezikruží má v sobě osm děr pro protažení šroubů, které jsou uchyceny v plastovém prstenci nasazeném vně statorového paketu. Mezikruží černé barvy upevňující víka je patrná z obr. 6.4.



Obr. 6.4 Mezikruží upevňující víko toroidně vinutého motoru

Aby ve stroji byla dodržena předepsaná vzduchová mezera 0,3mm, bylo nutné vystředit rotor stroje. Vystředění rotoru jsem provedl tak, že jsem rotor stroje opatřil po obvodu 0,3mm silnou distanční vložkou a následně vložil do statoru. Poté jsem nasadil obě mezikruží pro uchycení vík, na něž jsem nasadil víka motoru a stáhl svorníky. Mezikruží pro upevnění vík jsem poté přišrouboval vruty k plastovému prstenci a tím jsem vymezil vzájemnou polohu těchto dílů. Tímto způsobem jsem vymezil vzájemnou polohu statoru a rotoru s předepsanou vzduchovou mezerou 0,3mm. Po vystředění rotoru bylo nutné z něho sejmout distanční vložku, víka stroje jsem proto musel sejmout a znovu nasadit. Celková podoba toroidně navinutého stroje je patrná z obr 6.5. Na motor jsem nenamontoval ventilátor, který je u původního stroje TV22V525 s konvenčním vinutím nasazen na zadní straně hřídele.



Obr. 6.5 Sestava toroidně vinutého stroje

Limitujícím faktorem takto zhotoveného motoru je především jeho omezená mechanická tuhost a malá tepelná odolnost kvůli použití plastových dílů PETG. Pro krátkodobá měření ji však pokládám za dostatečnou.

7. Porovnání parametrů strojů T22V525 s různým typem vinutí

Tuto kapitolu věnuji porovnání parametrů motoru T22V525 s toroidním vinutím a původním, konvenčním, jednovrstvým soustředným vinutím. Oba stroje využívají stejné rotory i stejné statorové pakety. Rotorové hodnoty odporu a rozptylové reaktance dle náhradního schématu zůstanou nezměněny. Protože je zachována jak geometrie rotoru, tak i statorových plechů, lze předpokládat, že magnetický tok ve stroji se bude uzavírat stejnou cestou. Lze se tak oprávněně domnívat, že i vlastnosti magnetického obvodu budou u obou strojů shodné. Magnetizační reaktance dle náhradního schématu asynchronního stroje je závislá především na počtu vodičů v drážce a reluktanci magnetické cesty. Oba tyto parametry zůstaly u porovnávaných strojů nezměněny, a tedy by měla i magnetizační reaktance být u obou strojů identická [11].

Lze předpokládat, že parametry porovnávaných strojů t.j. funkce otáčivé rychlosti rotoru, momentu, účinnosti atd. budou záviset pouze na parametrech statorového vinutí. U obou měřených strojů byly odstraněny těsnící kroužky (gufera), aby měly motory menší ztráty třením.

7.1 Délka čel vinutí

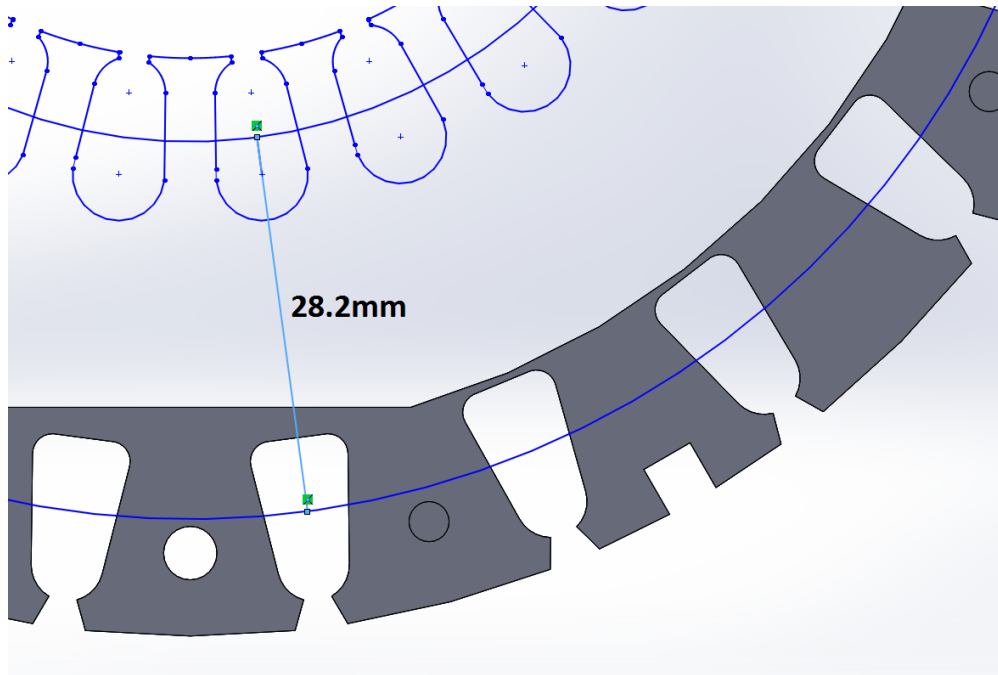
Délku čel pro konvenční vinutí určím dle vztahu:

$$l_{\xi} = k_{l\xi} \cdot \frac{\pi}{Q_S} \cdot D_1 \cdot y_{1c}, \quad (7.1)$$

kde $k_{l\xi}$ se určí dle tabulky 5-2 v [18], pro $2p = 2a$ jednovrstvé vinutí je $k_{l\xi} = 1,35 - 1,4$. Pro výpočet použiji dolní mez, tedy $k_{l\xi} = 1,35$. Q_S označuje počet statorových drážek, $Q_S = 24$. D_1 je roztečný průměr cívk, který se v obvyklých případech určí ve středu drážky, $D_1 = 76,6\text{mm}$. y_{1c} je mechanický krok cívk v počtu drážkových roztečí. Protože vinutí má drážkové rozteče pro „malé“ a „velké“ cívkové skupiny, budu počítat s průměrnou délkou drážkové rozteče cívek, tedy $y_{1c} = 10$. Po dosazení dostáváme délku čela klasicky vinutého motoru:

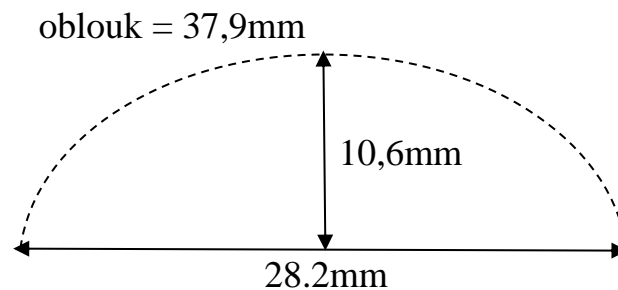
$$l_{\xi} = k_{l\xi} \cdot \frac{\pi}{Q_S} \cdot D_1 \cdot y_{1c} = 1,35 \cdot \frac{\pi}{24} \cdot 76,6 \cdot 10 = 135,2\text{mm}. \quad (7.2)$$

Pro toroidní vinutí nelze výpočet dle vzorce 7.1 použít, protože se nejedná o vztah určený pro konvenční vinutí asynchronních strojů. Výpočet délky čela jsem provedl na základě známé vzdálenosti středu drážek toroidní cívk (cívka je jednou stranou uložena v drážce statorového paketu a druhou stranou v protilehlé drážce plastového prstence) a výšky čela od statorového paketu (viz. tab. 6.1). Vzdálenost středu drážek jsem určil pomocí výkresu (viz obr. 7.1).



Obr. 7.1 Vzdálenost protilehlých drážek toroidní cívky

Na obr 7.1 je šedou barvou znázorněna výseč plastového prstence nasazeného na statorový paket. Modrými čarami je vytažena skica statorového plechu s drážkováním. Vzdálenost mezi středy drážek je 28,2mm a střední výška vinutí dosahuje 10,6 mm. Délka oblouku opsaného středovým vodičem je hledaná délka čela (viz obr.7.2). Výslednou délku čela toroidního vinutí jsem takto stanovil na $l_{\xi} = 37,9\text{mm}$



Obr. 7.2 Stanovení délky čela toroidního vinutí

7.2 Odpory vinutí

Odpor vinutí jedné statorové fáze je dán vztahem (dle [18]):

$$R_{fS} = \sigma_{Cu} \cdot \frac{l_{fS}}{S_V}, \quad (7.3)$$

kde $\sigma_{Cu} = 0,169 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ je měrný elektrický odpor mědi při teplotě 20°C. S_V je průřez vodiče, l_{fS} je celková délka závitu jedné statorové fáze.

$$l_{fS} = \frac{V_{dS} \cdot Q_S}{m_S \cdot a_S} \cdot l_v, \quad (7.4)$$

kde V_{dS} je počet vodičů v drážce, Q_S udává počet drážek statoru, m_S je počet fází statoru a a_S udává počet paralelních větví statorového vinutí. l_v je střední délka vodiče. Střední délku vodiče klasického vinutí určíme ze vztahu:

$$l_v = l_\xi + l \quad (7.5)$$

Kde l_ξ je délka čela vypočtená v předchozí kapitole 7.1 a l je délka statorového paketu.

Jedna cívka konvenčního vinutí stroje T22V525 je u toroidně navinutého stroje nahrazena dvěma cívkami zapojenými sériově. Nelze tedy použít vzorec 7.5 pro výpočet střední délky vodiče, je nutné použít vzorec:

$$l_v = (l_\xi + l) \cdot 2. \quad (7.6)$$

Pod osazení dostáváme pro klasické vinutí:

$$l_{fS} = \frac{V_{dS} \cdot Q_S}{m_S \cdot a_S} (l_\xi + l) = \frac{92 \cdot 24}{3 \cdot 1} (135.2 + 60) = 143,667m. \quad (7.7)$$

Pro toroidní vinutí:

$$l_{fS} = \frac{V_{dS} \cdot Q_S}{m_S \cdot a_S} (l_\xi + l) = \frac{92 \cdot 24}{3 \cdot 1} (37.9 + 60) \cdot 2 = 144,109m. \quad (7.8)$$

Po dosazení do 7.3 dostáváme odpor statorového vinutí jedné fáze pro konvenční vinutí:

$$R_{fS} = \sigma_{Cu} \cdot \frac{l_{fS}}{S_V} = 0,169 \cdot \frac{143,667}{\pi \cdot 0,265^2} = 11,005 \Omega. \quad (7.9)$$

A pro toroidní vinutí:

$$R_{fS} = \sigma_{Cu} \cdot \frac{l_{fS}}{S_V} = 0,169 \cdot \frac{144,109}{\pi \cdot 0,265^2} = 11,039 \Omega. \quad (7.10)$$

Je patrné, že pro danou geometrii jsou odpory dle výpočtů obou typů vinutí velmi podobné. Pokud by geometrie stroje zůstala zachována a zmenšila by se pouze tloušťka statorového paketu l , toroidně vinutý motor by měl menší odpor vinutí.

Následující tabulka 7.1 porovnává vypočtené hodnoty odporů s naměřenými hodnotami odporů jedné fáze statorového vinutí. Je patrné, že klasicky vinutý motor má nepatrně menší odpor vinutí než toroidně vinutý, což bylo prokázáno i při teoretickém výpočtu těchto odporů.

	Spočtený odpor jedné fáze statorového vinutí [Ω]	Změřený odpor jedné fáze statorového vinutí [Ω]
<i>Toroidně vinutý stroj</i>	11,039	11,98
<i>Klasicky vinutý stroj</i>	11,005	11,78

Tab. 7.1 Porovnání odporů různých typů vinutí

7.3 Reaktance čel vinutí

Celkovou rozptylovou reaktanci vinutí lze rozdělit do tří základních složek, reaktanci čel, drážkovou reaktanci, reaktance diferenčního rozptylu, reaktance zešikmením drážek. Protože u toroidního vinutí byla zkrácena podstatně délka čel, bude nižší i reaktance prostoru čel dle rovnice:

$$X_c = 4 \cdot \pi \cdot f_s \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{S1}^2 \cdot l_\xi}{p} \cdot \lambda_c, \quad (7.11)$$

kde $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ je permeabilita vakua, l_ξ je délka čela, f_s je napájecí statorová frekvence a p je počet pólpárů. λ_c je jednotková vodivost prostoru čel, která je závislá na použitém druhu vinutí (viz tabulka 5-3 v[18]). Jako střední hodnotu při výpočtu lze uvažovat $\lambda_c = 0,3$. N_{S1} udává počet závitů jedné fáze statoru v sérii, pro kterou platí:

$$N_{S1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_S \cdot Q_S}{a \cdot m_S}, \quad (7.12)$$

kde N_S je počet závitů statorové cívky, Q_S je počet drážek statoru, a je počet paralelních větví statorového vinutí a m_S je počet fází statoru. Pod dosazení dostaneme:

$$N_{S1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_S \cdot Q_S}{a \cdot m_S} = \frac{1}{2} \cdot \frac{92 \cdot 24}{1 \cdot 3} = 368. \quad (7.13)$$

Hodnota počtu závitů jedné fáze statoru v sérii N_{S1} je pro klasické i toroidní shodná. Ve vzorci 7.11 se mění jen parametr délky čel l_ξ . Pro konvenční vinutí pak platí:

$$X_c = 4 \cdot \pi \cdot f_s \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{S1}^2 \cdot l_\xi}{p} \cdot \lambda_c = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{368^2 \cdot 0,1352}{2} = 4,3369\Omega. \quad (7.14)$$

Pro toroidní vinutí je nutné délku čel vynásobit dvěma, protože ekvivalent jedné cívky konvenčního vinutí je tvořen dvěma cívkami toroidního vinutí, po dosazení pak platí:

$$X_c = 4 \cdot \pi \cdot f_s \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{S1}^2 \cdot 2 \cdot l_\xi}{p} \cdot \lambda_c = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{368^2 \cdot 2 \cdot 0,0379}{2} = 1,2158\Omega. \quad (7.15)$$

Celková reaktance prostoru čel se dělí většinou na stator a rotor rovnoměrně [18], pro statorovou reaktanci čel tedy platí:

$$X_{\xi_{els}} = \frac{X_c}{2}. \quad (7.16)$$

Pro statorové reaktance obou vinutí dostáváme hodnoty dle tabulky 7.2

	Délka vodiče v čele statorového vinutí [mm]	Vypočtená reaktance čel [Ω]
<i>Toroidně vinutý stroj</i>	37,9	1,2158
<i>Klasicky vinutý stroj</i>	135,2	2,168

