

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a
komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Patrik Šatava



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VÝPOČET SYNCHRONNÍHO MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY O VÝKONU 50KW

CALCULATION OF 50KW PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Patrik Šatava

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Patrik Šatava

ID: 195441

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet synchronního motoru s permanentními magnety o výkonu 50kW

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s konstrukcí a vlastnostmi velkých synchronních strojů s PM.
2. Na základě literatury sestavte postup analytického výpočtu a s jeho pomocí proveďte výpočet parametrů zadaného motoru.
3. Připravte model stroje v programu Ansys, vypočítejte vlastnosti stroje pomocí MKP.
4. Na základě naměřených hodnot zhodnoťte přesnost analytického výpočtu a modelu stroje a proveďte úpravy pro snížení chyby.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PYRHONEN, Juha, JOKINEN, Tapani and HRABOVCOVA, Valerie. Design of Rotating Electrical Machines. 2nd edition. Wiley, 2013. 538 p. ISBN 978-1118581575.

[2] Hendershot, J. R. Jr., Miller, T.J.E. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Oxford: Magna Physic Publishing and Clarendon Press, 1994.

[3] PETROV, Georgij N. Elektrické stroje 2. Praha: Academia, 1982. 728 s.

[4] Časopisecké a konferenční články z databáze IEEE Xplore.

Dále dle pokynu vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá výpočtem synchronního stroje s permanentními magnety. V první části práce je popsán synchronní stroj obecně. Jedná se o teoretický základ, jehož znalost je klíčová pro další části této práce. V další části práce je sestaven analytický výpočet zadaného synchronního stroje s permanentními magnety. Zadaný stroj byl v době zadání práce již vyroben a je předlohou, kterou se řídí analytický výpočet. Výpočet je průběžně s tímto referenčním strojem porovnáván a vypočítané hodnoty parametrů jsou průběžně nahrazovány hodnotami z jeho dokumentace. Důvodem je snaha přizpůsobit výpočet tak, aby byly parametry jím získané shodné s referenčním strojem a mohlo být provedeno vyhodnocení přesnosti sestaveného výpočtu. Dále je proveden výpočet parametrů stroje v softwarech Ansys RMXprt a Ansys Maxwell 2D. Výpočty a simulace jsou poté porovnány s měřením daného stroje. V poslední části práce je provedena úprava výpočtu pro snížení chyby. Výsledky jsou závěrem práce zhodnoceny.

Klíčová slova

Synchronní stroj, výpočet elektrického stroje, elektromagnetický návrh, permanentní magnety, metoda konečných prvků

Abstract

This master's thesis deals with a permanent magnet synchronous machine calculation. In the first part of the thesis, the synchronous machine in general is described. Knowledge of these machines is essential for the remaining parts of the thesis. In the next part, an analytical calculation process of a given permanent magnet synchronous machine is presented. The given machine had already been manufactured before the thesis assignment. The calculation is to be adapted to the given machine. This way the parameters of the calculated machine should match the reference machine. The accuracy of the calculation can then be evaluated. Furthermore, calculations of the machine using Ansys RMXprt and Ansys Maxwell 2D are presented. The calculations are then compared with data obtained by measurements performed on the given machine. In the last part of the thesis, a modification in the analytical calculation is made to reduce the inaccuracy of the calculation. The thesis is concluded by evaluating the results.

Keywords

Synchronous machine, electrical machine calculation, electromagnetic design, permanent magnets, finite element method

Bibliografická citace:

ŠATAVA, Patrik. Výpočet synchronního motoru s permanentními magnety o výkonu 50kW. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133207>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Ondřej Vítek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Bc. Patrik Šatava*

VUT ID studenta: *195441*

Typ práce: *Diplomová práce*

Akademický rok: *2020/21*

Téma závěrečné práce: *Výpočet synchronního motoru s permanentními magnety o výkonu 50kW*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce, doc. Ing. Ondřeji Vítkovi, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Dále děkuji firmě EXMONT-Energo a.s., díky které byl umožněn vznik této diplomové práce, za poskytnutí dokumentace a dalších podkladů k jejich synchronnímu stroji s permanentními magnety, který je předmětem řešení této diplomové práce.

Velmi bych chtěl poděkovat také firmě Control Techniques Brno s.r.o., především jejímu zaměstnanci Ing. Janovi Egerlemu, za pomoc při uvádění motoru do chodu s frekvenčním měničem Unidrive M700.

V Brně dne:

.....
podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	12
1. ÚVOD.....	13
2. SYNCHRONNÍ STROJE.....	14
2.1. Synchronní stroj obecně	14
2.2. Princip činnosti	14
2.3. Rozdělení synchronních strojů	15
2.4. Náhradní obvodové schéma synchronního stroje	16
2.5. Zatěžování synchronního stroje.....	17
2.6. Synchronní motor	18
2.7. Systém d - q os.....	18
2.8. Synchronní stroje s permanentními magnety	18
3. VÝPOČET SYNCHRONNÍHO STROJE.....	21
3.1. Parametry stroje.....	21
3.2. Rozměry rotoru.....	22
3.3. Vzduchová mezera a délka jádra	24
3.4. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	25
3.5. Návrh statorového vinutí	25
3.6. Rozměry statorové drážky	32
3.7. Magnetická napětí, j ha statoru a rotoru, výška permanentních magnetů	35
3.8. Iterace magnetické indukce ve vzduchové mezeře.....	50
3.9. Odpor statorového vinutí	56
3.10. Magnetizační indukčnost	57
3.11. Rozptylové indukčnosti, indukčnosti v osách d a q	58
3.12. Ztráty ve stroji.....	63
3.13. Zátěžný úhel stroje, proudy v osách d a q	69
3.14. Účinnost a účinník stroje	71
3.15. Fázorový diagram stroje	71
3.16. Dopčet hmotností ostatních částí stroje	72
3.17. Závislost momentu na zátěžném úhlu.....	73
4. VÝPOČET V ANSYS RMXprt	75
5. VÝPOČET V ANSYS MAXWELL 2D	78

6.	MĚŘENÍ MOTORU.....	83
6.1.	Údaje vybavení měřicího pracoviště	83
6.2.	Popis měření stroje	85
6.3.	Naměřené hodnoty.....	87
6.4.	Vyhodnocení naměřených hodnot	91
7.	SNÍŽENÍ CHYBY VÝPOČTU – ZTRÁTY V PERMANENTNÍCH MAGNETECH.....	98
7.1.	Magnetická indukce mezi zuby statoru	99
7.2.	Výpočet ztrát v permanentních magnetech	104
7.3.	Ztráty způsobené první drážkovou harmonickou magnetické indukce	104
7.4.	Ztráty způsobené druhou a vyššími drážkovými harmonickými magnetické indukce	107
7.5.	Celkové ztráty v permanentních magnetech.....	110
8.	ZÁVĚR.....	112
	LITERATURA A DALŠÍ ZDROJE	115
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	117
	SEZNAM PŘÍLOH	130

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1: Náhradní obvodové schéma synchronního stroje	16
Obr. 2-2: Zjednodušené náhradní obvodové schéma (velkého) synchronního stroje	17
Obr. 2-3: Různé konstrukce synchronních strojů s permanentními magnety	20
Obr. 3-1: Typ vinutí shodný s referenčním strojem	28
Obr. 3-2: Průběh první harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře a krytí závitem cívky	29
Obr. 3-3: Fázory napětí indukované v „trojčívce“	30
Obr. 3-4: Statorová drážka	35
Obr. 3-5: B-H křivka materiálu M400-50A	36
Obr. 3-6: Detail B-H křivky materiálu M400-50A pro intenzity magnetického pole do 1000 A/m	36
Obr. 3-7: B-H křivka materiálu M400-50A a vynesená závislost dle rovnice (3.86)	38
Obr. 3-8: Detail B-H křivky materiálu M400-50A a vynesené závislosti dle rovnice (3.86)	39
Obr. 3-9: Přepočítávací koeficient pro jha statoru a rotoru	41
Obr. 3-10: B-H křivka materiálu M400-50A do intenzity magnetického pole 600 A/m a určení intenzit magnetického pole ve jhu statoru a rotoru	42
Obr. 3-11: Demagnetizační B-H charakteristika magnetů NdFeB jakosti 40 SH.....	45
Obr. 3-12: Část B-H charakteristiky magnetů NdFeB jakosti 40 SH z Obr. 3-11 a určení fiktivní koercitivní síly	46
Obr. 3-13: Fázorový diagram stroje	71
Obr. 3-14: Závislost momentu stroje na zátěžném úhlu.....	74
Obr. 5-1: Model stroje v programu Ansys Maxwell 2D	78
Obr. 5-2: Detail sítě pro výpočet stroje v Ansys Maxwell 2D	81
Obr. 5-3: Rozložení magnetické indukce ve stroji v Ansys Maxwell 2D	81
Obr. 5-4: Časový průběh ztrát ve stroji v Ansys Maxwell 2D	82
Obr. 6-1: Štítek motoru	83
Obr. 6-2: Štítek dynamometru	84
Obr. 6-3: Štítek frekvenčního měniče	84
Obr. 6-4: Schéma zapojení měřicího pracoviště pro měření motoru	85

Obr. 6-5: Schéma zapojení měřicího pracoviště pro měření odporu vinutí	85
Obr. 6-6: Fázorový diagram stroje – měření při $M = 500 \text{ Nm}$ a $n = 300 \text{ min}^{-1}$	92
Obr. 7-1: Magnetická indukce pod zubem statoru	100
Obr. 7-2: Model stroje v programu FEMM.....	101
Obr. 7-3: Detail sítě ve vzduchové mezeře pro výpočet modelu stroje v programu FEMM.....	101
Obr. 7-4: Magnetická indukce na povrchu magnetů přes jednu drážkovou rozteč, vypočítaná programem FEMM	102
Obr. 7-5: Rekonstruovaný průběh magnetické indukce na povrchu magnetů přes jednu drážkovou rozteč.....	103

SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1: Návrhové parametry stroje pro výpočet	21
Tab. 4-1: Parametry stroje vypočítané softwarem Ansys RMxpert a provnání s analytickým výpočtem	75
Tab. 5-1: Parametry stroje vypočítané softwarem Ansys Maxwell 2D a porovnání s analytickým výpočtem	79
Tab. 6-1: Indukované napětí naprázdno naměřené osciloskopem při jmenovitých otáčkách	87
Tab. 6-2: Indukované napětí naprázdno naměřené analyzátozem výkonu	87
Tab. 6-3: Naměřené hodnoty při otáčkách 200 min^{-1}	88
Tab. 6-4: Naměřené hodnoty při otáčkách 300 min^{-1}	89
Tab. 6-5: Naměřené hodnoty při otáčkách 350 min^{-1}	90
Tab. 6-6: Naměřené hodnoty při otáčkách 200 min^{-1} a zadaném jmenovitém proudu motoru 20 A	90
Tab. 7-1: Harmonické magnetické indukce na povrchu magnetů vyvolané drážkováním	103
Tab. 7-2: Ztráty způsobené jednotlivými harmonickými magnetické indukce v segmentech magnetů po obvodu rotoru	110

1. ÚVOD

Synchronní stroje s permanentními magnety se v poslední době staly velmi populárními stroji. V minulosti byly synchronní stroje užívány pouze pro aplikace, pro které byly vhodné stálé otáčky poháněcího stroje, protože je nebylo možné snadno měnit. Na rozdíl od asynchronního stroje potřeboval synchronní stroj budič nebo kroužky a kartáče a nebyl schopný se po připojení k síti sám rozběhnout. S nástupem frekvenčních měničů bylo možné problém s rozběhem synchronního stroje odstranit. S využitím permanentních magnetů bylo možné odstranit ze stroje budicí vinutí. Nevýhodou použití stroje s permanentními magnety je omezení z hlediska možné trvalé demagnetizace permanentního magnetu.

Z důvodů popsaných výše a výhodným provozním vlastnostem synchronních strojů se tyto stroje v poslední době staly velmi rozšířenými a hojně používanými v široké škále výkonů, ať už se jedná o stroje napájené harmonickým napětím nebo bezkartáčové stejnosměrné motory (tzv. BLDC motory), které jsou v principu střídavými synchronními motory pracujícími s měničem napájeným výhradně stejnosměrně.

Tato diplomová práce si klade za cíl především sestavit a provést analytický výpočet pro synchronní stroj s permanentními magnety. V první části práce je popsán synchronní stroj obecně, neboť jeho znalost je v této práci klíčová. Analytický výpočet synchronního stroje byl sestaven na základě uvedené literatury. Práce využívá zadaný referenční stroj, který byl již před zadáním práce vyroben. Během výpočtu jsou postupně vypočítané hodnoty nahrazovány hodnotami z jeho dokumentace. Cílem je přizpůsobit výpočet tak, aby se co nejvíce s tímto referenčním strojem shodoval. Protože je referenční stroj k dispozici, je možné na něm provést měření a ověřit tak přesnost parametrů a vlastností stroje stanovených analytickým výpočtem.

V rámci této práce byly parametry a vlastnosti stroje spočítány také pomocí softwarů Ansys RMXprt (analytický nástroj) a Ansys Maxwell 2D (využívá metodu konečných prvků). Hodnoty jimi vypočítané jsou porovnány s analytickým výpočtem a měřením referenčního stroje, které bylo v rámci této práce provedeno. Závěrem je navržena a provedena úprava analytického výpočtu pro snížení jeho nepřesností.

2. SYNCHRONNÍ STROJE

Pro návrh a výpočet synchronního stroje jsou předpokladem alespoň základní znalosti o těchto strojích – především o jejich konstrukci a vlastnostech. Cílem této kapitoly je stručné pojednání o synchronních strojích, které je nutným předpokladem pro následující kapitoly této práce. Je zde stručně vysvětlen jejich princip činnosti, uvedeno rozdělení, náhradní obvodové schéma a vysvětleno jejich zatěžování. Dále je velmi stručně vysvětlen systém $d-q$ os, jehož užití je pro synchronní stroje velmi časté a využívá jej také tato práce. V poslední řadě kapitola pojednává o synchronních strojích s permanentními magnety, jejichž znalost je klíčová pro následující kapitoly této práce.

2.1. Synchronní stroj obecně

Synchronní stroje patří do skupiny točivých elektrických strojů. Jejich hlavní vlastností je jejich rychlost otáčení, tzv. synchronní. Tato rychlost je shodná s rychlostí točivého magnetického pole statoru. Jejich největší využití spočívá v oblasti výroby elektrické energie [1].

V současné době jsou synchronní stroje hojně využívány nejen k výrobě elektrické energie, ale také jako synchronní motory, velmi často s permanentními magnety.

2.2. Princip činnosti

Synchronní stroj je tvořen státorem a rotorem a bývá obvykle třífázový. Třífázové vinutí je uloženo na statoru a vytváří točivé magnetické pole. Na rotoru je umístěno budicí vinutí (napájené stejnosměrným proudem) nebo permanentní magnet, jimiž dochází k vytvoření magnetického pole rotoru. Interakcí točivých magnetických polí statoru a rotoru vzniká moment působící na rotor [2].

V závislosti na směru momentu na hřídeli stroje (poháněcí nebo zátěžný) stroj pracuje buďto jako generátor, nebo jako motor. Změnou směru momentu na hřídeli stroje lze plynule mezi těmito režimy přecházet, avšak pouze za předpokladu, že je třífázové vinutí napájeno

souměrným napětím stálého kmitočtu a pokud stroj nemá permanentní magnety, je budicí vinutí napájeno stejnosměrným proudem [2].

Synchronní otáčky n_1 stroje, a tedy točivého pole statoru, jsou dány napájecí frekvencí f_1 a počtem pólových dvojic p , přičemž rovnou vyjádříme otáčky v jednotkách min^{-1} [2]:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (2.1)$$

2.3. Rozdělení synchronních strojů

Rozdělení synchronních strojů uvádí [3] takto:

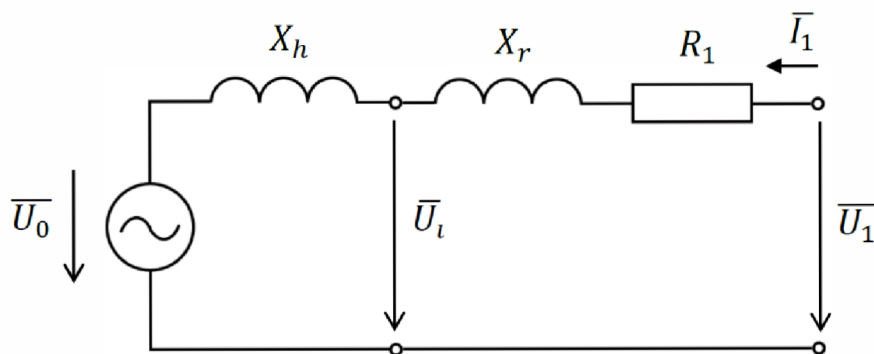
- Buzené synchronní stroje
 - S vyniklými póly
 - Bezkartáčové
 - S kartáči
 - S hladkým rotorem
 - Bezkartáčové
 - S kartáči
- Synchronní reluktanční motory
 - Synchronní reluktanční motory
 - Synchronní reluktanční motory s asistencí permanentním magnetem
- Synchronní stroje s permanentními magnety
 - S vyniklostí („vyniklé póly“), $L_d/L_q > 1$
 - S vyniklostí („vyniklé póly“), $L_d/L_q < 1$
 - s permanentními magnety uvnitř rotoru na osách d
 - s permanentními magnety na pólových nástavcích na osách d
 - Bez vyniklosti („hladký rotor“), $L_d/L_q = 1$

L_d (resp. L_q) značí indukčnost v ose d (resp. ose q). Osy d - q jsou popsány v podkapitole 2.7.

V případě „bezkartáčového“ buzení se jedná např. o stroje na společné hřídeli s jinými stroji nebo budiči. „Kartáčové“ buzení spočívá v přivedení budicího (stejnoseměrného) proudu do budicího vinutí přes kroužky [3].

2.4. Náhradní obvodové schéma synchronního stroje

Náhradní obvodové schéma synchronního stroje je na **Obr. 2-1**.



Obr. 2-1: Náhradní obvodové schéma synchronního stroje [2]

Schéma na **Obr. 2-1** platí pro jednu fázi synchronního stroje a za následujících předpokladů [2]:

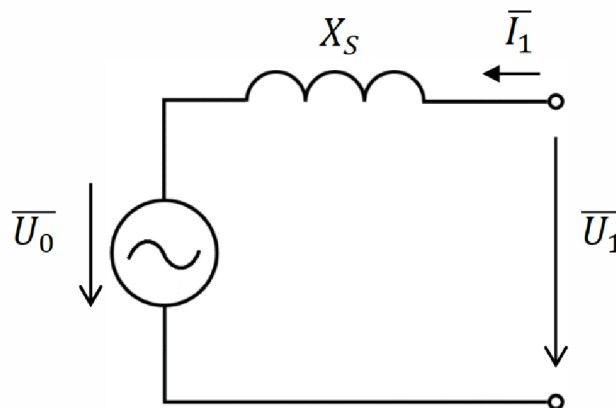
- Stroj má třífázové souměrné vinutí
- Stroj má hladký rotor
- Magnetický obvod stroje není nasycený
- Průběhy napětí a proudů ve stroji jsou harmonické

Označení veličin na **Obr. 2-1** je následující [2]:

- \bar{U}_1 – napětí na svorkách synchronního stroje
- \bar{U}_i – vnitřní indukované napětí
- \bar{U}_0 – vnitřní indukované napětí naprázdno
- \bar{I}_1 – proud fáze kotvy (kotvou je vinutí, do kterého se indukuje napětí, u synchronního stroje vinutí na statoru)
- R_1 – odpor jedné fáze vinutí

- X_h – hlavní (magnetizační) reaktance vinutí kotvy
- X_r – rozptylová reaktance vinutí kotvy

Hlavní a rozptylová reaktance vinutí kotvy se obvykle slučuje do jedné, tzv. synchronní reaktance X_S . Synchronní reaktance je součtem hlavní a rozptylové reaktance vinutí kotvy. U velkých synchronních strojů je odpor jedné fáze vinutí kotvy oproti synchronní reaktanci zanedbatelný a náhradní obvodové schéma lze zjednodušit (**Obr. 2-2**) se zachováním dostatečné přesnosti [2].