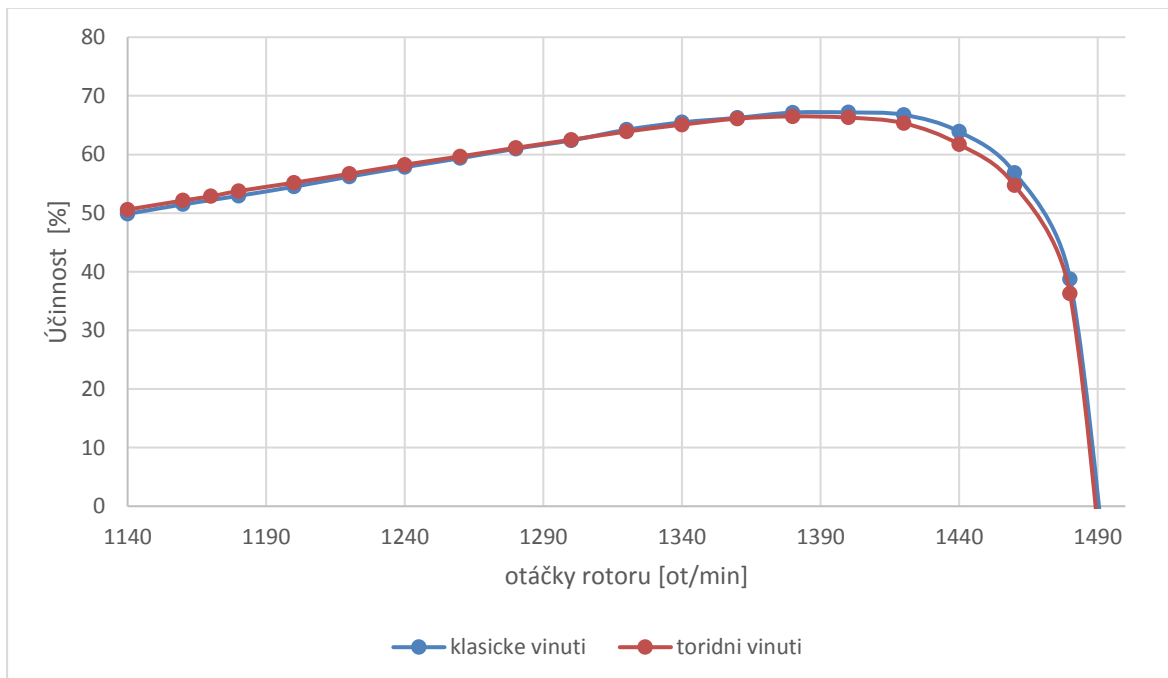
Tab. 7.2 Rozptylové reaktance čel toroidního a klasického vinutí

7.4 Zatěžovací charakteristika

Zatěžovací charakteristiky strojů byly změřeny se sníženou frekvencí napájecího napětí $f_s = 25\text{Hz}$, čemuž odpovídají synchronní otáčky 1500ot/min. Otáčky strojů byly snižovány z bezpečnostních důvodů, neboť mechanická pevnost toroidně navinutého stroje, jehož některé části jsem zhotovil pomocí 3D tisku, bude nižší oproti původnímu kovovému provedení. Motory byly napájeny experimentálním měničem s IGBT tranzistory řízeným ze systému dSPACE. Napětí bylo vystřídáno pulzně šířkovou modulací (PWM) s frekvencí 10kHz a maximálním napětím 162V. Napájecí napětí bylo sníženo, protože při regulaci otáčivé rychlosti změnou frekvence by se mělo

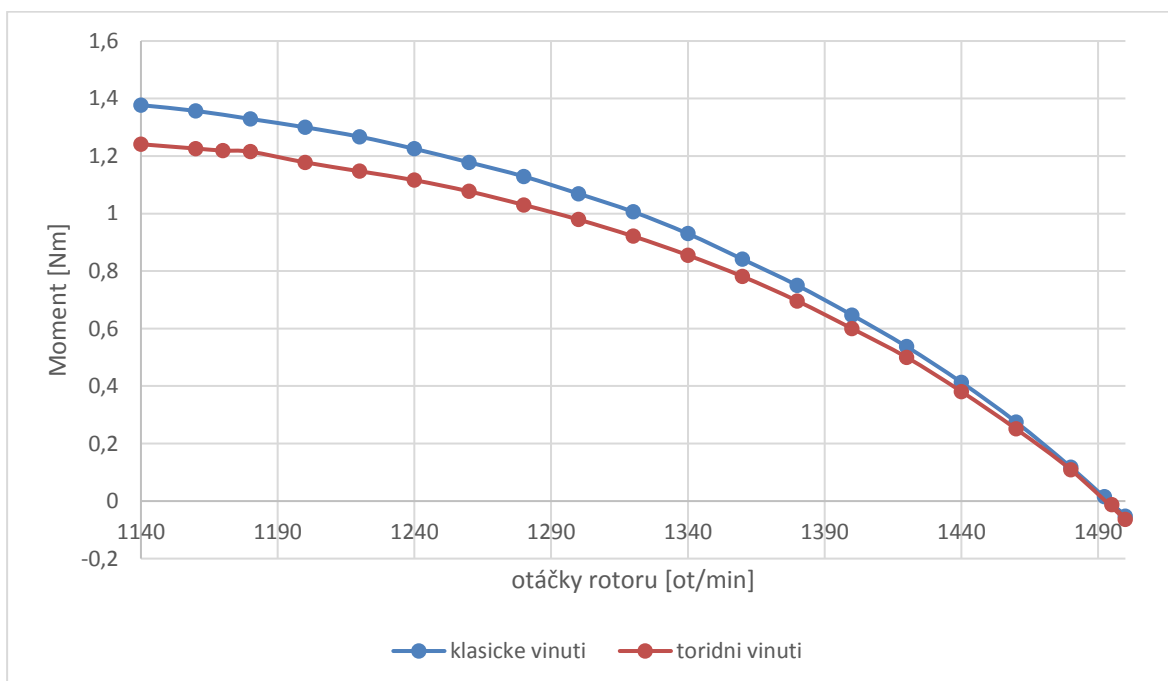
dodržet $U/f = konst.$ Udržení konstantního podílu napětí a frekvenci vyplývá z požadavku udržet stroj plně magneticky vytížen [1].

Měřením jsem ověřil, že konvenčně vinutý motor má nepatrně vyšší maximální účinnost o 0,67% oproti toroidnímu. Vyšší účinnost klasicky vinutého rotoru souvisí s menším odporem statorového vinutí.

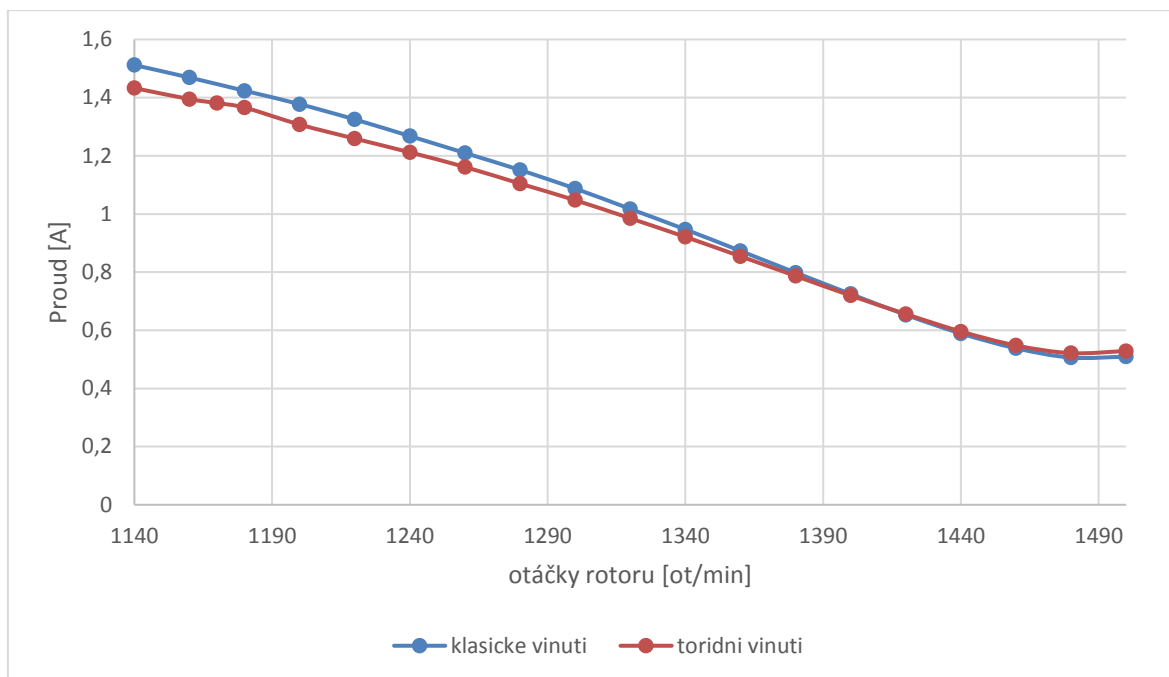


Obr. 7.3 Účinnost v závislosti na otáčkách pro klasicky a toroidně vinutý motor (získáno měřením)

Moment měřený na hřídeli je u klasicky vinutého stroje pro všechny měřené otáčky vyšší, než je tomu u toroidně vinutého stroje viz obr. 7.5.



Obr. 7.4 Moment v závislosti na otáčkách pro klasicky a toroidně vinutý motor (získáno měřením)



Obr. 7.5 Efektivní hodnota proudu jedné fáze vinutí v závislosti na otáčkách pro klasický a toroidně vinutý motor (získáno měřením)

Rozdíl účinnosti obou strojů je velmi malý. Tento fakt jsem očekával, protože teoreticky spočtené odpory obou strojů vycházely téměř shodné. Toroidně vinutý motor dosahuje menších hodnot proudu při nižších otáčkách. Pro otáčky blíží se synchronní rychlosti magnetického pole má toroidní motor nepatrně vyšší hodnoty proudu, než je tomu u klasicky vinutého stroje.

Naměřené hodnoty mohou být zatíženy určitou systematickou chybou, protože podmínky měření nejsou pro oba stroje identické. Například toroidně vinutý motor nebyl oproti klasicky vinutému motoru osazen ventilátorem na hřídeli. Ventilátor způsobuje při chodu ventilační ztráty, které nejsou lineárně závislé na otáčkách. Jedná se o tzv. ventilátorovou zatěžovací charakteristiku, jejíž moment roste s kvadrátem otáček (viz. [2]). Dalším faktorem ovlivňující měřená data může být odlišné tření v ložiskách vlivem rozdílného osazení vík u obou strojů. Vliv těchto faktorů nelze jednoduše předvídat, protože, jak již bylo zmíněno, tyto faktory neovlivňují stroj s lineární závislostí na otáčkách. Nelze tak s určitostí říci, do jaké míry ty odchylky mezi stroji ovlivňují změřená data.

Z měření vyplývá očekávaná skutečnost, že oba stroje jsou si svými provozními charakteristikami velmi podobné. Lze se domnívat, že odlišnost charakteristik obou strojů je způsobena pouze změnou hodnot odporů a rozptylových reaktancí statoru. Ostatní parametry stroje by měly zůstat při dodržení počtu závitů vinutí, paralelních větví a stejného uspořádání vinutí zůstat shodné (viz. úvod do kapitoly 7). Dle výpočtů i měření se parametry statorového vinutí změnily s použitím toroidního vinutí jen minimálně, tudíž lze očekávat i malé změny v naměřených charakteristikách.

8. Modely asynchronních strojů s různým typem vinutí

Modely asynchronních strojů jsem vytvořil v softwaru ANSYS Maxwell, který je použitelný v širokém spektru elektromagnetických simulací. Lze například simulovat chování točivých strojů, elektromagnetických senzorů, transformátorů atd. ANSYS Maxwell podporuje práci s nelineárními materiály či spojování elektromagnetických modelů s externími elektrickými obvody [19]. Tímto způsobem lze například simulovat chování elektrického motoru s měničem.

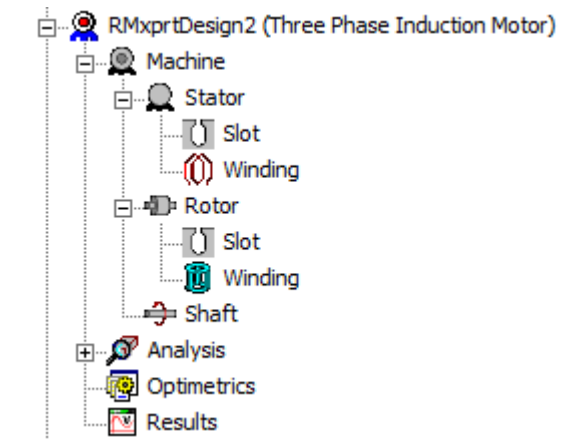
Pro návrh a simulaci točivých elektrických strojů se používá modul RMXprt (Rotating machine expert) použitelný pro všechny typy známých strojů (stejnoseměrné, synchronní, asynchronní motory atd.). Modul realizuje výpočty dle analytických rovnic známých z teorie elektrických strojů, nejedná se tedy výpočet MKP. Výpočty jsou velmi rychlé a výsledek je možné získat téměř okamžitě (během pár sekund), což usnadňuje a zrychluje práci při optimalizaci stroje. Výhodou modulu RMXprt je možnost automatického vygenerování 2D či 3D modelu řešeného MKP. Vygenerovaný model se sestává z geometrie, materiálových a okrajových podmínek určených při návrhu stroje v modulu RMXprt [20].

8.1 Tvorba modelů

Při vytváření modelů jsem nejprve sestrojil model motoru T22V525 v modulu RMXprt a následně vygeneroval jeho 2D model. Model jsem následně upravil a vytvořil 2D model motoru s toroidním vinutím. Postup tvorby modelů je popsán níže.

8.1.1 Tvorba modelu v RMXprt

Nejprve je v modulu RMXprt nutné vybrat, o jaký typ stroje se jedná, v mém případě jde o třífázový asynchronní motor (three phase induction machine). Model obsahuje hlavní kartu „machine“, pod níž jsou karty „stator“ a „rotor“ (viz obr. 8.1). V kartách „stator“ a „rotor“ se definuje geometrie drážek („slot“) a vinutí do nich vložené („winding“).



Obr. 8.1 Karty modulu RMXprt

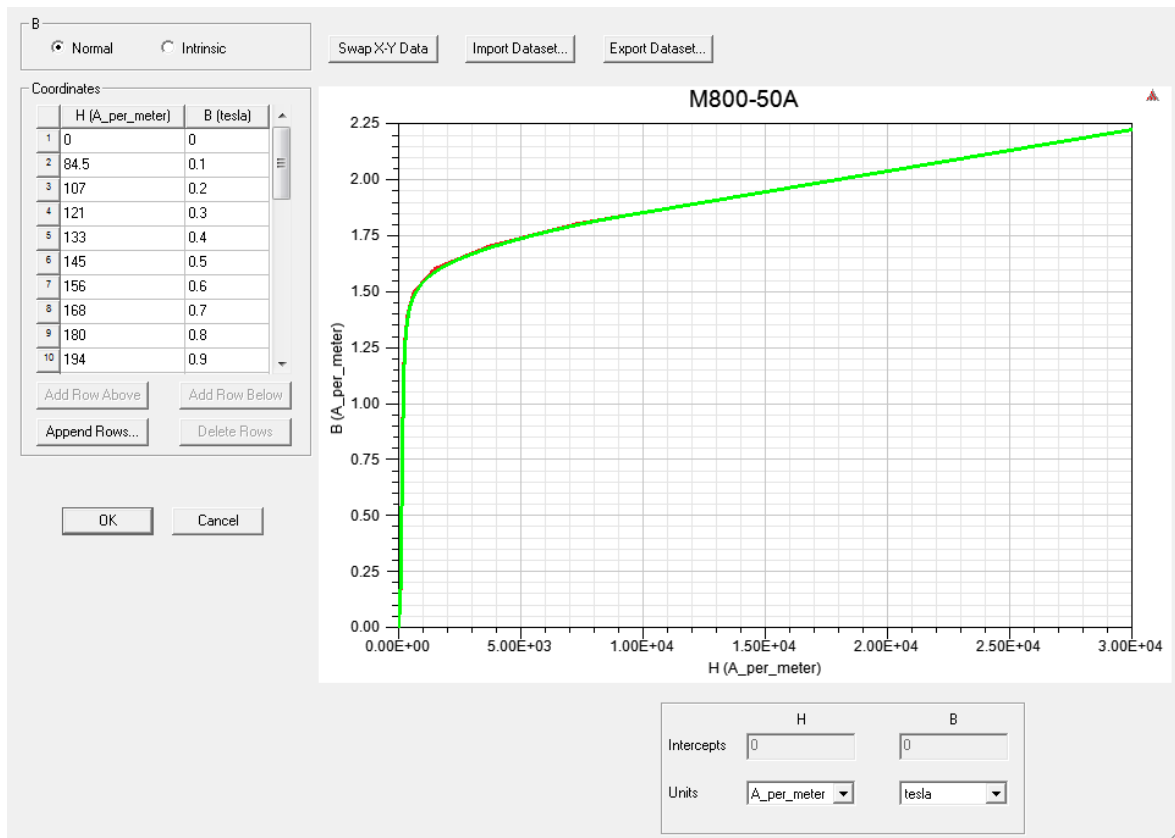
V kartě „machine“ jsem zadal počet pólů stroje, koeficient dodatečných ztrát, hodnoty ztrát třením, ventilační ztráty a otáčky, při kterých byly ztráty měřeny (viz obr. 8.2). Při zadávání hodnot ztrát jsem vycházel z měření, při kterém jsem při 3000ot/min stanovil ztráty cca 23,8W. Tyto ztráty byly měřeny bez těsnícího kroužku, s těsnícím kroužkem jsou ztráty cca 88W. Ztráty třením jsem odhadl na 16,5W a ventilační ztráty pak na 7,3W.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Machine Type	Three Pha...				<input checked="" type="checkbox"/>
Number of Poles	2			Number of poles of the machine	<input type="checkbox"/>
Stray Loss Fac...	0.01		0.01	Stray Loss Factor	<input type="checkbox"/>
Frictional Loss	16.5	W	16.5W	The frictional loss measured at the reference speed	<input type="checkbox"/>
Windage Loss	7.3	W	7.3W	The windage loss measured at the reference speed	<input type="checkbox"/>
Reference Sp...	3000	rpm		The reference speed at which the frictional and windage losses are measured	<input type="checkbox"/>

Show Hidden

Obr. 8.2 Nastavení karty "machine"

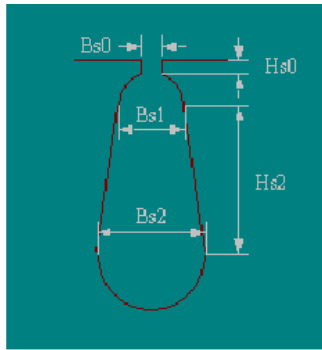
V kartách „rotor“ a „stator“ jsem nastavil počet drážek statoru, respektive rotoru, dále jsem nastavil rozměry vnitřních a vnějších poloměrů použitých plechů dle výkresů stroje. Magnetickému obvodu jsem přiřadil materiál s označením M800-50A, který jsem nejprve musel definovat v knihovně BH křivkou (viz obr. 8.3). Materiálu jsem přiřadil příslušnou vodivost a koeficienty pro výpočet ztrát v jádře.



Obr. 8.3 Nastavení BH křivky materiálu M800-50A

V kartě „rotor“ jsem dále nastavil natočení drážek („skew width“) na 1,2 drážkové rozteče, vinutí rotoru jsem zvolil jako odlévané tj. s klecovou kotvou.

RMxprt využívá pro definici geometrie drážek šablony s normovanými drážkami. Rozměry drážek jsem zadal dle obr. 8.4 a obr 8.5.

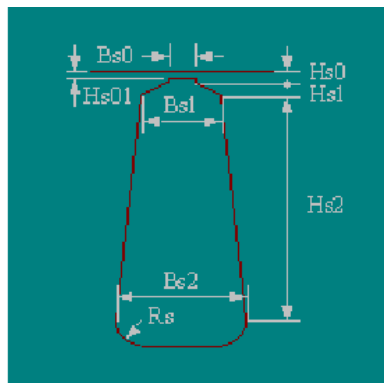


Slot

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Auto Design	<input type="checkbox"/>			Auto design Hs2, Bs1 a...	<input type="checkbox"/>
Parallel Tooth	<input type="checkbox"/>			Design Bs1 and Bs2 ba...	<input type="checkbox"/>
Hs0	0.5178	mm	0.5178mm	Slot dimension: Hs0	<input type="checkbox"/>
Hs2	6.11	mm	6.11mm	Slot dimension: Hs2	<input type="checkbox"/>
Bs0	2.3	mm	2.3mm	Slot dimension: Bs0	<input type="checkbox"/>
Bs1	5.4	mm	5.4mm	Slot dimension: Bs1	<input type="checkbox"/>
Bs2	6.9	mm	6.9mm	Slot dimension: Bs2	<input type="checkbox"/>

Show Hidden

Obr. 8.4 Nastavení rozměrů statorové drážky



Slot

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Hs0	0.25	mm	0.25mm	Slot dimension: Hs0	<input type="checkbox"/>
Hs01	0.25	mm	0.25mm	Slot dimension: Hs01	<input type="checkbox"/>
Hs1	3.025	mm	3.025mm	Slot dimension: Hs1	<input type="checkbox"/>
Hs2	6.1	mm	6.1mm	Slot dimension: Hs2	<input type="checkbox"/>
Bs0	0.89	mm	0.89mm	Slot dimension: Bs0	<input type="checkbox"/>
Bs1	5.4	mm	5.4mm	Slot dimension: Bs1	<input type="checkbox"/>
Bs2	3	mm	3mm	Slot dimension: Bs2	<input type="checkbox"/>
Rs	0	mm	0mm	Slot dimension: Rs	<input type="checkbox"/>

Show Hidden

Obr. 8.5 Nastavení rozměrů rotorové drážky

Rotorovému vinutí jsem přiřadil materiál se sníženou vodivostí 20MS/m. Sníženou vodivostí jsem respektoval poměrně vysoký odpor litého hliníkového vinutí rotoru zjištěný při měření parametrů náhradního schématu.

Statorové vinutí jsem nastavil dle obr.8.6, tedy počet vodičů v drážce na 92, počet paralelních vodičů na 1 a průměr drátu na 0,58mm s izolací 0,05mm. Průměr mědi drátu je tak 0,53mm. V kartě se pod „End/Insulation“ nastavuje izolace drážek, výška čel atp. Protože odpor statorového vinutí je znám a rozptylová indukčnost čel taktéž, není potřeba se těmito parametry z hlediska následné tvorby 2D modelu podrobně zabývat. Hodnoty v „End/Insulation“ jsem zadal dle známých dat a odhadu.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Winding Layers	1			Number of winding layers	<input type="checkbox"/>
Winding Type	Editor			Stator winding type	<input type="checkbox"/>
Parallel Branch...	1			Number of parallel bran...	<input type="checkbox"/>
Conductors pe...	92		92	Number of conductors ...	<input type="checkbox"/>
Number of Stra...	1		1	Number of strands (nu...	<input type="checkbox"/>
Wire Wrap	0.05	mm		Double-side wire wrap t...	<input type="checkbox"/>
Wire Size	Diameter: 0.58mm			Wire size, 0 for auto-de...	<input type="checkbox"/>

Show Hidden

Obr. 8.6 Nastavení karty statorového vinutí

Dle analytického výpočtu RMxprt jsou parametry náhradního stroje následovné dle tabulky 8.1.

Parametr:	Hodnota:	Jednotka:
X_R	11,873	Ω
X_S	9,603	Ω
X_h	306,664	Ω
R_R	10,788	Ω
R_S	13,495	Ω

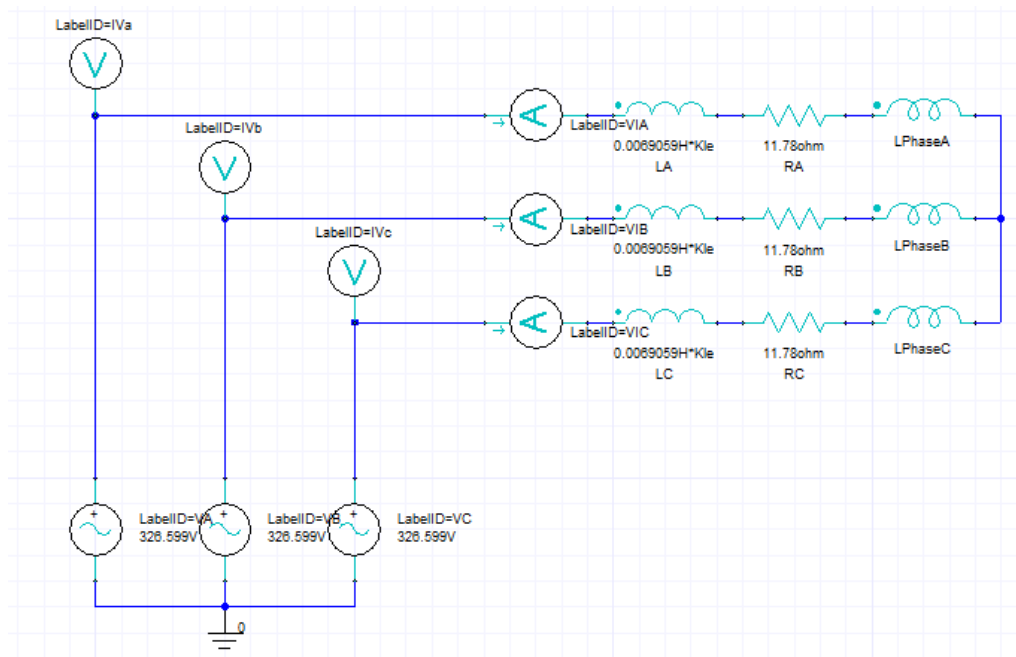
Tab. 8.1 Parametry náhradního schématu vypočtené v RMxprt

Parametry rotoru se velmi podobají těm, které byly určeny měřeními (viz. tab. 5.1). Magnetizační reaktance se liší od naměřených hodnot podstatněji. Statorové parametry jsem při návrhu neoptimalizoval, protože použiji hodnoty změřené a vypočtené.

8.1.2 2D model motoru s klasickým vinutím

2D model motoru s klasickým vinutím jsem vytvořil pomocí modulu RMxprt, který vygeneruje potřebnou geometrii, materiálové a okrajové podmínky a externí elektrický obvod. Ve vygenerovaném modelu jsem provedl úpravy parametrů externího elektrického obvodu.

Externí elektrický obvod respektuje napájení statorového vinutí. Obvod obsahuje tři zdroje sinusového napětí s amplitudou 326 V navzájem fázově posunuté o 120°. Pro každou fázi je v obvodu celkový odpor vinutí jedné fáze, rozptylová indukčnost čel a prvek propojující danou fázi s 2D modelem. Hodnoty těchto elementů obvodu jsou určeny dle analytických výpočtů v RMxprt, já jsem však tyto hodnoty nahradil změřenými, respektive teoreticky vypočtenými (viz kapitola 7.2. a 7.3.). Odpor vinutí jsem nastavil na 11,78 Ω a indukčnost 0.00690H.



Obr. 8.7 Externí elektrický obvod statorového vinutí

2D model nerespektuje konce vinutí statoru ani rotoru. Statorová rozptylová indukčnost čel je respektována v externím elektrickém obvodu. Rotorovému vinutí je nutné přiřadit odpor a indukčnost mezi jednotlivými tyčemi. Tyto hodnoty byly určeny analytickým výpočtem v RMxpert, hodnoty jsem ponechal nezměněny.

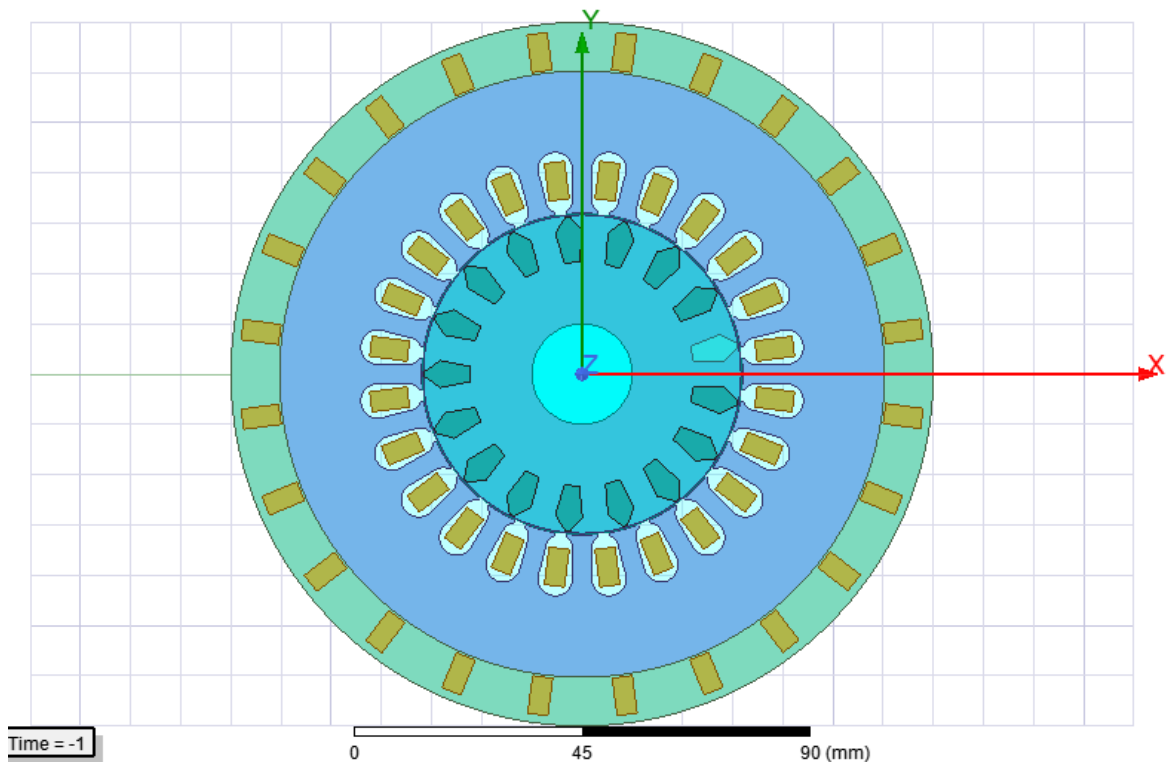
Okrajovou podmínku jsem stanovil dle běžné praxe v teorii elektrických strojů, kdy se uvažuje, že magnetický tok se uzavírá pouze uvnitř stroje, jedná se vnitřní okrajovou úlohu. Při generování modelu byla automaticky nastavena okrajová podmínka, aby vektor potenciálů vně uvažovaného statorového paketu byl nulový.

Model jsem simuloval v časové oblasti s krokem simulace 0,0002s. Konec simulace jsem nastavil na 0,15s, což je více než dostatečný čas k ustálení všech průběhů. K ustálení průběhů dochází již po cca 75ms. Simulace jsem provedl pro různé otáčky rotoru, přičemž otáčky jsem volil shodně, jako při měření momentové charakteristiky.