Obr. 2-2: Zjednodušené náhradní obvodové schéma (velkého) synchronního stroje [2]

2.5. Zatěžování synchronního stroje

Na rozdíl od stejnosměrných a asynchronních strojů zůstávají otáčky synchronního stroje při zatěžování konstantní. S rostoucím momentem se zvyšuje tzv. zátěžný úhel β . Zátěžný úhel vyjadřuje fázový posun mezi fázorem napětí na svorkách stroje \overline{U}_1 a fázorem vnitřního indukovaného napětí naprázdno \overline{U}_0 . Moment stroje s hladkým rotorem M lze ze zjednodušeného schématu na **Obr. 2-2** definovat následující rovnicí [2]:

$$M = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot U_0}{\omega_1 \cdot X_S} \cdot \sin \beta \quad (2.2)$$

kde m_1 je počet fází stroje a ω_1 je synchronní úhlová rychlost.

Z rovnice (2.2) vyplývá, že moment stroje je závislý na $\sin \beta$. Při nulovém momentu (při zanedbání ztrát) pracuje stroj s nulovým zátěžným úhlem. Naopak moment stroje s hladkým rotorem je maximální při zátěžném úhlu $\beta = \pm 90^\circ$. Při zvýšení momentu

nad maximální moment stroje ($\beta > 90^\circ$ nebo $\beta < -90^\circ$) vypadne stroj ze synchronismu, tedy ze stavu, kdy se rotor stroje otáčí stejně rychle jako točivé magnetické pole statoru. Výpadek ze synchronismu se u motoru projeví jeho zastavením, neboť motoru poklesne moment při zvýšení zátěžného úhlu nad 90° . Naopak u generátoru se výpadek ze synchronismu projeví jeho náhlým zrychlením, protože moment poháněcího stroje bude větší než moment synchronního stroje v generátorickém chodu [2]. Při výpadku ze synchronismu musí být synchronní stroj okamžitě odpojen [1].

2.6. Synchronní motor

Buzený synchronní motor není schopen samostatného rozběhu po připojení na síť. Rozběh lze zajistit asynchronně nebo pomocí roztáčecího motoru. U synchronních motorů s permanentními magnety napájených frekvenčním měničem lze rozběh realizovat právě pomocí tohoto měniče. Napájení synchronních motorů s permanentními magnety frekvenčním měničem je v praxi velmi časté. Výhodami synchronních motorů jsou jejich pracovní charakteristiky, „regulovatelný“ účinek a vysoká účinnost. Frekvenční měniče zajišťují provoz těchto motorů při různých otáčkách [2].

2.7. Systém d - q os

Osa d je osou magnetického toku vyvolaného budícím vinutím nebo permanentním magnetem a nazývá se podélná. Osa q je kolmá na osu d a nazývá se příčná. Výhodou systému d - q os je odstranění závislosti indukčností na úhlu natočení rotoru a zavedení konstantních indukčností L_d a L_q [2]. Princip d - q os je patrný z **Obr. 2-3**.

2.8. Synchronní stroje s permanentními magnety

U synchronních strojů s permanentními magnety vytváří permanentní magnet stálý magnetický tok. Výhodou permanentních magnetů je odstranění ztrát v budícím vinutí. Mnoho materiálů pro permanentní magnety je však elektricky vodivých, což v těchto materiálech

umožňuje vznik Jouleových ztrát. Jejich použití je nejčastější v kombinaci s napájením pomocí frekvenčního měniče [3].

Stálý magnetický tok vytváří určitá omezení v návrhu synchronních strojů. Při návrhu synchronního stroje s permanentními magnety je nutné brát v úvahu závislost remanentní magnetické indukce na teplotě, která obvykle s rostoucí teplotou klesá. Vzhledem k nízké permeabilitě permanentních magnetů ale zůstává magnetizační indukčnost u strojů s permanentními magnety na povrchu na nízké hodnotě [3].

Permanentní magnety NdFeB a SmCo mají relativně velkou elektrickou vodivost, což není překážkou pro nízkootáčkové aplikace, kdy ztráty v těchto materiálech zůstávají malé. U vysokootáčkových aplikací je nutné omezit ztráty v materiálu permanentního magnetu. V těchto aplikacích lze použít ferity, ve kterých nevznikají ztráty vířivými proudy [3].

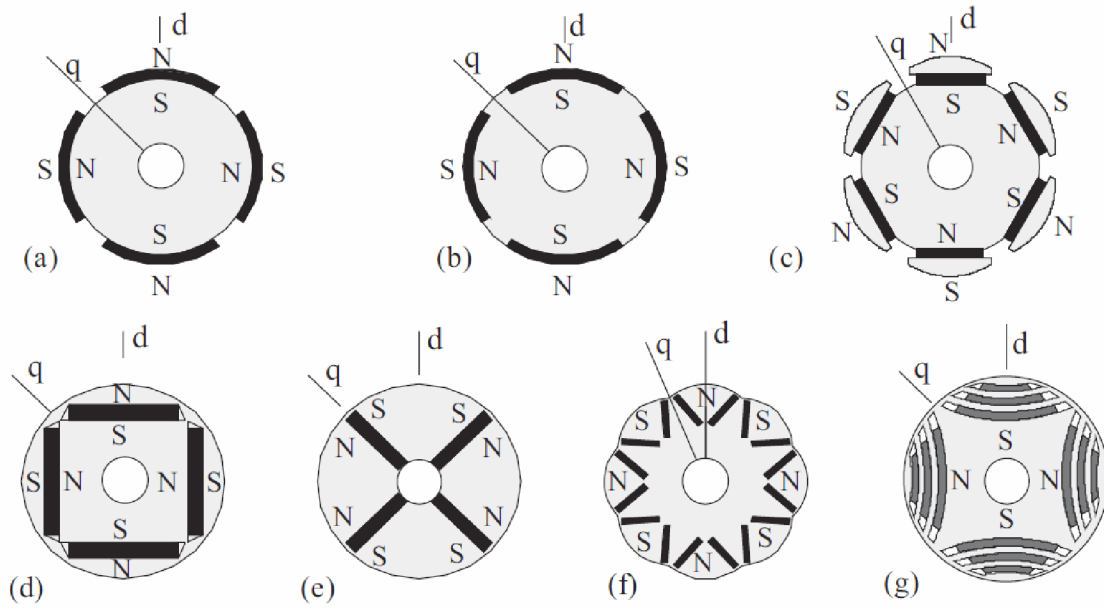
Konstrukce s permanentními magnety je vhodná pro nízkootáčkové vysokomomentové synchronní stroje. V porovnání s asynchronními stroji, které nejsou pro tento typ aplikace vhodné, si zmíněná konstrukce zachovává dobré provozní vlastnosti a parametry [3].

Charakteristiky synchronních strojů s permanentními magnety jsou značně ovlivněny konstrukcí rotoru. V případě magnetů na povrchu rotoru se synchronní stroj chová principiálně jako stroj s hladkým rotorem. U stroje s magnety uvnitř rotoru nebo na pólových nástavcích se jedná principiálně o stroj s vyniklými póly, kdy $L_q/L_d > 1$ [3].

Umístěním magnetů dovnitř rotoru se ztrácí značná část (zhruba jedna čtvrtina) jejich magnetického toku, ale naopak jsou v tomto případě chráněny z mechanického i magnetického hlediska. Tento způsob umístění umožňuje také použít dva magnety na pól [3].

U konstrukce s magnety na povrchu rotoru je nejvyšší stabilita stroje, tedy „odolnost“ vůči výpadku ze synchronismu, a největší využití magnetického materiálu. Magnety jsou ale naopak více mechanicky namáhány a dochází ke vzniku ztrát vířivými proudy. Magnety NdFeB mohou být demagnetizovány i přes jejich velkou koercitivní sílu [3].

Různé konstrukce rotorů synchronních strojů s permanentními magnety jsou vyobrazeny na **Obr. 2-3**.



Obr. 2-3: Různé konstrukce synchronních strojů s permanentními magnety [3]
a) magnety na povrchu rotoru, b) magnety uvnitř rotoru, c) magnety na pólových nástavcích, d) tangenciálně umístěné magnety v rotoru, e) radiálně umístěné magnety v rotoru, f) dva magnety na pól ve V-pozici, g) synchronní reluktanční motor s permanentními magnety

3. VÝPOČET SYNCHRONNÍHO STROJE

V této rozsáhlé kapitole diplomové práce je proveden výpočet synchronního stroje s permanentními magnety. Daný stroj byl před samotným výpočtem provedeným v této práci již vyroben. Cílem této části diplomové práce je sestavení analytického výpočtu stroje na základě literatury a průběžné porovnávání s existujícím referenčním strojem. Sestavení výpočtu bylo provedeno zejména na základě literárních zdrojů [3] a [4]. Dokumentace referenčního stroje je literárním zdrojem [5], přičemž právě s touto dokumentací jsou porovnávány výsledky výpočtů. Smyslem porovnání rozdílů mezi výpočtem a referenčním strojem je poukázání, jak by se stroj lišil v případě použití „univerzálního“ postupu výpočtu uvedeného v literatuře. Během výpočtů budou určité výsledky z nich vyplývající průběžně nahrazovány hodnotami z dokumentace. Pokud bychom tak neučinili, výsledný stroj by se až příliš lišil od stroje referenčního a porovnávání „univerzálního“ postupu výpočtu v pozdějších fázích s již existujícím strojem by bylo téměř nemožné.

3.1. Parametry stroje

Z dokumentace referenčního stroje byly převzaty parametry uvedené v **Tab. 3-1**, které budou sloužit jako výchozí (návrhové) parametry pro výpočet. Navrhovaný stroj bude napájen z frekvenčního měniče.