8.2 2D model s toroidním vinutím

Nejprve jsem, jako u klasicky vinutého stroje, změnil hodnoty odporů a rozptylové indukčnosti čel statorového vinutí v externím elektrickém obvodu. Hodnotu odporu vinutí jsem nastavil na $11,98\Omega$ dle naměřených hodnot a indukčnost jsem nastavil na $0,00387183H$ dle teoreticky vypočtené hodnoty.

Model toroidního vinutého stroje jsem vytvořil z modelu klasického stroje přidáním cívek po vnějším obvodu stroje (viz obr. 8.8). Cívky vně statoru jsou v reálném stroji obklopeny plastovým prstencem. Plast, či obecně nemagnetický materiál, má permeabilitu velmi blízkou hodnotě permeability vakua. Po této úvaze jsem model nastavil tak, že cívky po vnějším obvodu statoru obklopuje vakuum. Tímto jsem se dopustil jen zanedbatelné chyby, která nemá na chování stroje téměř žádný vliv.



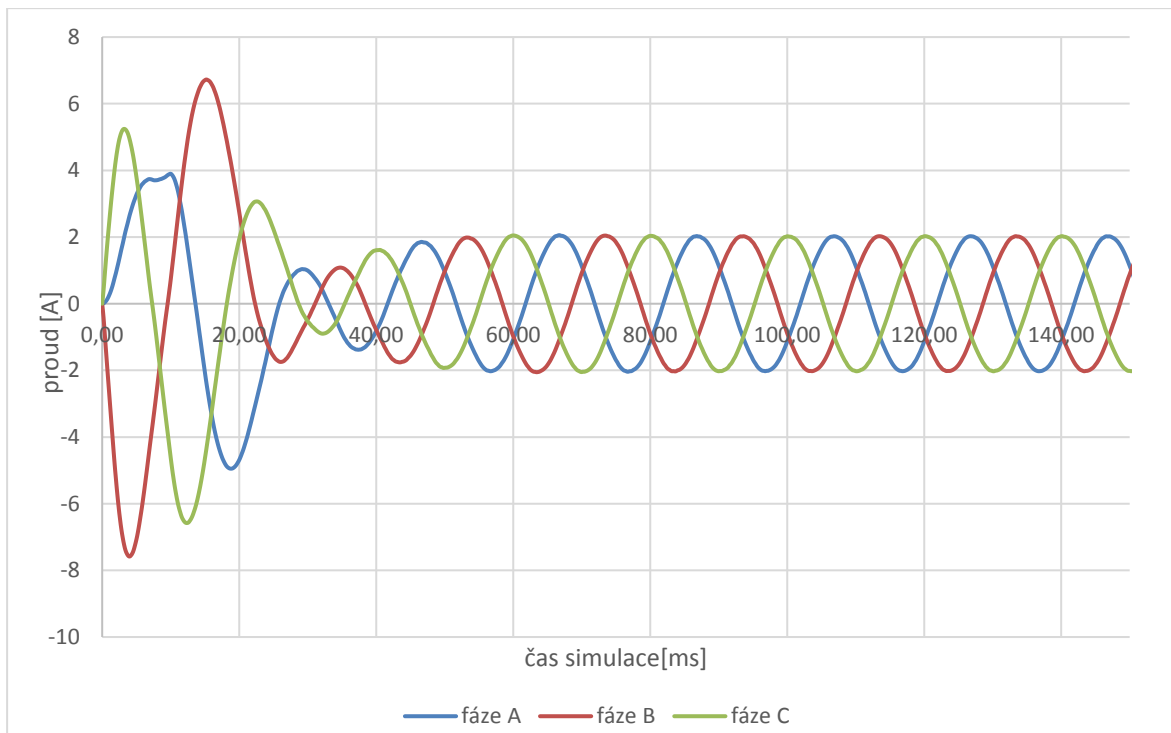
Obr. 8.8 Podoba 2D geometrie toroidního stroje

Okrajovou podmínku jsem v tomto případě nastavil pro vnější obvod uvažovaného prstence vakua obklopující cívky okolo vnějšího průměru statorového balení. Obdobně jako modelu s klasickým vinutím uvažuji, že vektor potenciálů vně prstence vakua je nulový.

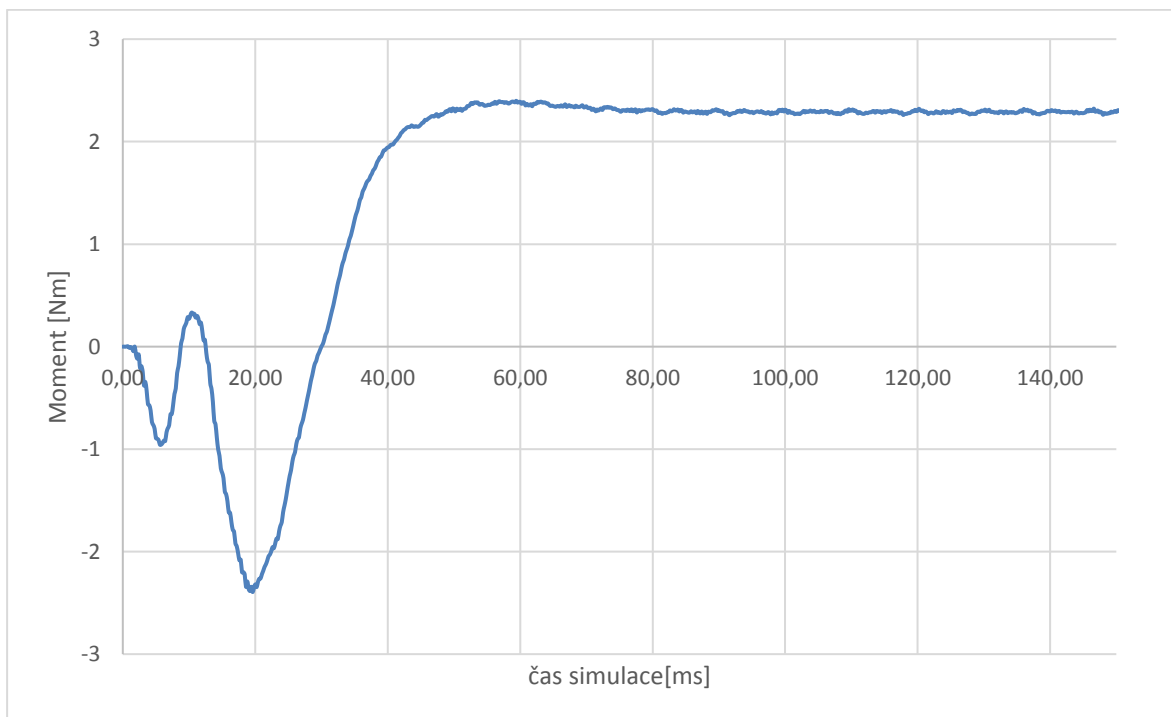
Model jsem opět simuloval v časové oblasti s krokem simulace 0,0002s. Konec simulace jsem nastavil na 0,15s, což je dostatečný čas pro ustálení sledovaných průběhů. Simulace jsem provedl pro stejné otáčky rotoru jako u modelu s klasickým vinutím.

8.3 Analýza průběhů ze simulací

Model má nastavenou určitou rychlost rotoru, která je po celou uvažovanou dobu simulace konstantní. Všechny počáteční podmínky hodnot proudů, napětí momentu atd. jsou nastaveny jako nulové. Motor se při simulaci chová, jako by byl připojen k síti při konstantních otáčkách rotoru. Ukázkové průběhy proudů (obr 8.9) a momentu (obr 8.10) pro klasicky vinutý motor s jmenovitými otáčkami $n=2830\text{ot/min}$ jsou uvedeny níže.



Obr. 8.9 Průběhy proudů klasicky vinutého stroje pro $n=2830\text{ot/min}$



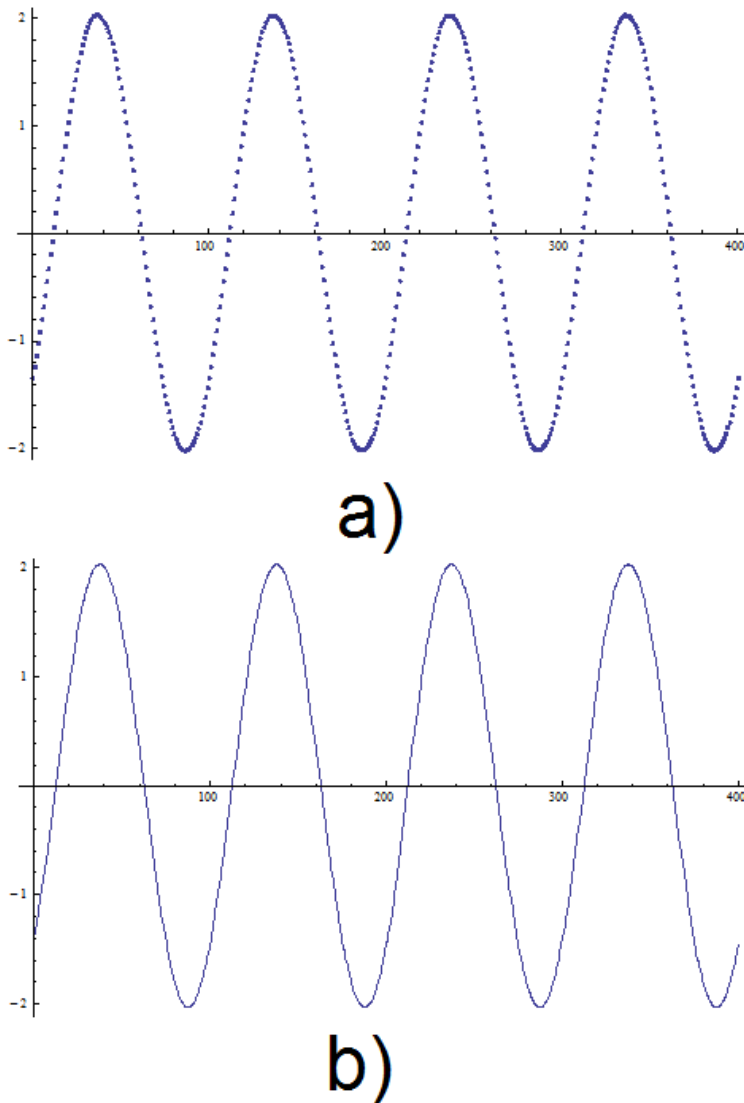
Obr. 8.10 Průběh momentu klasicky vinutého stroje pro $n=2830\text{ot/min}$

Pro analýzu průběhů napětí a proudů jednotlivých fází jsem použil software Wolfram Mathematica. Při analýze napětí a proudů jsem uvažoval čtyři poslední periody v dané simulaci, v této oblasti jsou již průběhy ustálené. Vždy jsem analyzoval průběhy jen jedné fáze, jelikož parametry všech fází jsou symetrické a geometrie daného stroje taktéž, musí být průběhy napětí a proudů všech fází také shodné jen s rozdílem fázového posunu. Pro průběhy proudů a napětí jsem

našel proložení sinusoidou jako funkcí času, tedy proložení vztahem:

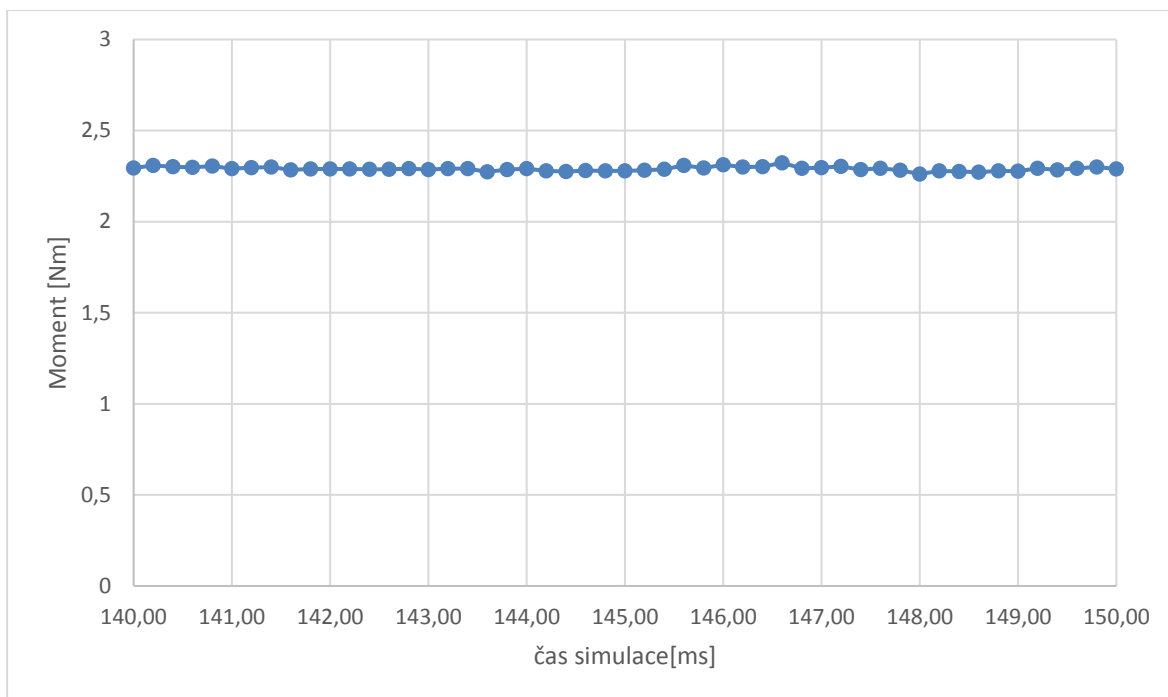
$$A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) . \tag{8.1}$$

Proložení je patrné z obr 8.11, kde na ose x je pořadové číslo vzorku. Pro průběhy proudů a napětí jsou tak známy maximální výchylky A a jejich fáze φ . Se znalostí maximální výchylky lze jednoduše určit efektivní hodnotu proudu dle $A/\sqrt{2}$. Rozdílem fází proudu a napětí pak dostanu úhel účinníku φ .



Obr. 8.11 Znáornění proložení sinusoidou, kde a) jsou body vzorků a b) je nalezené proložení

Moment stroje se nikdy zcela neustálí (viz obr. 8.12), proto jsem jako hodnotu momentu uvažoval jeho střední hodnotu pro posledních 10ms simulace.