Tab. 3-1: Návrhové parametry stroje pro výpočet

Veličina	Značení	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon	P_n	50	kW
Jmenovité otáčky	n_n	350	min ⁻¹
Jmenovité napětí (zapojení vinutí)	U_n	390 (Y)	V
Počet fází	m	3	-
Počet pólů	$2p$	16	-
Jmenovitý účinník	$\cos \varphi_n$	0,95	-
Jmenovitá účinnost	η_n	92,4	%

3.2. Rozměry rotoru

Pro zahájení výpočtu stroje je nutné zvolit počáteční hodnoty. Dle zdroje [3] začínáme výpočtem tangenciálního napětí ve vzduchové mezeře. Uvažujeme-li sinusový průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře s maximální hodnotou \widehat{B}_δ a sinusový průběh lineární proudové hustoty o efektivní hodnotě A , lze průměrné tangenciální napětí ve vzduchové mezeře vypočítat ze vztahu [3]:

$$\sigma_{Ftan} = \frac{A \cdot \widehat{B}_\delta \cdot \cos \zeta}{\sqrt{2}} \quad (3.1)$$

kde ζ je fázový posun mezi pracovními harmonickými lineární proudové hustoty a magnetické indukce. Podle [3] pro synchronní motor s permanentními magnety volíme $\cos \zeta = 1$. Doporučené hodnoty lineární proudové hustoty pro synchronní motor s permanentními magnety na povrchu rotoru jsou 30 až 80 kA/m a hodnoty magnetické indukce 0,85 až 1,05 T. Volíme $A = 55$ kA/m a $\widehat{B}_\delta = 0,95$ T. Průměrné namáhání bude dle rovnice (3.1) [3]:

$$\sigma_{Ftan} = \frac{A \cdot \widehat{B}_\delta \cdot \cos \zeta}{\sqrt{2}} = \frac{55 \cdot 10^3 \cdot 0,95 \cdot 1}{\sqrt{2}} = 36,95 \text{ kPa} \quad (3.2)$$

Dle [3] je doporučený rozsah namáhání pro daný stroj 17 až 59,5 kPa, tedy hodnota dle rovnice (3.2) vyhovuje.

Moment stroje M vypočítáme z jeho jmenovitého výkonu P_n a jeho jmenovitých otáček n_n :

$$M = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{2\pi \cdot \frac{n_n}{60}} = \frac{50 \cdot 10^3}{2\pi \cdot \frac{350}{60}} = 1364,2 \text{ Nm} \quad (3.3)$$

kde ω_n je jmenovitá úhlová rychlost.

Zdroj [4] uvádí následující rovnici pro moment stroje:

$$M = \sigma_{Ftan} \cdot \pi \cdot \frac{D_r^2}{2} \cdot l' = 2 \cdot \sigma_{Ftan} \cdot V_r \quad (3.4)$$

kde D_r je vnější průměr rotoru, l' je ekvivalentní délka rotoru a V_r je jeho objem. Z této rovnice stanovíme požadovaný objem rotoru [4]:

$$V_r = \frac{M}{2 \cdot \sigma_{Ftan}} \quad (3.5)$$

Zdroje [3] a [4] definují štíhlostní poměr χ , který je dán:

$$\chi = \frac{l'}{D_r} \quad (3.6)$$

Podle [3] je vhodný štíhlostní poměr χ pro synchronní stroj s více než jednou pólovou dvojicí možné stanovit empirickým vztahem:

$$\chi \approx \frac{\pi}{4p} \cdot \sqrt{p} \quad (3.7)$$

Úpravami rovnic (3.4), (3.5), (3.6) a (3.7) dostaneme vztah pro výpočet vnějšího průměru rotoru vztah [4]:

$$D_r = 3 \sqrt{\frac{4V_r}{\pi\chi}} = 3 \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{M}{2 \cdot \sigma_{Ftan}}}{\pi \cdot \frac{\pi}{4p} \cdot \sqrt{p}}} = 3 \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{1364,2}{2 \cdot 36,95 \cdot 10^3}}{\pi \cdot \frac{\pi}{4 \cdot 8} \cdot \sqrt{8}}} = 0,4391 \text{ m} \quad (3.8)$$

Z rovnice (3.6) dopočítáme ekvivalentní délku rotoru [4]:

$$l' = \chi \cdot D_r = \frac{\pi}{4p} \cdot \sqrt{p} \cdot D_r = \frac{\pi}{4 \cdot 8} \cdot \sqrt{8} \cdot 0,4391 = 0,1219 \text{ m} \quad (3.9)$$

Rozměry D_r a l' se liší od existujícího stroje, ve kterém jsou tyto rozměry **$D_r = 357 \text{ mm}$** a **$l' = 253 \text{ mm}$** . V dalších výpočtech použijeme právě tyto hodnoty. Literární zdroj [3] uvádí štíhlostní poměr pro více než jednu pólovou dvojici dle rovnice (3.7). Naopak designér existujícího stroje mohl vycházet z jiného postupu nebo volit jiné počáteční hodnoty. Pro porovnání uvedeného výpočtu se strojem spočítáme jeho štíhlostní poměr χ a následně namáhání σ_{Ftan} , pro který získáme rovnicí úpravou rovnice (3.8) a dosazení za štíhlostní koeficient dle rovnice (3.6):

$$\chi = \frac{l'}{D_r} = \frac{253 \cdot 10^{-3}}{357 \cdot 10^{-3}} = 0,7087 \quad (3.10)$$

$$\sigma_{Ftan} = \frac{2 \cdot M}{D_r^2 \cdot \pi \cdot l'} = \frac{2 \cdot 1364,2}{(357 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi \cdot 253 \cdot 10^{-3}} = 26,93 \text{ kPa} \quad (3.11)$$

Dle [3] je doporučený rozsah namáhání pro daný stroj 17 až 59,5 kPa, tedy hodnota dle rovnice (3.11) vyhovuje. Existující stroj má menší namáhání σ_{Ftan} než stroj v provedeném výpočtu. Stroj ve výpočtu má větší vnější průměr rotoru, ale kratší ekvivalentní délku rotorového svazku.

3.3. Vzduchová mezera a délka jádra

Délku vzduchové mezery δ vypočítáme z výkonu stroje P pomocí empirického vztahu, který je pro stroj s více než jednou pólovou dvojicí definován ve zdroji [3] takto:

$$\delta = \frac{0,18 + 0,006 \cdot P^{0,4}}{1000} \quad (3.12)$$

Rovnice (3.12) je podle [3] určena pro asynchronní stroj pracující s frekvencí 50 Hz. Dle zdroje [4] lze však tuto rovnici využít i pro synchronní stroj s permanentními magnety. Délka vzduchové mezery bude:

$$\delta = \frac{0,18 + 0,006 \cdot P^{0,4}}{1000} = \frac{0,18 + 0,006 \cdot (50 \cdot 10^3)^{0,4}}{1000} = 0,63 \text{ mm} \quad (3.13)$$

Rovnice (3.13) může zjevně být pro náš stroj nepřesná, neboť je empirická, nerespektuje konkrétní počet pólů stroje a zdroj [3] navíc tvrdí, že je určena pro asynchronní stroj. Je-li stroj použit v pohonu s frekvenčním měničem, což je náš případ, je dle zdroje [3] možné vzduchovou mezera navýšit o zhruba 60 % k omezení ztrát v rotoru. Zdroj [4] vzduchovou mezera navyšuje kvůli skutečnosti, že permanentní magnety potřebují bandáž. Tedy i zde navýšíme délku vzduchové mezery, a to tak, aby se shodovala s existujícím strojem:

$$\delta = 1,5 \text{ mm} \quad (3.14)$$

Nyní můžeme spočítat vnitřní průměr statoru D_S [4]:

$$D_S = D_r + 2\delta = 357 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 360 \text{ mm} \quad (3.15)$$

Ekvivalentní délka rotoru l' stanovená v podkapitole 3.2 uvažuje, že se magnetický tok uzavírá i mimo železo rotoru. Uzavírání magnetického toku vně rotoru zohledňuje zdroj [4] připočítáním dvojnásobku délky vzduchové mezery k fyzické délce rotorového svazku, tedy na každé straně svazku je připočítána jedna délka vzduchové mezery. Typ chlazení referenčního stroje je **IC 416**. Zdroj [6] uvádí, že tento typ chlazení spočívá v chlazení vzduchem na povrchu zcela uzavřeného stroje, a tedy stroj nemá chladicí kanály. Fyzickou délku rotoru stroje l bez chladicích kanálů lze spočítat pomocí vztahu [4]:

$$l = l' - 2\delta = 253 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 250 \text{ mm} \quad (3.16)$$

3.4. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

Maximální hodnota magnetické indukce byla zvolena v podkapitole 3.2 pro výpočet namáhání dle rovnice (3.2) a nabývá hodnoty $\widehat{B}_\delta = 0,95$ T. Jedná se o amplitudu sinusového průběhu magnetické indukce, ale u stroje s obdélníkovými permanentními magnety je průběh magnetické indukce zhruba obdélníkový [4].

Definujeme značení maximální hodnoty magnetické indukce sinusového průběhu:

$$B_{1max} = 0,95 \text{ T} \quad (3.17)$$

Zdroj [4] volí pólové krytí $\alpha_{PM} = 0,80$. U referenčního stroje je pólové krytí $\alpha_{PM} = 0,7976 \approx 0,80$. Výpočet tedy budeme provádět s hodnotou pólového krytí shodnou se [4]:

$$\alpha_{PM} = 0,80 \quad (3.18)$$

Vzhledem k tomu, že jsou ve stroji permanentní magnety na povrchu, představuje zhruba 5 až 8 % magnetického toku vyvolaného permanentními magnety rozptylový tok. Tuto skutečnost je při návrhu stroje nutné brát v úvahu. Reálná délka permanentních magnetů by měla být 5 až 8 % delší, než je délka spočtená [4].