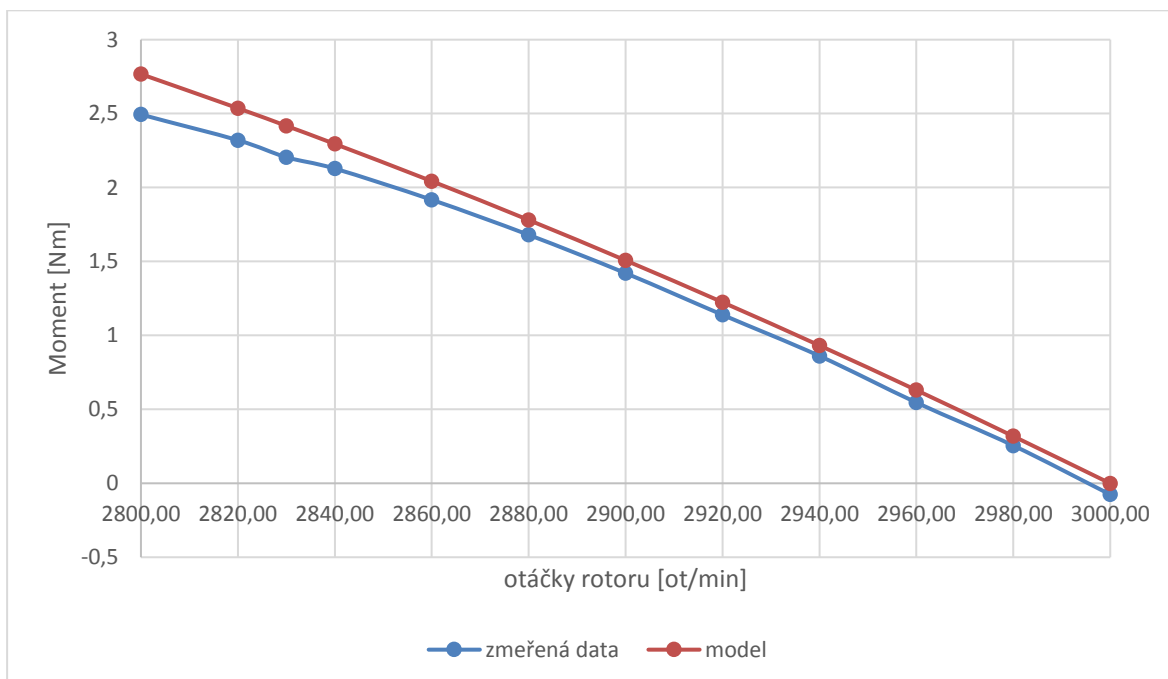


Obr. 8.12 Průběh momentu pro posledních 10ms simulace klasicky vinutého stroje pro $n=2830\text{ot/min}$

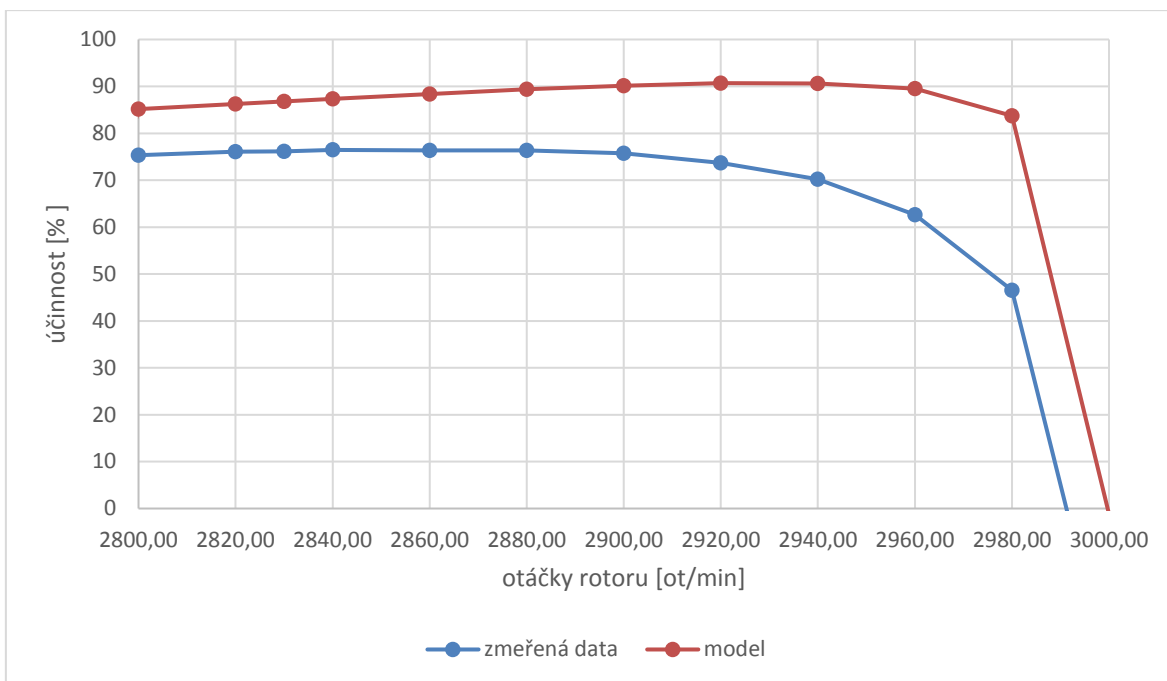
8.4 Verifikace modelu s konvenčním vinutím

Verifikaci modelu jsem provedl porovnáním dat získaných simulací a dat z měření zatěžovací charakteristiky. Simulací jsem získal průběhy proudů, napětí a momentu, ostatní veličiny lze z těchto průběhů dopočítat.

Dle očekávání jsem má 2D model stroje vždy vyšší moment na hřídeli (obr. 8.13) a účinnost stroje (obr. 8.14) než je tomu u reálného stroje.

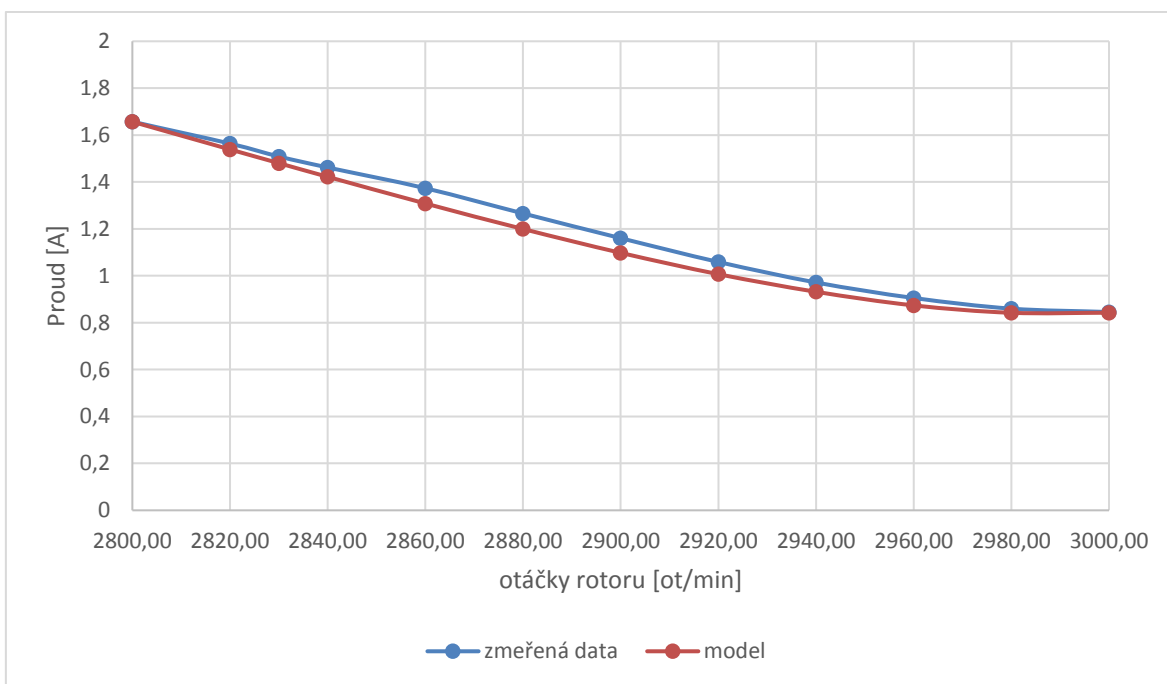


Obr. 8.13 Porovnání momentu získaných simulací a naměřených hodnot

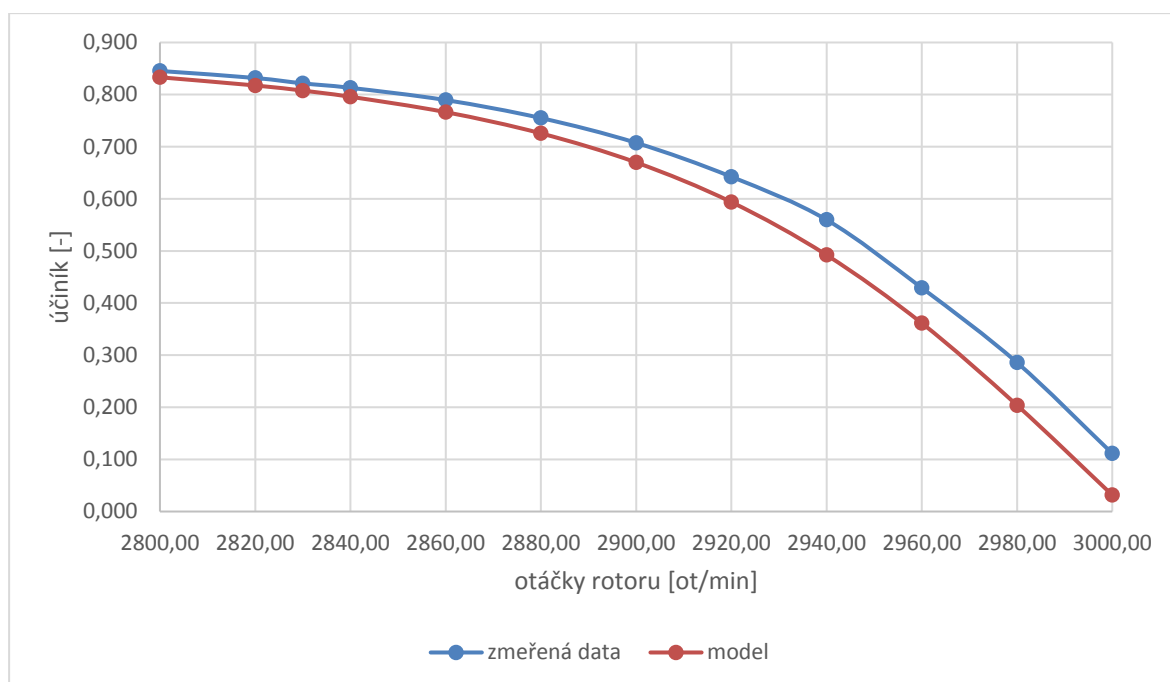


Obr. 8.14 Porovnání účinnosti získané simulací a naměřených hodnot

Naopak nižší efektivní hodnoty proudu jedné fáze (obr 8.15) a účíníku (obr. 8.16) dosahují data získaná simulací, než je tomu u reálného stroje.



Obr. 8.15 Porovnání efektivní hodnoty proudu jedné fáze získané simulací a naměřených hodnot



Obr. 8.16 Porovnání účinníku získaného simulací a naměřených hodnot

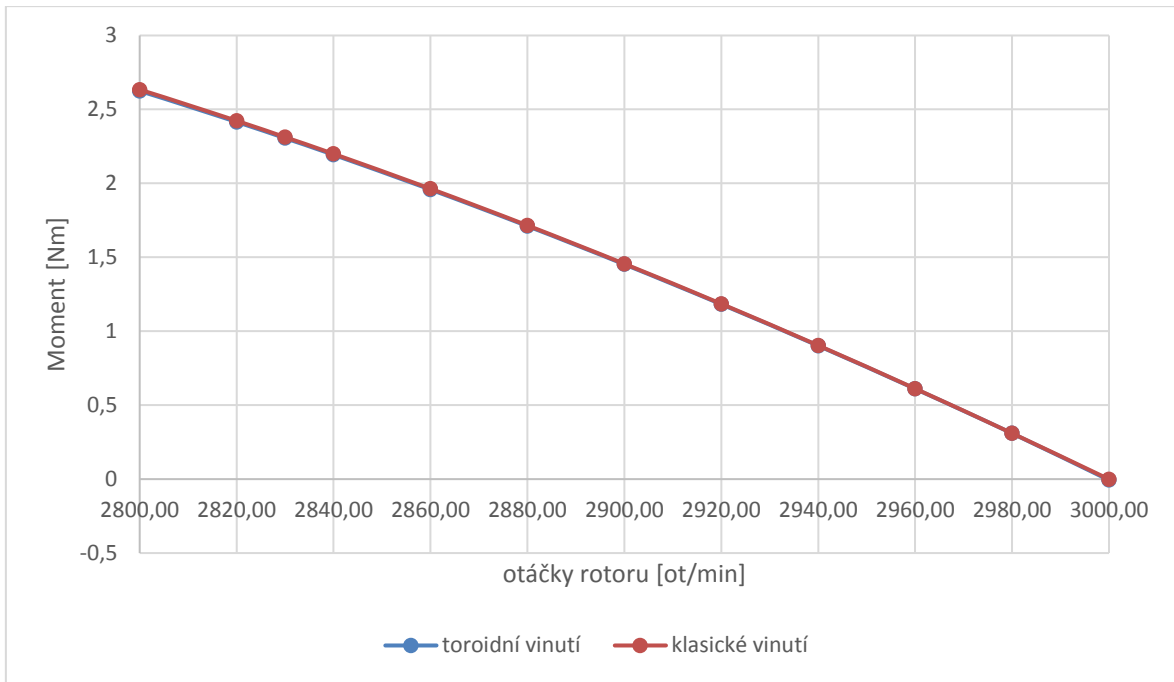
Vyšší účinnost stroje a vyšší moment na hřídeli lze přičítat nerespektováním ztrát třením a ventilačních ztrát. Jak je patrné z obr. 8.15, proud získaný simulací je velmi podobný změřené hodnotě, to lze přičítat správně nastavenému externímu obvodu statorového vinutí. Data jsou však reálnému stroji velmi blízká, 2D model lze tak považovat za správně sestavený.

Poznámka: Z reálných strojů s klasickým a toroidním vinutím byly záměrně vyndány těsnící kroužky, které způsobují velké ztráty třením. Lze očekávat, že pokud bych porovnával data získaná simulací a data změřená na strojích s těsnícími kroužky, byl by rozdíl podstatnější.

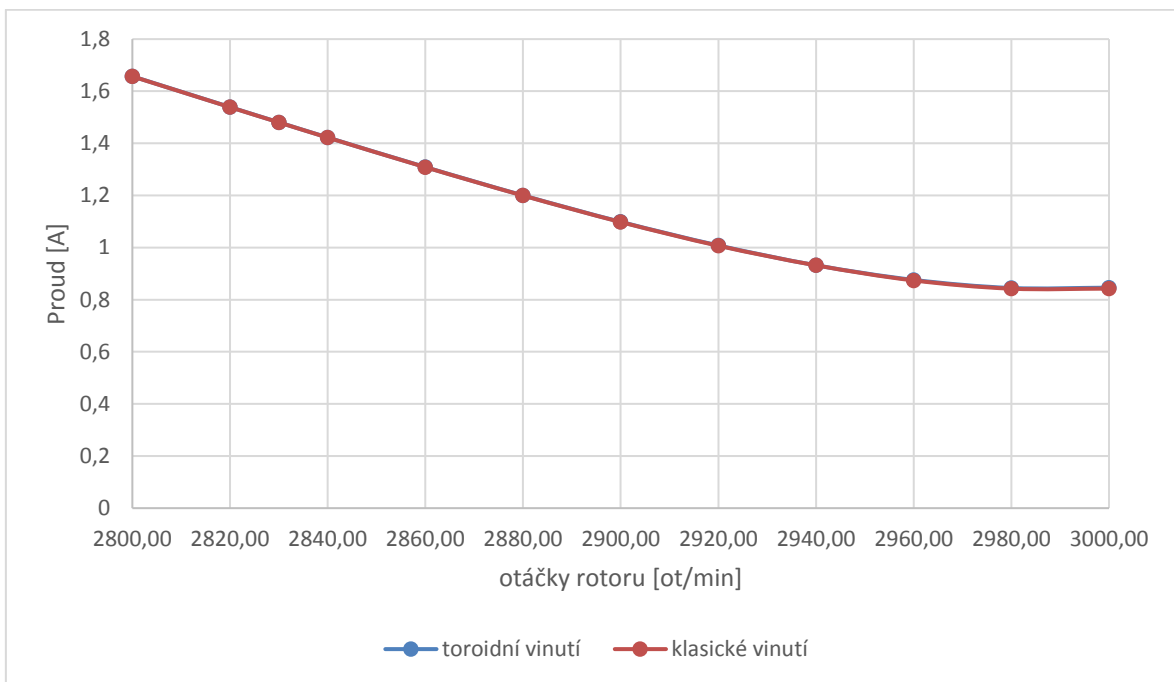
8.5 Porovnání strojů na základě simulací

Získané průběhy 2D simulací motoru TV22V525 s toroidním a klasickým vinutím jsou téměř shodné až na minimální výchylky. Jelikož jsou hodnoty odporu jedné fáze statorového vinutí velmi blízké, tento fakt jsem očekával. Magnetický tok se u obou simulovaných strojů uzavírá stejnou cestou, protože schéma statorového vinutí i geometrie stroje byla zachována. Jelikož je magnetický tok ve strojích identický, jsou hodnoty momentu získané simulací téměř identické (viz. obr. 8.17).