Přepočítáme maximální hodnotu magnetické indukce sinusového průběhu B_{1max} na maximální hodnotu magnetické indukce obdélníkového průběhu B_{max} [4]:

$$B_{max} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{B_{1max}}{\sin\left(\alpha_{PM} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{0,95}{\sin\left(0,80 \cdot \frac{\pi}{2}\right)} = 0,7845 \text{ T} \quad (3.19)$$

3.5. Návrh statorového vinutí

Počet závitů fáze v sérii statorového vinutí N spočítáme následující rovnicí [4]:

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{PM}}{\omega \cdot k_{v1} \cdot \alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'} \quad (3.20)$$

kde U_{PM} je napětí indukované permanentním magnetem, ω je napájecí úhlová frekvence, k_{v1} je činitel vinutí pro 1. harmonickou a τ_p je pólová rozteč.

Napětí indukované permanentním magnetem vypočítáme ze jmenovitého napájecího napětí U_n [4]:

$$U_{PM} \approx \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (3.21)$$

V rovnici (3.21) nejsou respektovány úbytky napětí na odporu a reaktanci vinutí. Zdroj [3] říká, že z tohoto důvodu volíme v napětí indukovaném permanentním magnetem rezervu 3 %:

$$U_{PM} = 0,97 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 0,97 \cdot \frac{390}{\sqrt{3}} = 218,4 \text{ V} \quad (3.22)$$

Napájecí úhlová frekvence bude:

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot \frac{n_n}{60} \cdot p = 2\pi \cdot \frac{350}{60} \cdot 8 = 293,22 \text{ s}^{-1} \quad (3.23)$$

Při stanovování dalších parametrů se budeme držet dokumentace referenčního stroje. V opačném případě bychom museli některé hodnoty zvolit jako počáteční. Pólovou rozteč spočítáme jako obloukovou délku pólu a také jako počet drážek na pól. Pólovou rozteč jako počet drážek na pól spočteme z počtu statorových drážek Q_S a počtu pólů. Dle dokumentace referenčního stroje je počet statorových drážek:

$$Q_S = 72 \quad (3.24)$$

Pólová rozteč jako počet drážek na pól bude:

$$\tau_p = \frac{Q_S}{2p} = \frac{72}{16} = 4,5 \quad (3.25)$$

Nyní spočteme pólovou rozteč jako délku pólu vztaženou ke střednímu průměru vzduchové mezery [4]:

$$\tau_p = \pi \cdot \frac{D_S - \delta}{2p} = \pi \cdot \frac{360 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-3}}{16} = 70,39 \text{ mm} \quad (3.26)$$

Dokumentace stroje udává pólovou rozteč $\tau_p = 67,7$ mm. Tato hodnota je udávána jako oblouková délka pólu na vnějším obvodu jha rotoru. Rovnicí (3.26) byla oblouková délka pólu spočtena na středním průměru vzduchové mezery, což je pro výpočet počtu závitů fáze v sérii statorového vinutí podle rovnice (3.20) přesnější.

Výpočet činitele vinutí pro libovolnou harmonickou můžeme podle zdroje [3] vypočítat takto:

$$k_{vv} = \frac{\sin\left(v \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{y}{\tau_p}\right) \cdot \sin\left(\frac{v}{m} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\pi}{2mq}\right)} \quad (3.27)$$

kde v je řád harmonické, y je krok cívky a q je počet drážek na pól a fázi. Dle dokumentace referenčního stroje je krok cívky:

$$y = 4 \quad (3.28)$$

Počet drážek na pól a fázi spočteme dle vzorce:

$$q = \frac{Q_s}{2p \cdot m} \quad (3.29)$$

Počet drážek na pól a fázi bude:

$$q = \frac{Q_s}{2p \cdot m} = \frac{72}{16 \cdot 3} = 1,5 \quad (3.30)$$

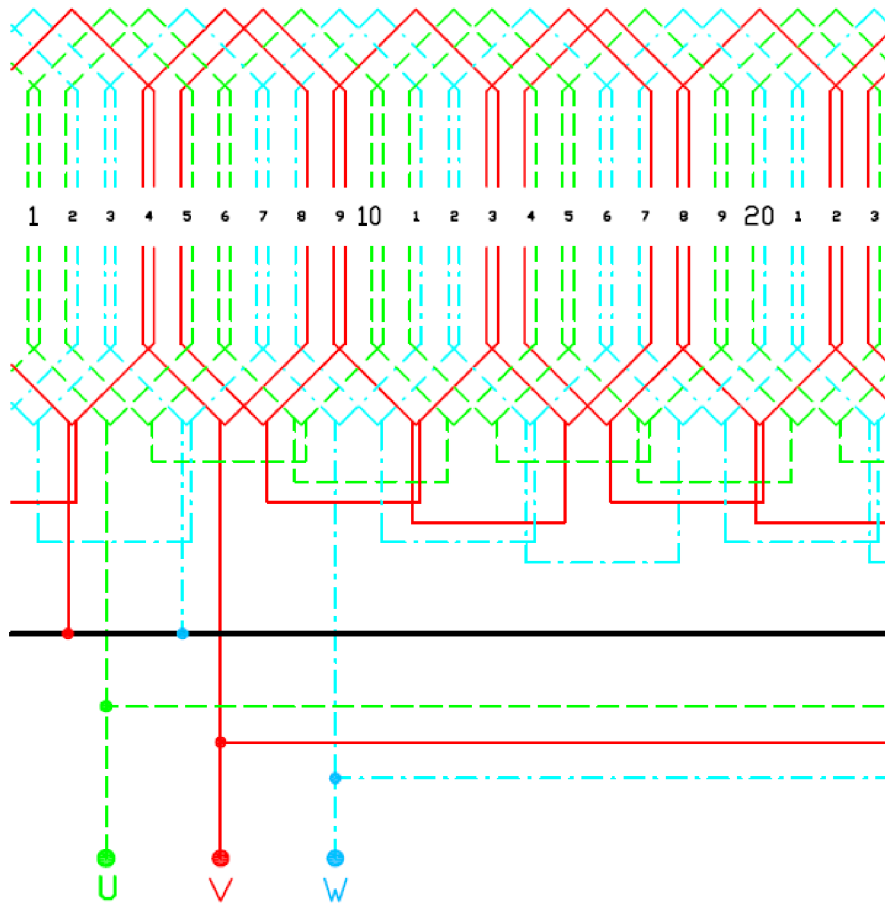
Činitel vinutí pro první harmonickou bude [3]:

$$k_{v1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y}{\tau_p}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{4}{4,5}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3}\right)}{1,5 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 1,5}\right)} = 0,9598 \quad (3.31)$$

Dle dokumentace referenčního stroje je činitel vinutí pro první harmonickou:

$$k_{v1} = 0,945 \quad (3.32)$$

Výpočet „univerzálním“ vzorcem podle rovnice (3.27) je pro náš případ nevyhovující. Činitel vinutí pro 1. harmonickou tedy spočítáme „ručně“. Postup v následujícím výpočtu činitele vinutí byl postaven na základě literárního zdroje [7]. Na **Obr. 3-1** je znázorněna část typu vinutí, které je shodné s typem vinutí v referenčním stroji.



Obr. 3-1: Typ vinutí shodný s referenčním strojem [5]

Na základě počtu statorových drážek vypočteme nejprve mechanický úhel $\beta_{ds,mech}$, který drážky svírají, a poté elektrický úhel $\beta_{ds,el}$ mezi nimi využitím počtu pólových dvojic.

$$Q_S = 72 \quad (3.33)$$

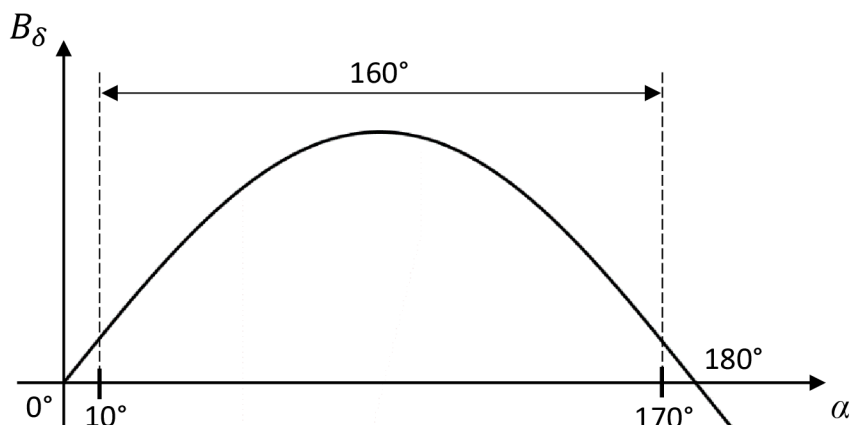
$$\beta_{ds,mech} = \frac{360^\circ}{Q_S} = \frac{360^\circ}{72} = 5^\circ \text{ mech.} \quad (3.34)$$

$$\beta_{ds,el} = p \cdot \beta_{ds,mech} = 8 \cdot 5^\circ \text{ mech.} = 40^\circ \text{ el.} \quad (3.35)$$

Nejprve vypočítáme činitel zkrácení kroku k_y . Krok cívky je $y = 4$, tedy elektrický úhel mezi cívkami bude:

$$\beta_{cívky,el} = y \cdot \beta_{ds,el} = 4 \cdot 40^\circ \text{ el.} = 160^\circ \text{ el.} \quad (3.36)$$

Na **Obr. 3-2** je znázorněná první harmonická magnetické indukce ve vzduchové mezeře a je zde vyznačen úhel dle rovnice (3.36), tedy jakou část první harmonické magnetické indukce kryje závit cívky.

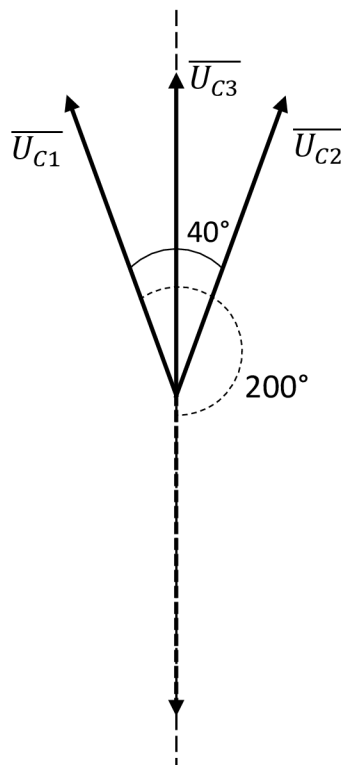


Obr. 3-2: Průběh první harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře a krytí závitem cívky

Činitel zkrácení kroku k_y je poměrem plochy průběhu první harmonické magnetické indukce, kterou kryje závit cívky, a plochy jedné půlperrody této harmonické:

$$k_y = \frac{\int_{10^\circ}^{170^\circ} \sin \alpha \, d\alpha}{\int_{0^\circ}^{180^\circ} \sin \alpha \, d\alpha} = 0,984808 \quad (3.37)$$

Činitel rozlohy k_r určíme pomocí fázorů indukovaných napětí v cívkách vinutí. Vycházíme z **Obr. 3-1**. První dvě cívky fáze na **Obr. 3-1** jsou posunuty o úhel 40° el. dle rovnice (3.35). Třetí cívka dané fáze má dle **Obr. 3-1** od první cívky krok pět drážek, tedy elektrický úhel mezi nimi by měl být $5 \cdot 40^\circ$ el. = 200° el. Tato cívka má však dle **Obr. 3-1** opačný smysl navíjení, což otáčí fázor indukovaného napětí o 180° el. Elektrický úhel mezi první a třetí cívkou dané fáze tedy bude 200° el. – 180° el. = 20° el. Všechny tři fázory jsou vyobrazeny na **Obr. 3-3**.



Obr. 3-3: Fázory napětí indukované v „trojčívce“

Fázory na **Obr. 3-3** jsou fázory indukovaných napětí v daných „trojčívkách“ vinutí na **Obr. 3-1**. První závit další „trojčívky“ má od prvního závitu první „trojčívky“ krok devět drážek, tedy elektrický úhel mezi těmito „trojčívkami“ je $9 \cdot 40^\circ \text{ el.} = 360^\circ \text{ el.}$ „Trojčívky“ jsou tedy vzájemně ve fázi, což znamená, že činitel rozlohy můžeme počítat pouze z jedné „trojčívky“. Velikosti fázorů $\overline{U_{C1}}$, $\overline{U_{C2}}$, $\overline{U_{C3}}$ na **Obr. 3-3** jsou shodné, tedy platí:

$$U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_C \quad (3.38)$$

Činitel rozlohy k_r bude podílem geometrického součtu fázorů a součtu jejich velikostí:

$$k_r = \frac{U_C + 2 \cdot U_C \cdot \cos 20^\circ}{3 \cdot U_C} = \frac{1 + 2 \cdot \cos 20^\circ}{3} = 0,959795 \quad (3.39)$$

Činitel vinutí pro první harmonickou bude součinem činitele zkrácení kroku a činitele rozlohy:

$$k_{v1} = k_r \cdot k_y = 0,959795 \cdot 0,984808 = 0,945 \quad (3.40)$$

Výpočet činitele vinutí se nyní shoduje s dokumentací stroje. Dle dokumentace stroj nemá natočené drážky. Pokud by měl, obsahovala by rovnice (3.40) mimo činitele zkrácení kroku a činitele rozlohy také činitel natočení drážek.

Nyní spočteme počet závitů fáze v sérii statorového vinutí dle rovnice (3.20) [4]:

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{PM}}{\omega \cdot k_{v1} \cdot \alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'} \quad (3.41)$$

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot 218,4}{293,22 \cdot 0,945 \cdot 0,80 \cdot 0,7845 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 10^{-3}} \quad (3.42)$$

$$N = 99,7 \text{ závitů} \rightarrow 100 \text{ závitů} \quad (3.43)$$

Referenční stroj má počet závitů fáze v sérii statorového vinutí $N = 126$ závitů. V dalších výpočtech budeme opět počítat s hodnotou dle referenčního stroje. Zpětně spočteme magnetickou indukci ve vzduchové mezeře B_{max} úpravou rovnice (3.20):

$$B_{max} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{PM}}{\omega \cdot k_{v1} \cdot \alpha_{PM} \cdot N \cdot \tau_p \cdot l'} \quad (3.44)$$

$$B_{max} = \frac{\sqrt{2} \cdot 218,4}{293,22 \cdot 0,945 \cdot 0,80 \cdot 126 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 10^{-3}} \quad (3.45)$$

$$B_{max} = 0,621 \text{ T} \quad (3.46)$$

Hodnota B_{max} dle rovnice (3.46) bude pro nás dále směrodatná.

Dále spočítáme počet vodičů ve statorové drážce [4]:

$$N_{ds} = 2 \cdot a \cdot m \cdot \frac{N}{Q_s} = 2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{126}{72} = 42 \text{ vodičů v drážce} \quad (3.47)$$

Vinutí v referenčním stroji je **dvouvrstvé**. Zdroj [4] udává, že je-li vinutí dvouvrstvé, musí být počet vodičů ve statorové drážce sudým číslem. Výsledek rovnice (3.47) toto splňuje.

Počet vodičů v jedné vrstvě drážky bude:

$$N_{vrstva} = \frac{N_{ds}}{2} = \frac{42}{2} = 21 \text{ vodičů v jedné vrstvě drážky} \quad (3.48)$$

3.6. Rozměry statorové drážky

Nejprve vypočítáme šířku zubu na statoru. Zdroj [4] volí jako počáteční veličinu pro návrh šířky zubu statoru zdánlivou magnetickou indukci na zubu B_{dapp} . Dle zdroje [3] je rozsah magnetické indukce na zubu pro náš typ stroje 1,5 až 2,0 T. Zvolíme hodnotu zdánlivé magnetické indukce shodně se zdrojem [4]:

$$B_{dapp} = 1,6 \text{ T} \quad (3.49)$$

Zdánlivá magnetická indukce je dána [4]:

$$B_{dapp} = \frac{l' \cdot \tau_u}{k_{pFe} \cdot (l - n_v \cdot b_v) \cdot b_d} \cdot B_{max} \quad (3.50)$$

kde τ_u je drážková rozteč, k_{pFe} je činitel plnění železa, n_v je počet ventilačních kanálů, b_v je jejich šířka a b_d je šířka zubu na statoru. Pro stroj bez ventilačních kanálů platí:

$$n_v = 0 \quad (3.51)$$

$$b_v = 0 \quad (3.52)$$

Rovnice, ve kterých se v literárních zdrojích vyskytuje počet a šířka ventilačních kanálů, budou dále pro lepší přehlednost uváděny bez těchto členů.

Úpravou rovnice (3.50) vyjádříme šířku zubu statoru. Zdroj [3] podotýká, že je nutné brát v úvahu změnu struktury železa při jeho obrábění. Okraj zubu bude mít vlivem této skutečnosti menší permeabilitu. K zajištění dostatečné šířky zubu navyšuje zdroj [3] šířku zubu o 0,1 mm. Úpravou rovnice (3.50), uvažováním rovnic (3.51) a (3.52) a připočítání 0,1 mm k navrhované šířce zubu dostaneme [3]:

$$b_d = \frac{l' \cdot \tau_u}{k_{pFe} \cdot l} \cdot \frac{B_{max}}{B_{dapp}} + 0,1 \cdot 10^{-3} \quad (3.53)$$

Drážkovou rozteč spočítáme z vnitřního průměru statoru a počtu drážek [4]:

$$\tau_u = \pi \cdot \frac{D_S}{Q_S} = \pi \cdot \frac{360 \cdot 10^{-3}}{72} = 15,71 \text{ mm} \quad (3.54)$$

Činitel plnění železa není v dokumentaci referenčního stroje uveden. Budeme uvažovat:

$$k_{pFe} = 0,95 \quad (3.55)$$

Nyní můžeme spočítat šířku zubu na statoru [3]:

$$b_d = \frac{253 \cdot 10^{-3} \cdot 15,71 \cdot 10^{-3}}{0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,621}{1,6} + 0,1 \cdot 10^{-3} = 6,6 \text{ mm} \quad (3.56)$$

Pro výpočet rozměrů statorové drážky potřebuje znát statorový proud. Ten spočítáme následující rovnicí [4]:

$$I_S = \frac{P_n}{m \cdot \eta_n \cdot U_{n,f} \cdot \cos \varphi_n} \quad (3.57)$$

kde $U_{n,f}$ je jmenovité napětí fázové. Toto napětí spočítáme ze jmenovitého napětí sdruženého:

$$U_{n,f} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{390}{\sqrt{3}} = 225,2 \text{ V} \quad (3.58)$$

Statorový proud bude [4]:

$$I_S = \frac{P_n}{m \cdot \eta_n \cdot U_{n,f} \cdot \cos \varphi_n} = \frac{50 \cdot 10^3}{3 \cdot 0,924 \cdot 225,2 \cdot 0,95} = 84,3 \text{ A} \quad (3.59)$$

Průřez jednoho vodiče ve statorové drážce bude [4]:

$$S_v = \frac{I_S}{a \cdot J_S} \quad (3.60)$$

kde J_S je proudová hustota ve vodiči ve statorové drážce. Abychom mohli spočítat průřez vodiče ve statorové drážce, musíme zvolit proudovou hustotu, která má v tomto vodiči být. Dle zdroje [3] je rozsah proudové hustoty pro náš typ stroje 3 až 5 A/mm². Zvolíme tedy:

$$J_S = 4 \text{ A/mm}^2 \quad (3.61)$$

Nyní spočítáme průřez jednoho vodiče ve statorové drážce [4]:

$$S_v = \frac{I_S}{a \cdot J_S} = \frac{84,3}{4 \cdot 4 \cdot 10^6} = 5,26875 \text{ mm}^2 \quad (3.62)$$

Dle dokumentace referenčního stroje je průřez čisté mědi jednoho vodiče v drážce:

$$S_v = 4,44724 \text{ mm}^2 \quad (3.63)$$

Průřez jednoho vodiče v drážce včetně izolace S_{vi} je dle dokumentace referenčního stroje:

$$S_{vi} = 5,11797 \text{ mm}^2 \quad (3.64)$$

Zpětně dopočítáme proudovou hustotu ve vodiči v referenčním stroji [4]:

$$J_s = \frac{I_s}{a \cdot S_v} = \frac{84,3}{4 \cdot 4,44724 \cdot 10^{-6}} = 4,739 \text{ A/mm}^2 \quad (3.65)$$

Proudová hustota dle rovnice (3.65) je v rozsahu proudových hustot udaných ve zdroji [3].