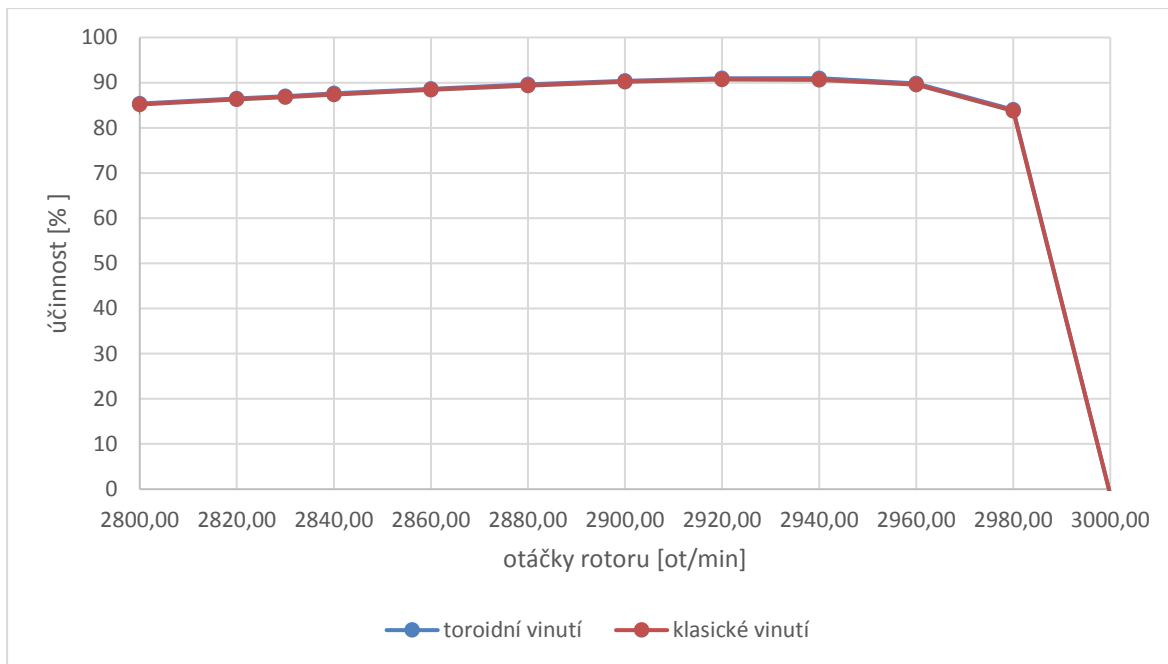
Měření stroje T22V525 s toroidním a klasickým vinutím poukázalo na malé změny v chování stroje. Simulací se však změna způsobu realizace statorového vinutí téměř neprojevila. Hodnoty z měření nelze předpokládat za zcela přesné. Hodnoty z měření jsou ovlivněny systematickými chybami, protože podmínky měření nejsou u obou strojů zcela identické. Motor s toroidním vinutím není například osazen ventilátorem na hřídeli, který způsobuje ventilační ztráty. Hodnoty získané simulací nejsou těmito faktory nijak ovlivněny.



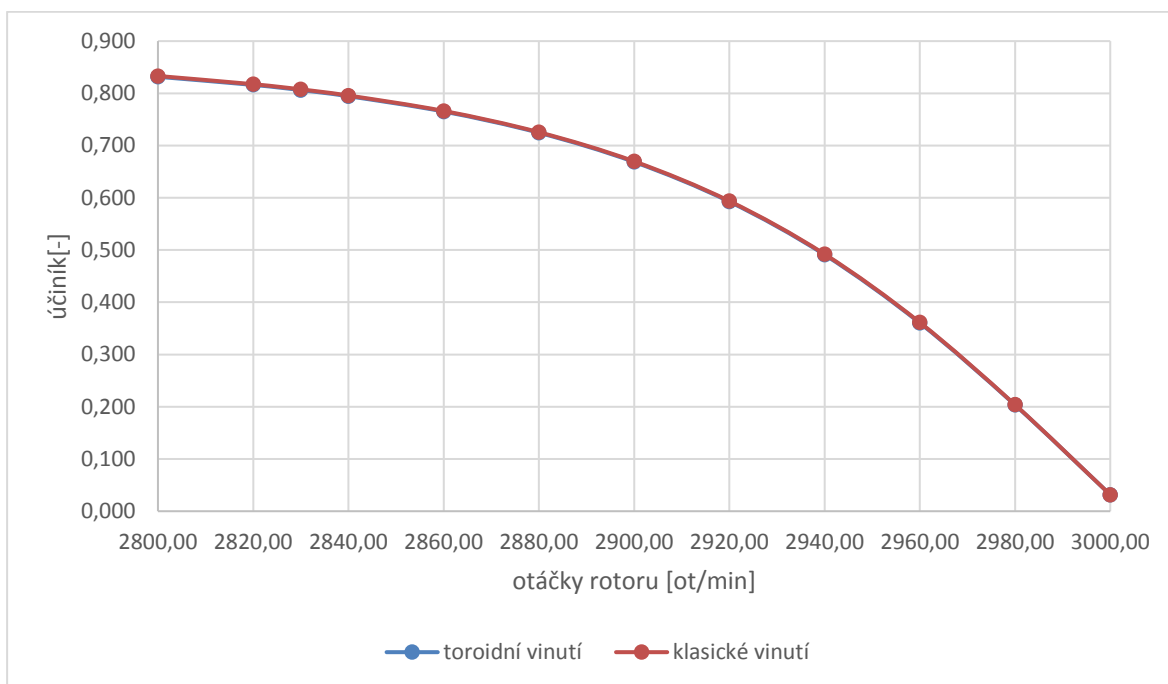
Obr. 8.17 Porovnání momentu toroidně a klasicky vinutého motoru T22V525



Obr. 8.18 Porovnání efektivní hodnoty proudu jedné fáze toroidně a klasicky vinutého motoru T22V525



Obr. 8.19 Porovnání účinnosti toroidně a klasicky vinutého motoru T22V525



Obr. 8.20 Porovnání účinníku toroidně a klasicky vinutého motoru T22V525

Dle simulací dosahuje toroidně vinutý motor nepochybně lepších výsledků co se účinností týče. Při jmenovitých otáčkách (2830ot/min) má toroidně vinutý motor o 0,26% vyšší účinnost, a to i přesto, že má toroidní vinutí vyšší odpor než varianta s konvenčním vinutím. Domnívám se, že celková rozptylová reaktance toroidního vinutí u 2D modelu je nižší než u klasického vinutí. U reálného stroje je tomu pravděpodobně naopak, tedy toroidně vinutý motor má vyšší rozptylovou reaktanci než klasicky vinutý motor. To je pravděpodobně zapříčiněno tím, že mezi vnějšími stranami cívek toroidních cívek a statorovým paketem je vložen plastový prstenec s tloušťkou materiálu mezi paketem a drážkou cca 0,5mm. Kdežto u modelu vnější strana cívek doléhá těsně na statorový paket.

9. Závěr

V této diplomové práci jsem na základě literatury stručně popsal funkci a konstrukční uspořádání asynchronního stroje, popsal základní typy statorového vinutí a uvedl nezbytné znalosti z teorie mnohofázových vinutí. Dále jsem stručně uvedl základy teorie řešení okrajových úloh v elektromagnetickém poli pomocí metody konečných prvků a aplikaci této metody v počítačových simulacích.

Cílem této práce bylo porovnat vlastnosti asynchronních strojů s konvenčním a toroidním provedením statorového vinutí. Objektem mého zkoumání byl motor sériově vyráběný společností ATAS elektromotory Náchod a.s. s označením T22V525. Jedná se o 3-fázový asynchronní motor s kotvou nakrátko. Porovnání strojů jsem provedl jak pomocí 2D modelování strojů, tak měřením na obou reálných strojích.

Pro účely měření jsem zhotovil toroidně vinutý motor. Do původního statorového paketu jsem navinul toroidní vinutí o stejném počtu závitů a vodičem stejného průměru jaký byl u konvenčně vinutého stroje T22V525. Pro toroidně vinutý motor jsem použil stejné komponenty motoru T22V525 s výjimkou kostry, kterou jsem kvůli toroidním cívkám na vnějším obvodu stroje nemohl použít. Pro toroidní motor jsem navrhl a vyrobil díly pro upevnění vík motoru a vedení toroidního vinutí. Konstrukce nahrazující originální kostru jsem navrhl a poté vytiskl na 3D tiskárně z plastu. Geometrie magnetického obvodu zůstala u toroidního vinutého stroje zachována, změnou statorového vinutí byly pozměněny pouze parametry příslušející tomuto vinutí, tedy odpor a rozptylová reaktance.

Měřením jsem zjistil, že hodnoty činných odporů obou typů porovnávaných vinutí jsou si velmi blízké. Pro toroidní motor je činný odpor jedné fáze vinutí $11,98\Omega$ a u klasicky vinutého $11,78\Omega$. Téměř shodné hodnoty odporů jsem očekával dle provedeného výpočtu založeného na délce použitého vodiče vinutí. Z toho plyne, že geometrie použitého stroje T22V525 není pro aplikaci toroidního vinutí z hlediska snížení ohmického odporu vinutí, vhodná. Toroidně vinutý motor však dosahuje, dle výpočtů, zhruba poloviční rozptylovou reaktanci čel vinutí. Výhoda toroidně vinutého stroje tkví ve zkrácení výšky čel, čímž se dá dosáhnout osově kratšího stroje. U toroidně navinutého stroje T22V525 se zkrátila délka statorového paketu spolu s vinutím zhruba o 28% oproti konvenčně vinutému stroji.

Při měření dosahoval toroidně navinutý motor nižší účinnosti než tomu bylo u klasicky vinutého stroje. Tento fakt se dal předpokládat, protože odpor vinutí statoru je u klasicky vinutého stroje menší. Protože jsou parametry obou strojů velmi podobné, byly i naměřené hodnoty velmi podobné. Odchylyky při měření mohly být způsobeny systematickou chybou zatěžující měření, např. absencí ventilátoru u toroidně vinutého stroje.

2D modely strojů jsem vytvořil v softwaru ANSYS, s nímž jsem simuloval chování strojů pro různé otáčky rotoru. 2D modely zanedbávají některé faktory ovlivňující chování stroje, například zešikmení drážek rotoru, ztráty třením v ložiskách a ventilační ztráty ventilátoru. I přes toto zjednodušení dosahoval 2D model klasicky vinutého stroje srovnatelných hodnot s hodnotami naměřených na reálném stroji. Hodnoty momentu, a tím pádem i účinnosti, jsou při 2D simulaci stroje vyšší, než hodnoty naměřené. Je to logické, protože 2D model nepočítá se ztrátami, které vznikají mimo magnetický obvod.

Simulací strojů T22V525 s toroidním a klasickým vinutím jsem zjistil, že výsledné průběhy získané simulací jsou u obou strojů až na malé výchyly téměř identické. Magnetický tok se u obou strojů uzavírá stejnou cestou, protože geometrie magnetického obvodu je totožná a bylo dodrženo i stejné schéma vinutí jako u klasicky vinutého stroje. I přesto, že hodnoty odporu a rozptylové indukčnosti čel statorového vinutí jsou odlišné, získané hodnoty sledovaných veličin jsou si velmi blízké. Toroidní motor dosahuje nepatrně vyšší účinnosti (cca o 0,25%), vyšších proudů a momentu

než je tomu u konvenčně vinutého stroje. U toroidně vinutého stroje se snížila rozptylová reaktance čel a domnívám se, že se snížila i celková rozptylová reaktance statorového vinutí. Snížení rozptylové reaktance statorového vinutí u toroidního stroje má za následek vyšší účinnost stroje i přesto, že odpor jeho vinutí je vyšší. U reálného stroje je však výsledek opačný. Domnívám se, že rozptylová indukčnost zde vzrostla důsledkem plastového obložení mezi vnější stranou toroidních cívek a paketem statoru.

I přesto, že toroidně i klasicky vinutý motor dosahovaly téměř identických vlastností, jsou některé výhody toroidně vinutého motoru zřejmé. Toroidně vinuté stroje mohou oproti konvenčnímu vsypávanému vinutí dosahovat vyššího koeficientu plnění drážky. Vodiče toroidní cívky na sebe doléhají velmi těsně, protože jednotlivé závity těsně obepínají magnetický obvod stroje a při realizaci vinutí je možné jednotlivé závity lépe dotáhnout. Při stejném počtu vodičů v drážce lze pro toroidní cívku použít vodič o větším průměru a snížit tak ztráty ve vinutí. Další výhodou je zkrácení čel vinutí, čímž se dá podstatně zkrátit celková délka stroje. Takový motor lze například s výhodou umístit do nábojů kol.

Výhody toroidně vinutého motoru vyniknou zejména u aplikací, kde je požadován motor s krátkou délkou osy a velkým průměrem rotoru. Podstatné zkrácení délky čel vinutí u takovéto geometrie stroje oproti konvenčně vinutému stroji dává dobrý předpoklad k dosažení vyšší účinnosti.