Na základě počtu vodičů v drážce N_{ds} v ní můžeme spočítat celkový průřez mědi:

$$S_{Cu} = N_{ds} \cdot S_v = 42 \cdot 4,44724 \cdot 10^{-6} = 186,78 \text{ mm}^2 \quad (3.66)$$

Z hodnot celkového průřezu mědi v drážce a průřezu drážky můžeme dopočítat činitel plnění mědi k_{pCu} :

$$k_{pCu} = \frac{S_{Cu}}{S_{dS}} = \frac{186,78 \cdot 10^{-6}}{383 \cdot 10^{-6}} = 0,488 \quad (3.67)$$

Na **Obr. 3-4** je vyobrazena drážka stroje, jejíž typ je shodný s referenčním strojem. Jednotlivé rozměry dle **Obr. 3-4** a plocha drážky S_{dS} jsou:

$$h_1 = 0,5 \text{ mm} \quad (3.68)$$

$$h_2 = 1,5 \text{ mm} \quad (3.69)$$

$$h_3 = 1 \text{ mm} \quad (3.70)$$

$$h_4 = 38,6 \text{ mm} \quad (3.71)$$

$$h_5 = 33,5 \text{ mm} \quad (3.72)$$

$$h_6 = 0,4 \text{ mm} \quad (3.73)$$

$$h' = 0,4 \text{ mm} \quad (3.74)$$

$$b_1 = 3 \text{ mm} \quad (3.75)$$

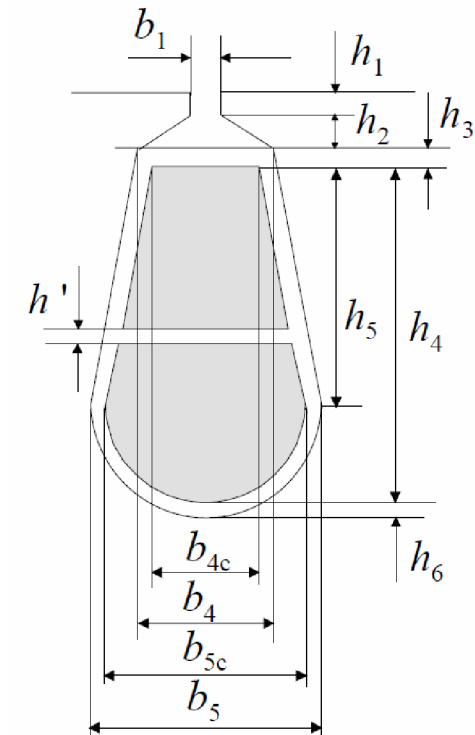
$$b_4 = 8 \text{ mm} \quad (3.76)$$

$$b_{4c} = 7,2 \text{ mm} \quad (3.77)$$

$$b_5 = 11 \text{ mm} \quad (3.78)$$

$$b_{5c} = 10,2 \text{ mm} \quad (3.79)$$

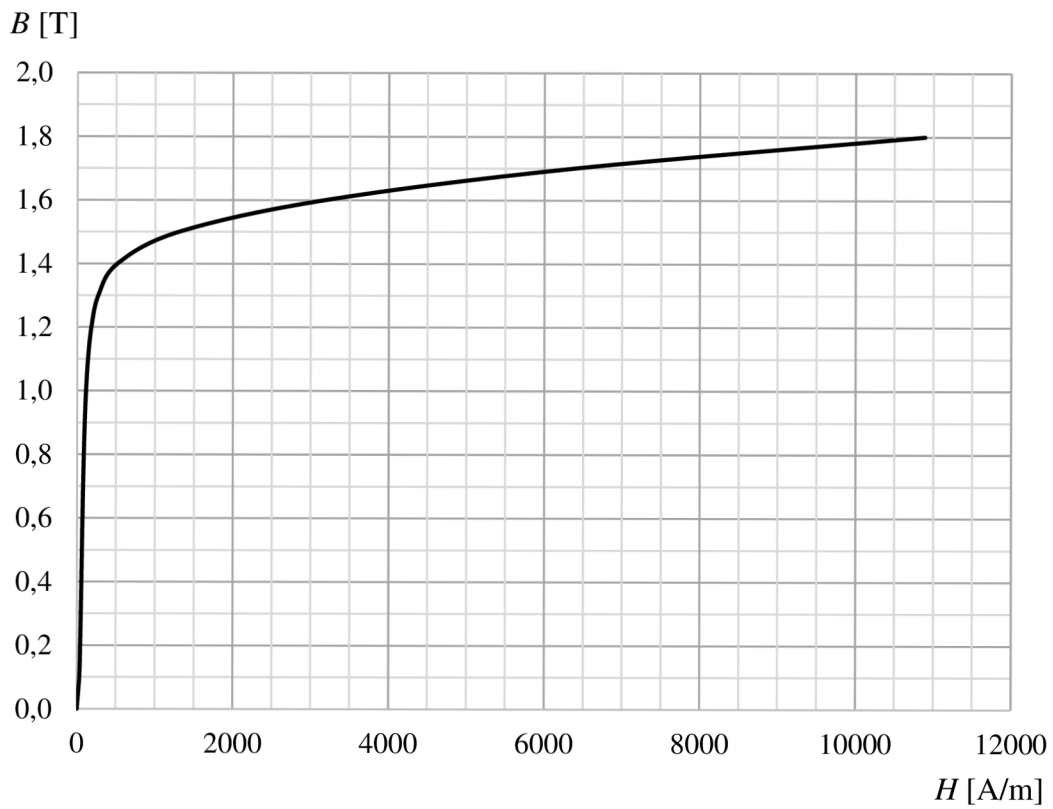
$$S_{dS} = 383 \text{ mm}^2 \quad (3.80)$$



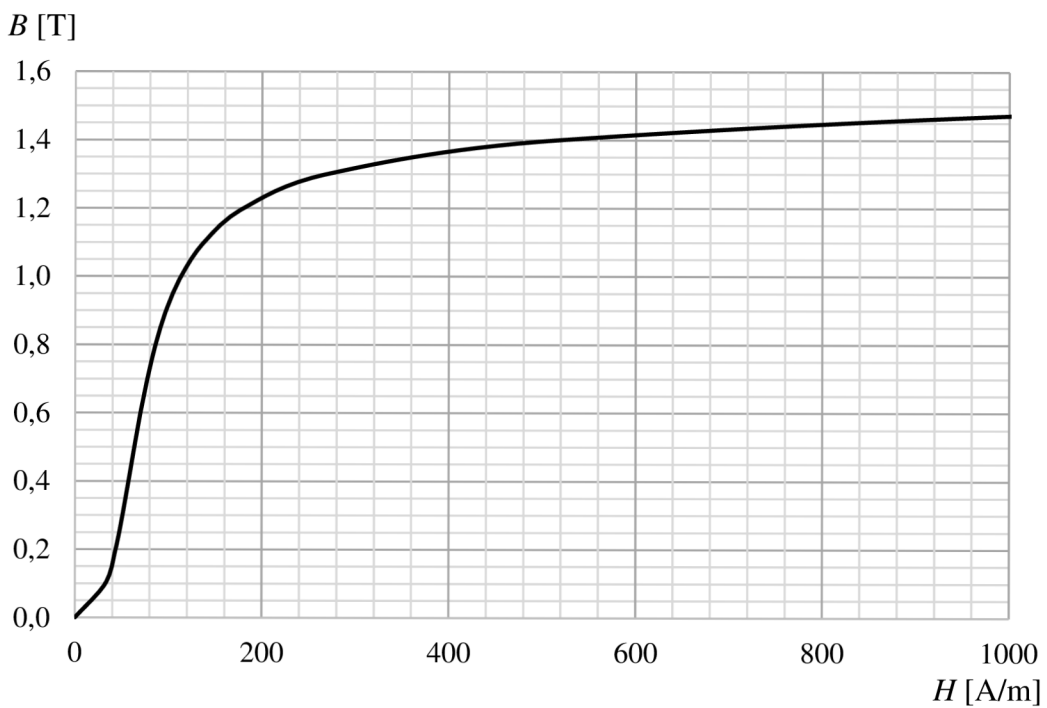
Obr. 3-4: Statorová drážka [4]

3.7. Magnetická napětí, jha statoru a rotoru, výška permanentních magnetů

Plechý statoru a rotoru referenčního stroje jsou z materiálu **M400-50A**. Na Obr. 3-5 je vyobrazena B-H křivka tohoto materiálu. Na Obr. 3-6 je vyobrazen detail B-H křivky materiálu M400-50A, a to pro hodnoty intenzity magnetického pole do 1000 A/m. B-H křivka byla zkonstruována z tabulkových hodnot materiálu M400-50A uvedených ve zdroji [8].



Obr. 3-5: B-H křivka materiálu M400-50A



**Obr. 3-6: Detail B-H křivky materiálu M400-50A
pro intenzity magnetického pole do 1000 A/m**

Nyní budeme mít za cíl výpočet magnetického napětí na zubu statoru. Pro tento výpočet potřebujeme znát intenzitu magnetického pole v zubu statoru. Zdroj [3] říká, že neplatí-li, že materiál zubu není nasycen, nebude zub vést celý magnetický tok. Část magnetického toku bude zub obtékat přes statorovou drážku. Tuto skutečnost zohledňuje zdroj [3] definováním plochy S_u , přes kterou proudí část magnetického toku, která neprochází zubem. Poměr plochy S_u a plochy zubu statoru S_d je dle [3] dán:

$$\frac{S_u}{S_d} = \frac{l' \cdot \tau_u}{k_{pFe} \cdot l \cdot b_d} - 1 \quad (3.81)$$

Funkce popisující závislost magnetické indukce v zubu statoru na základě intenzity magnetického pole je dle [3] dána:

$$B_d = B_{dapp} - \frac{S_u}{S_d} \cdot \mu_0 \cdot H_d \quad (3.82)$$

kde H_d je intenzita magnetického pole v zubu statoru. Zdánlivá indukce zubu statoru již byla dříve zvolena a má dle rovnice (3.49) hodnotu $B_{dapp} = 1,6$ T.