Seznam použitých zdrojů

- [1] V. Měřička, J. Hamata a P. Voženílek, *Elektrické stroje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [2] J. Pavelka, J., Zděnek, *Elektrické pohony a jejich řízení*, 2. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2015.
- [3] Josef Šimon, časopis “Elektro,” pp. 36–43, únor 2011.
- [4] J. Javůrek, *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada Publishing, 2003.
- [5] G.N. Petrov., *Elektrické stroje 2*, Academia Praha, 1982.
- [6] H. Sequenz, *Technologie vinutí el. strojů točivých*, SNTL, 1980.
- [7] H. T., *Analýza a porovnání rozložení magnetického pole v třífázovém a vícefázovém asynchronním stroji* ČVUT, 2016.
- [8] V. H. J. Pyrhonen, T. Jokinen, *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons, 2009.
- [9] I. P. Kypolov. a kolektiv, *Stavba elektrických strojů*, 1. vydání. Praha: SNTL, 1988.
- [10] G. Cafici, *US3394276A*, 1968.
- [11] B. B. Jensen, A. G. Jack, G. J. Atkinson, and B. C. Mecrow, *Performance of a folded-strip toroidally wound induction machine*, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 5, pp. 2217–2226, 2012.
- [12] I. Performance, *Two-phase induction machine with toroidal winding and improved performance*, no. 4, pp. 137–142, 2012.
- [13] D. Mayer, *Aplikovaný elektromagnetismus*, 2. vydání. České Budějovice: KOPP, 2012.
- [14] D. L. Logan, *A first course in element method*, 5. vydání. CENGAGE Learning, 2011.
- [15] S. S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, 5. vydání. Butterworth-Heinemann, 2011.
- [16] J. N. Reddy, *An Introduction to the Finite Element Method*, 4. vydání. McGraw-Hill Education, 2018.
- [17] V. Kindl, *Modelování polí v elektrických strojích* 2008. [Online]. Available: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=13491. [citováno: 20.4.2019].
- [18] R. Brázda Miroslav a Staňa, *Výpočet asynchronního motoru*, Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, Brno, 1973.
- [19] “ANSYS Maxwell.” [Online]. dostupné z: <https://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell>. [citováno: 15.5.2019].
- [20] “ANSYS RMXprt.” [Online]. dostupné z: <https://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-RMXprt>. [citováno: 15.5.2019].
- [21] T.A. Lipo *Introduction to AC Machine Design*. Madison: University of Wisconsin, 1996

- [22] J. Štěpina, *Prostorové fázory jako základ teorie elektrických strojů*. Plzeň: Fakulta elektrotechnická ZČU, 1993
- [23] B. B. Jensen, A. G. Jack, *Toroidally Wound Induction Machines*, proc 19th ICEM, Italy, 2010
- [24] K. Sakai, M. Suzuki, K. Takishima, *Induction Machines with Novel concentrated Windings*, 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, 2017

Seznam použitých symbolů a zkratek

$2p$ – počet pólů

a_S – počet paralelních větví statorového vinutí

B – magnetická indukce

D_1 – roztečný průměr cívky

D_{vod} – poloměr použitého vodiče

d_{vzduch} - světlost vzduchové mezery

f_S – napájecí frekvence statoru

f_R – rotorová frekvence

f – kmitočet magnetického pole podél vzduchové mezery

\hat{I}_S – fázor proudu statoru

\hat{I}_R – fázor proudu rotoru

I'_R – proud rotoru přepočtený na stator

\hat{I}_μ – magnetizačního proudu

k_{vR} – činitel vinutí rotoru

k_{vS} – činitel vinutí statoru

k_{pln} – koeficient plnění drážky

$k_{l\check{c}}$ – koeficient pro výpočet délky čela

k_γ – činitel natočení drážky

k_r - činitel rozlohy

k_y – činitel kroku

l – délka aktivního vodiče/ délka statorového paketu

$l_{\check{c}}$ – délka čela

l_v – střední délka vodiče

l_{fS} – celková délka závitů jedné statorové fáze

m – počet fází

m_S – počet fází statoru

m_R – počet fází rotoru

N – počet závitů

N_R – počet závitů jedné cívky rotorové fáze
 N_S – počet závitů jedné cívky statorové fáze
 p – počet pólových dvojic
 q - počet drážek na pól a fázi
 Q – počet drážek
 Q_S – počet drážek statoru
 Q_R – počet drážek rotoru
 R_S – odpor vinutí statoru
 R_R – odpor vinutí rotoru
 R'_R – odpor rotoru přepočtený na stator
 R_{fS} - odpor vinutí jedné statorové fáze
 s – skluz
 $S_{dražky}$ – povrch statorové drážky
 S_V – průřez vodiče
 u_i – indukované napětí v cívce
 u_z – napětí indukovaného v závitu
 \hat{U}_S – fázor napětí statoru
 \hat{U}_R – fázor napětí rotoru
 \hat{U}_{iR} – fázor indukovaného napětí rotoru
 \hat{U}_{iS} – fázor indukovaného napětí statoru
 U'_R – napětí rotoru přepočtené na stator
 \hat{U}_l – fázor indukovaného napětí
 v – rychlost, kterou se cívka v magnetickém poli pohybuje
 V_{dS} – počet vodičů v drážce
 $X_{S\sigma}$ – rozptylová reaktance statoru
 $X_{R\sigma}$ – rozptylová reaktance rotoru
 X'_R – reaktance rotoru přepočtená na stator
 X_h – hlavní (magnetizační) reaktance
 X_C – reaktance prostoru čel
 $X_{čelS}$ – statorová reaktance čel

γ - cívkový krok

γ_{1c} – mechanický krok cívky v počtu drážkových roztečí

λ_c – jednotková vodivost prostoru čel

σ_{Cu} – měrný elektrický odpor mědi

τ_p – pólová rozteč

Φ – magnetický indukční tok

ω – otáčivý rychlost rotoru

ω_s – úhlová rychlost točivého magnetického pole

ω_{rel} – relativní rychlost rotoru vůči statoru

Zkratky:

MKP–metoda konečných prvků

PWM–pulzně-šířková modulace

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Klecová kotva (převzato z [1]).....	13
Obr. 2.2 Řez asynchronním motorem s klecovým vinutím (převzato z [1]).....	14
Obr. 2.3 Náhradní schéma asynchronního motoru.....	16
Obr. 2.4 Vektorový diagram asynchronního stroje.....	16
Obr. 3.1 Znárodnění cívky.....	17
Obr. 3.2 Cívka o jednom závitu se zkráceným krokem (převzato z [5]).....	18
Obr. 3.3 Závit v sinusovém magnetickém poli (převzato z [1]).....	19
Obr. 3.4 Znárodnění činitele kroku vinutí pro zkrácený krok cívky (převzato z [8]).....	20
Obr. 3.5 Vinutí uložené do tří sousedních drážek (převzato z [1]).....	21
Obr. 3.6 Fázorový diagram výpočtu činitele rozlohy (převzato z [1]).....	21
Obr. 3.7 Natočení rotorové drážky (převzato z [9]).....	22
Obr. 3.8 Trojfázové vinutí s 6 drážkami (převzato z [8]).....	23
Obr. 3.9 Provedení trojfázového vinutí pro 6 drážek (převzato z [8]).....	24
Obr. 3.10 Jednovrstvé soustředné vinutí s $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [9]).....	24
Obr. 3.11 Jednovrstvé soustředné vinutí s čely uloženými ve třech patrech s $Q=48$ a $2p=4$ (převzato z [9]).....	25
Obr. 3.12 Jednovrstvé soustředné vinutí s lichoběžníkovými pólpárovými cívkami pro $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [9]).....	25
Obr. 3.13 Jednovrstvé soustředné vinutí s lichoběžníkovými pólovými cívkovými skupinami pro $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [9]).....	26
Obr. 3.14 Jednovrstvé smyčkové vinutí s cívkami stejného tvaru s plným krokem $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [5]).....	26
Obr. 3.15 Jednovrstvé vlnové vinutí s $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [5]).....	27
Obr. 3.16 Jednovrstvé vinutí smyčkové vinutí stejného kroku pro dělený stator s $Q=24$ a $2p=4$ (převzato z [5]).....	27
Obr. 3.17 Dvouvrstvé smyčkové vinutí se zkráceným krokem o jednu drážkovou rozteč statoru (převzato z [5]).....	28
Obr. 3.18 Toroidní vinutí asynchronního stroje s kotvou nakrátko (převzato z [12]).....	29
Obr. 4.1 Definiční oblast okrajové úlohy (převzato z [13]).....	32
Obr. 4.2 Obr. 3.2 a) vnitřní a b) vnější okrajová úloha (převzato z [13]).....	32
Obr. 4.3 Triangulace oblasti Ω s okrajovou podmínkou Γ (převzato a upraveno z [13]).....	33
Obr. 5.1 Štítek stroje T22V525.....	35
Obr. 5.2 Schéma vinutí motoru T22V525.....	35
Obr. 6.1 Statorový paket s plastovým prstencem pro toroidní vinutí.....	38
Obr. 6.2 Provedení toroidního vinutí pro motor T22V525.....	39
Obr. 6.3 Porovnání délky čel a) konvenčně navinutého stroje a b) toroidně navinutého stroje.....	39
Obr. 6.4 Mezikruží upevňující víko toroidně vinutého motoru.....	40
Obr. 6.5 Sestava toroidně vinutého stroje.....	41
Obr. 7.1 Vzdálenost protilehlých drážek toroidní cívky.....	43
Obr. 7.2 Stanovení délky čela toroidního vinutí.....	43
Obr. 7.3 Účinnost v závislosti na otáčkách pro klasicky a toroidně vinutý motor (získáno měřením).....	46
Obr. 7.4 Moment v závislosti na otáčkách pro klasicky a toroidně vinutý motor (získáno měřením).....	46
Obr. 7.5 Efektivní hodnota proudu jedné fáze vinutí v závislosti na otáčkách pro klasicky a toroidně vinutý motor (získáno měřením).....	47
Obr. 8.1 Karty modulu RMxpřt.....	48
Obr. 8.2 Nastavení karty "machine".....	49
Obr. 8.3 Nastavení BH křivky materiálu M800-50A.....	49
Obr. 8.4 Nastavení rozměrů statorové drážky.....	50
Obr. 8.5 Nastavení rozměrů rotorové drážky.....	50

Obr. 8.6 Nastavení karty statorového vinutí.....	51
Obr. 8.7 Externí elektrický obvod statorového vinutí	52
Obr. 8.8 Podoba 2D geometrie toroidního stroje	53
Obr. 8.9 Průběhy proudů klasicky vinutého stroje pro $n=2830\text{ot/min}$	54
Obr. 8.10 Průběh momentu klasicky vinutého stroje pro $n=2830\text{ot/min}$	54
Obr. 8.11 Znáornění proložení sinusoidou, kde a) jsou body vzorků a b) je nalezené proložení... 55	
Obr. 8.12 Průběh momentu pro posledních 10ms simulace klasicky vinutého stroje pro $n=2830\text{ot/min}$	56
Obr. 8.13 Porovnání momentu získaných simulací a naměřených hodnot	56
Obr. 8.14 Porovnání účinnosti získané simulací a naměřených hodnot.....	57
Obr. 8.15 Porovnání efektivní hodnoty proudu jedné fáze získaného simulací a naměřených hodnot	57
Obr. 8.16 Porovnání účinníku získaného simulací a naměřených hodnot	58
Obr. 8.17 Porovnání momentu toroidně a klasicky vinutého motoru T22V525	59
Obr. 8.18 Porovnání efektivní hodnoty proudu jedné fáze toroidně a klasicky vinutého motoru T22V525	59
Obr. 8.19 Porovnání účinnosti toroidně a klasicky vinutého motoru T22V525.....	60
Obr. 8.20 Porovnání účinníku toroidně a klasicky vinutého motoru T22V525	60

Seznam tabulek

Tab. 5.1 Základní parametry motoru T22V525.....	36
Tab. 5.2 Parametry náhradního schématu pro klasicky vinutý motor.....	36
Tab. 6.1 Výška čel statorových vinutí měřená od statorového paketu.....	40
Tab. 7.1 Porovnání odporů různých typů vinutí.....	44
Tab. 7.2 Rozptylové reaktance čel toroidního a klasického vinutí.....	45
Tab. 8.1 Parametry náhradního schématu vypočtené v RMXprt.....	51

Obsah přiloženého DVD

Adresáře:

/doc	Text bakalářské práce ve formátu pdf
/Prihola_A	Dokumentace motoru poskytnutá firmou ATAS elektromotory Náchod a.s.
/Prihola_B	Tabulky z měření strojů při sníženém napětí a frekvenci xlxs
/Prihola_C	Tabulka měření stroje T22V525 při jmenovitém napětí a frekvenci ve formátu xlxs
/Prihola_D	Průběhy získané 2D simulací motoru s konvenčním vinutím ve formátu csv
/Priloha_E	Průběhy získané 2D simulací motoru s toroidním vinutím ve formátu csv
/ANSYS	Modelační soubory vytvořené v ANSYS Electronics Desktop 2019 R1
/MATHEMATICA	Skript pro analýzu průběhů sledovaných veličin vytvořený ve softwaru Wolfram Mathematica

Seznam příloh

Příloha A

Příloha A 1 Dokumentace statorového plechu	73
Příloha A 2 Dokumentace provedení rotoru.....	74
Příloha A 3 Dokumentace rotorového plechu	75

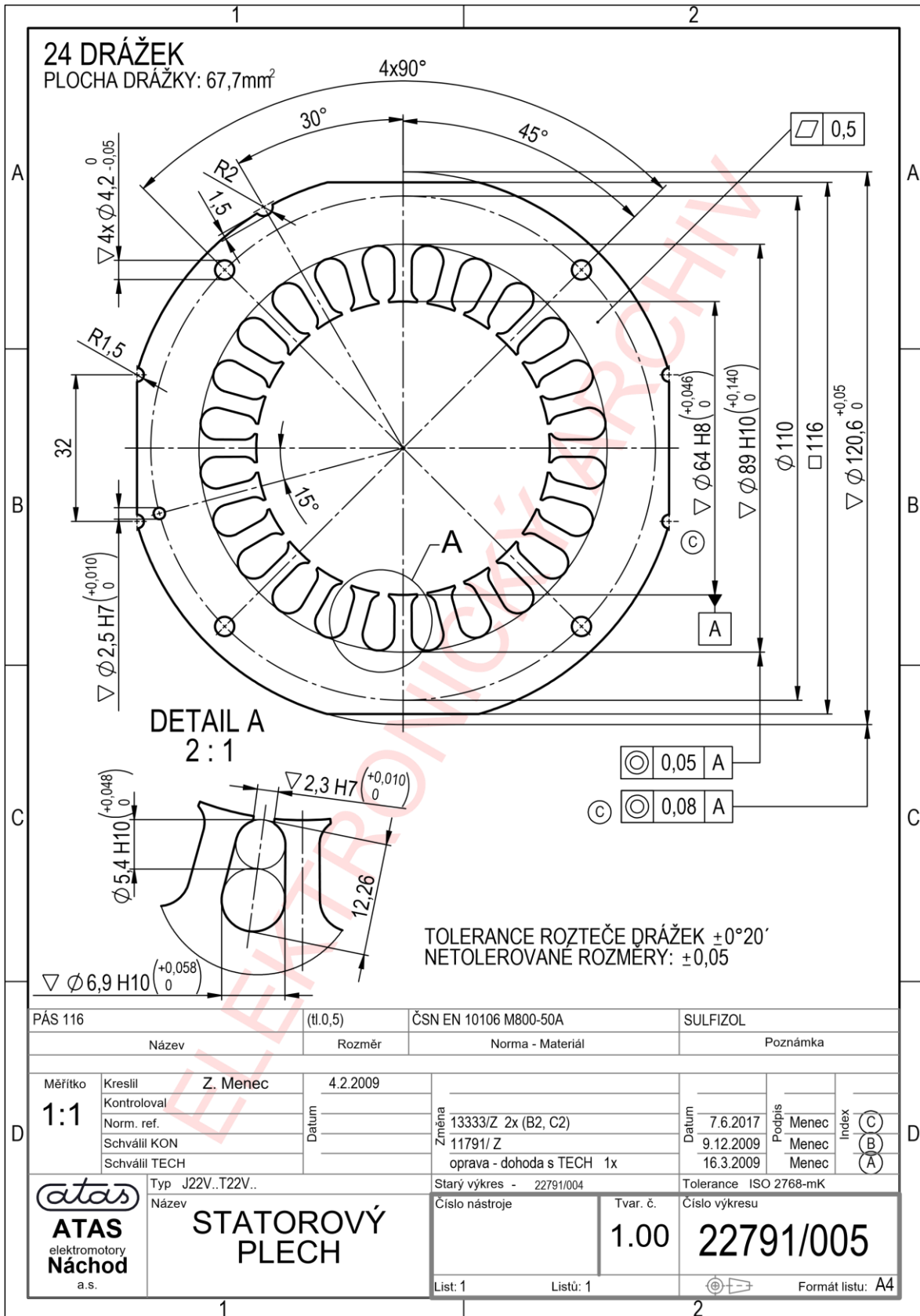
Příloha B

Příloha B 1 Data z měření pro klasické vinutí.....	76
Příloha B 2 Data z měření pro toroidní vinutí	77

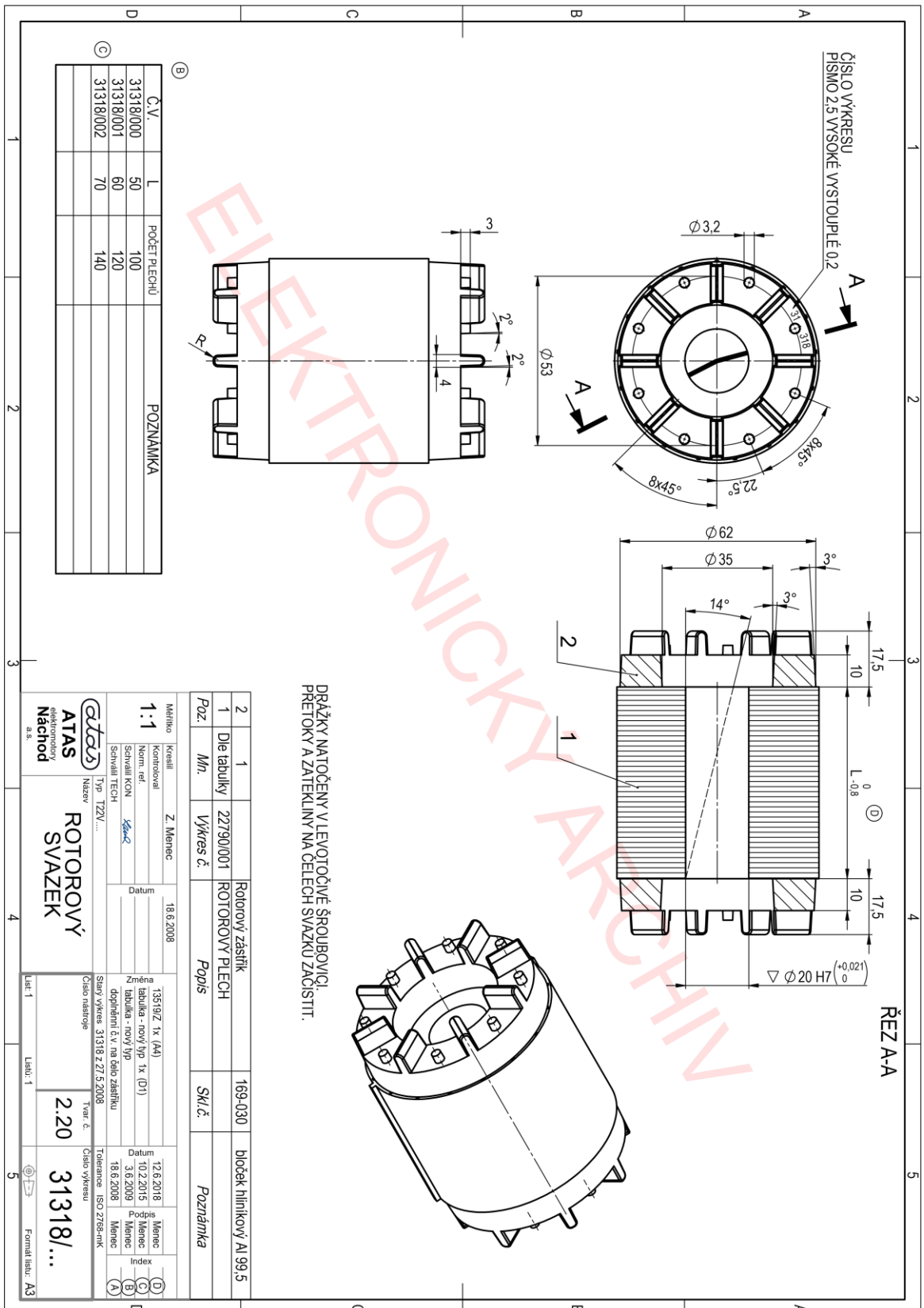
Příloha C

Příloha C 1 Data z měření motoru T22V525 bez těsnícího kroužku.....	78
---	----

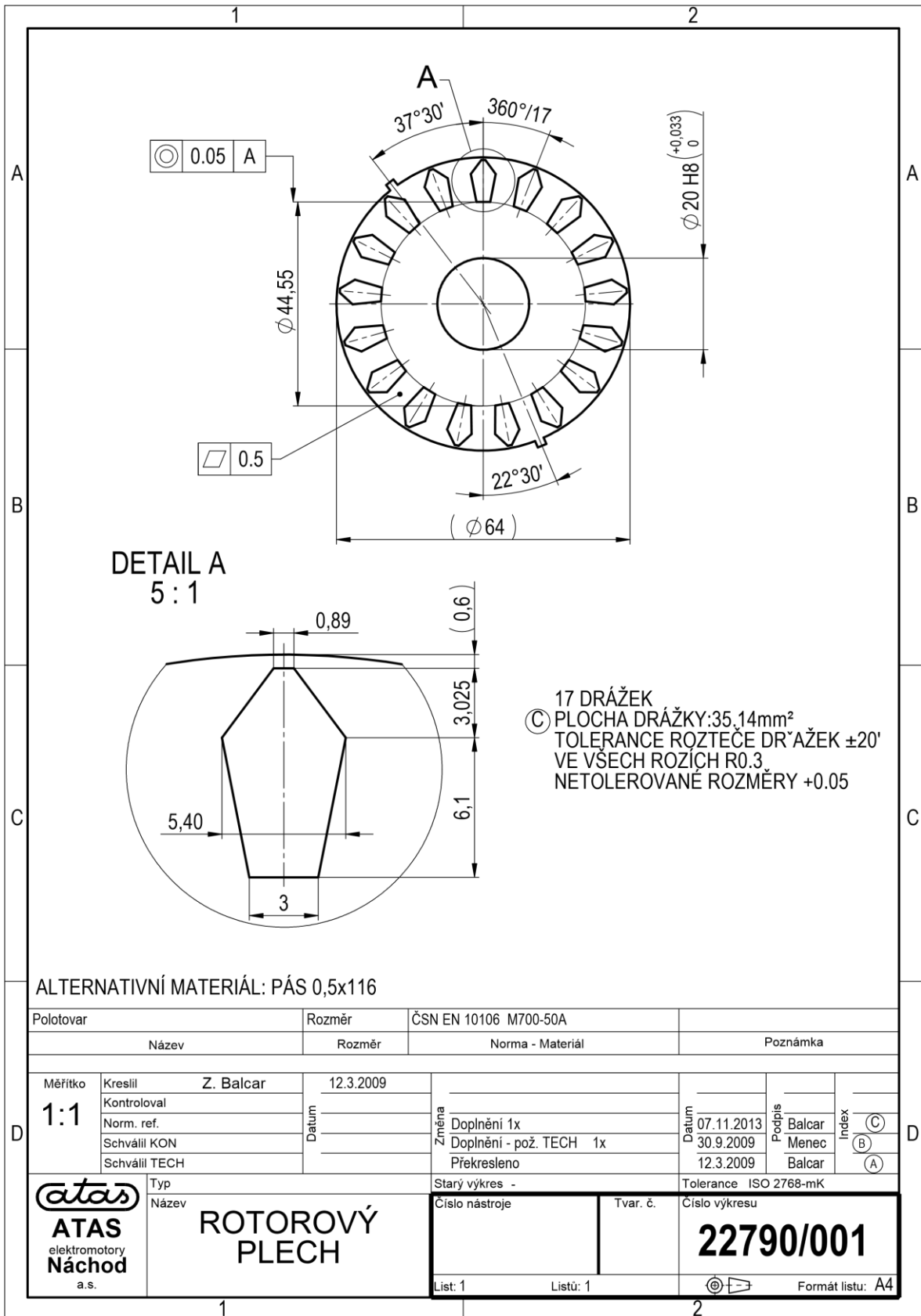
Příloha A



Příloha A 1 Dokumentace statorového plechu



Príloha A 2 Dokumentace provedení rotoru



Příloha A 3 Dokumentace rotorového plechu

Příloha B

n [ot/min]	skluz [-]	n [rad/s]	M [Nm]	U [V]	I [A]	ϕ [°]	účinník [-]	P _{elek} [W]	P _{mech} [W]	účinnost [%]
1492,3	0,50257	156,19	0,02	166,00	0,50	83,05	0,12	30,35	2,34	7,72
1500	0,50000	157,00	-0,05	166,00	0,51	85,62	0,08	19,59	-8,32	-42,48
1480	0,50667	154,91	0,12	166,00	0,51	79,31	0,19	47,18	18,28	38,74
1460	0,51333	152,81	0,28	166,00	0,54	74,11	0,27	73,88	42,02	56,88
1440	0,52000	150,72	0,41	166,00	0,59	70,71	0,33	97,43	62,25	63,89
1420	0,52667	148,63	0,54	166,00	0,65	68,54	0,37	119,55	79,81	66,76
1400	0,53333	146,53	0,65	166,00	0,72	67,07	0,39	141,16	94,81	67,16
1380	0,54000	144,44	0,75	166,00	0,80	66,14	0,40	161,34	108,33	67,14
1360	0,54667	142,35	0,84	166,00	0,87	65,51	0,41	180,70	119,71	66,25
1340	0,55333	140,25	0,93	166,00	0,95	65,07	0,42	199,22	130,44	65,47
1320	0,56000	138,16	1,01	166,00	1,02	64,75	0,43	216,46	138,99	64,21
1300	0,56667	136,07	1,07	166,00	1,09	64,54	0,43	233,11	145,46	62,40
1280	0,57333	133,97	1,13	166,00	1,15	64,38	0,43	248,10	151,26	60,97
1260	0,58000	131,88	1,18	166,00	1,21	64,26	0,43	261,72	155,35	59,36
1240	0,58667	129,79	1,23	166,00	1,27	64,19	0,44	274,92	158,99	57,83
1220	0,59333	127,69	1,27	166,00	1,33	64,13	0,44	287,79	161,79	56,22
1200	0,60000	125,60	1,30	166,00	1,38	64,09	0,44	299,60	163,28	54,50
1180	0,60667	123,51	1,33	166,00	1,42	64,04	0,44	310,08	164,14	52,93
1160	0,61333	121,41	1,36	166,00	1,47	64,02	0,44	320,00	164,76	51,49
1140	0,62000	119,32	1,38	166,00	1,51	64,01	0,44	329,51	164,30	49,86

Příloha B 1 Data z měření pro klasické vinutí

n [ot/min]	skluz [-]	n[rad/s]	M [Nm]	U [V]	I[A]	ϕ [°]	účinník [-]	P _{elek} [W]	P _{mech} [W]	účinnosť t [%]
1495	0,50167	156,48	-0,01	166,00	0,52	83,89	0,11	27,75	-1,88	-6,77
1500	0,50000	157,00	-0,06	166,00	0,53	85,83	0,07	19,24	-10,05	-52,22
1480	0,50667	154,91	0,11	166,00	0,52	79,72	0,18	46,56	16,88	36,26
1460	0,51333	152,81	0,25	166,00	0,55	75,17	0,26	70,09	38,36	54,72
1440	0,52000	150,72	0,38	166,00	0,60	71,79	0,31	93,02	57,42	61,73
1420	0,52667	148,63	0,50	166,00	0,66	69,68	0,35	113,75	74,31	65,33
1400	0,53333	146,53	0,60	166,00	0,72	68,33	0,37	132,64	87,92	66,28
1380	0,54000	144,44	0,70	166,00	0,79	67,36	0,38	151,19	100,53	66,49
1360	0,54667	142,35	0,78	166,00	0,85	66,77	0,39	168,16	111,17	66,11
1340	0,55333	140,25	0,86	166,00	0,92	66,37	0,40	184,26	119,92	65,08
1320	0,56000	138,16	0,92	166,00	0,99	66,10	0,41	199,11	127,25	63,91
1300	0,56667	136,07	0,98	166,00	1,05	65,92	0,41	213,13	133,21	62,50
1280	0,57333	133,97	1,03	166,00	1,10	65,80	0,41	225,73	137,99	61,13
1260	0,58000	131,88	1,08	166,00	1,16	65,73	0,41	238,05	142,03	59,67
1240	0,58667	129,79	1,12	166,00	1,21	65,69	0,41	248,65	144,84	58,25
1220	0,59333	127,69	1,15	166,00	1,26	65,68	0,41	258,33	146,46	56,70
1200	0,60000	125,60	1,18	166,00	1,31	65,69	0,41	268,13	147,96	55,18
1180	0,60667	123,51	1,22	166,00	1,37	65,77	0,41	279,12	150,06	53,76
1170	0,61000	122,46	1,22	166,00	1,38	65,75	0,41	282,44	149,28	52,85
1160	0,61333	121,41	1,23	166,00	1,40	65,73	0,41	285,43	148,85	52,15
1140	0,62000	119,32	1,24	166,00	1,43	65,77	0,41	292,66	148,08	50,60

Příloha B 2 Data z měření pro toroidní vinutí

Příloha C

n [ot/min]	skluz[-]	n[rad/s]	M [Nm]	U [V]	I[A]	ϕ [°]	účinník [-]	P_{elek} [W]	P_{mech} [W]	účinnost [%]
2994,00	0,00200	313,37	0,02	230,00	0,85	80,77	0,16	94,73	6,27	6,62
3000,00	0,00000	314,00	-0,08	230,00	0,85	83,60	0,11	65,59	-23,86	-36,38
2980,00	0,00667	311,91	0,26	230,00	0,86	73,39	0,29	171,04	79,54	46,50
2960,00	0,01333	309,81	0,55	230,00	0,91	64,59	0,43	270,08	169,16	62,63
2940,00	0,02000	307,72	0,86	230,00	0,97	55,96	0,56	377,38	264,95	70,21
2920,00	0,02667	305,63	1,14	230,00	1,06	50,03	0,64	472,19	348,11	73,72
2900,00	0,03333	303,53	1,42	230,00	1,16	44,97	0,71	569,75	431,32	75,70
2880,00	0,04000	301,44	1,68	230,00	1,27	40,97	0,76	663,30	506,42	76,35
2860,00	0,04667	299,35	1,92	230,00	1,37	37,86	0,79	751,47	573,85	76,36
2840,00	0,05333	297,25	2,13	230,00	1,46	35,61	0,81	827,36	632,56	76,45
2830,00	0,05667	296,21	2,21	230,00	1,51	34,76	0,82	857,43	653,14	76,17
2820,00	0,06000	295,16	2,32	230,00	1,56	33,71	0,83	899,92	684,77	76,09
2800,00	0,06667	293,07	2,49	230,00	1,66	32,29	0,85	969,92	730,91	75,36
2780,00	0,07333	290,97	2,68	230,00	1,76	31,04	0,86	1040,85	778,94	74,84

Příloha C 1 Data z měření motoru T22V525 bez těsnícího kroužku