Funkci danou rovnicí (3.82) nyní částečně vyčíslíme, abychom ji mohli graficky vynést.

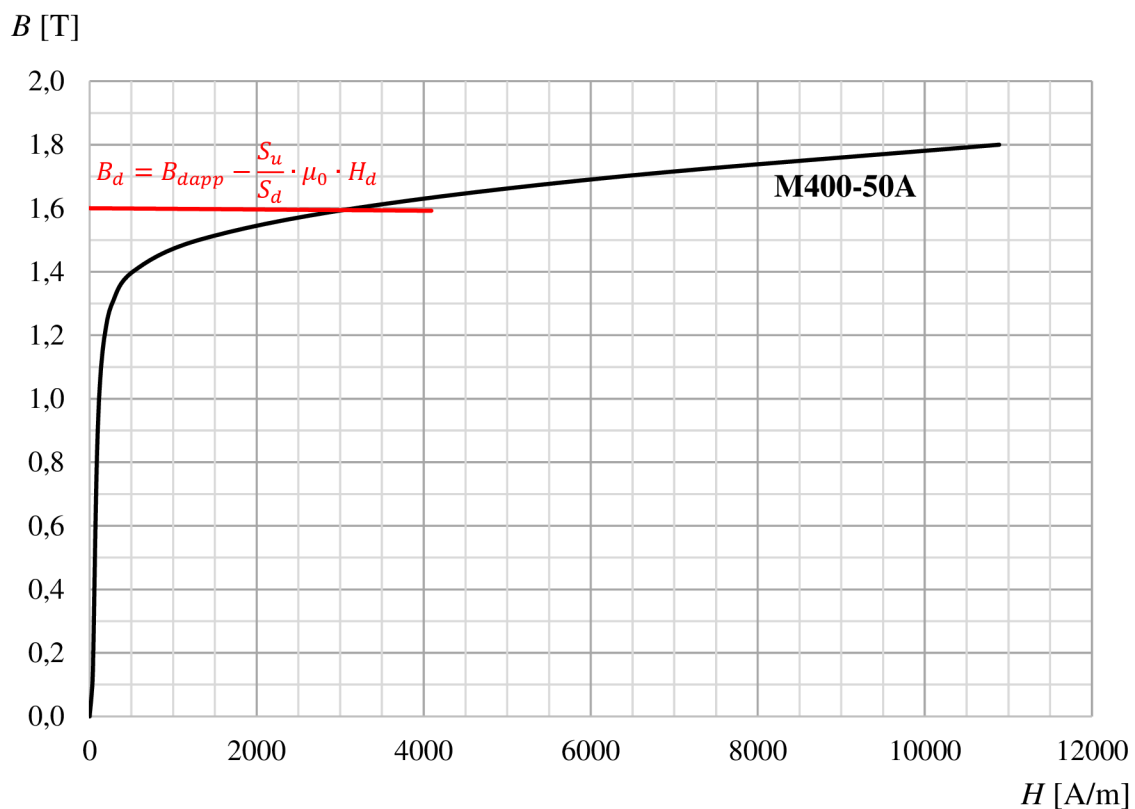
$$B_d = B_{dapp} - \frac{S_u}{S_d} \cdot \mu_0 \cdot H_d \quad (3.83)$$

$$B_d = B_{dapp} - \left(\frac{l' \cdot \tau_u}{k_{pFe} \cdot l \cdot b_d} - 1 \right) \cdot \mu_0 \cdot H_d \quad (3.84)$$

$$B_d = 1,6 - \left(\frac{253 \cdot 10^{-3} \cdot 15,71 \cdot 10^{-3}}{0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 6,6 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H_d \quad (3.85)$$

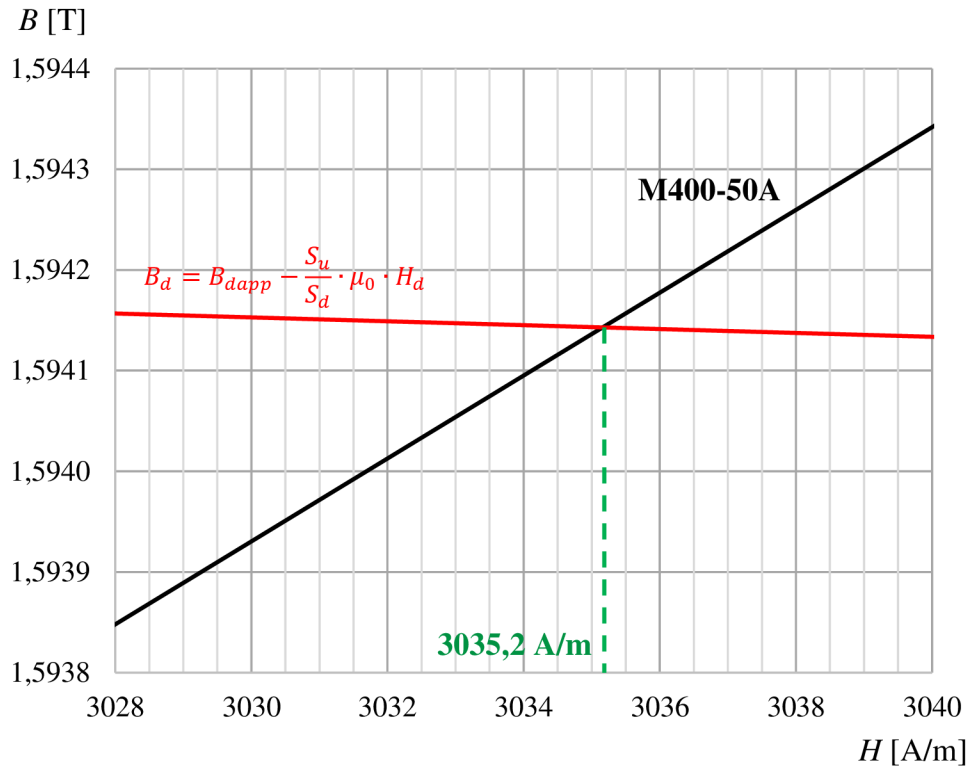
$$B_d = 1,6 - 1,929753601 \cdot 10^{-6} \cdot H_d \quad (3.86)$$

Intenzitu magnetického pole zjistíme graficky. Rovnici (3.86) nyní vyneseme do B-H křivky materiálu M400-50A. Průsečík B-H křivky materiálu M400-50A a závislosti popsané rovnicí (3.86) udá magnetickou indukci v zubu statoru i intenzitu magnetického pole. Obě křivky jsou vyneseny na **Obr. 3-7**.



**Obr. 3-7: B-H křivka materiálu M400-50A (černá)
a vynesená závislost dle rovnice (3.86) (červená)**

Dle **Obr. 3-7** by se obě křivky měly protnout v intenzitě magnetického pole kolem 3000 A/m. Na **Obr. 3-8** byly závislosti z **Obr. 3-7** přiblíženy tak, aby bylo možné s co největší přesností určit průsečík.



Obr. 3-8: Detail B-H křivky materiálu M400-50A (černá) a vnesené závislosti dle rovnice (3.86) (červená)

Dle **Obr. 3-8** bude intenzita magnetického pole v zubu statoru:

$$H_d = 3035,2 \text{ A/m} \quad (3.87)$$

Nyní spočítáme magnetické napětí v zubu statoru, které můžeme dle zdroje [4] z obecného (integrálního) tvaru rovnice magnetického napětí zjednodušit na tvar:

$$U_{m,d} = H_d \cdot (h_3 + h_5) = 3035,2 \cdot (1 \cdot 10^{-3} + 33,5 \cdot 10^{-3}) = 104,7 \text{ A} \quad (3.88)$$

Po výpočtu magnetického napětí na zubu statoru podotýká zdroj [4], že v obecném případě návrhu elektrického stroje je nyní třeba zkontrolovat činitel sycení zubu. Dále zdroj [4] uvádí, že v případě synchronního motoru s permanentními magnety však není nutné činitel sycení ověřovat, neboť sycení zubu u tohoto typu stroje neovlivňuje tvar průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře, tedy bude platit $\alpha_{pM} = \text{konst.}$

Nyní budeme mít za cíl výpočet výšek jha statoru a jha rotoru. Zdroj [4] pro výpočet výšek jha statoru a jha rotoru v nich volí hodnoty magnetické indukce. Pro náš typ stroje je dle zdroje [3] rozsah magnetických indukcí ve jhu statoru 1,1 až 1,5 T a ve jhu rotoru 1,3 až 1,6 T. Zvolíme:

$$B_{jS} = 1,3 \text{ T} \quad (3.89)$$

$$B_{jR} = 1,4 \text{ T} \quad (3.90)$$

kde B_{jS} je magnetická indukce ve jhu statoru a B_{jR} je magnetická indukce ve jhu rotoru.

Magnetická indukce ve jhu statoru B_{jS} je dána [4]:

$$B_{jS} = \frac{\phi_m}{2 \cdot S_{jS}} \quad (3.91)$$

kde ϕ_m je magnetický tok procházející vzduchovou mezerou a S_{jS} je průřez jha statoru. Magnetický tok procházející vzduchovou mezerou lze vyjádřit [4]:

$$\phi_m = \alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l' \quad (3.92)$$

Průřez jha statoru lze vypočítat [4]:

$$S_{jS} = k_{pFe} \cdot l \cdot h_{jS} \quad (3.93)$$

kde h_{jS} je výška jha statoru. Dosazením rovnice (3.92) a (3.93) do rovnice (3.91) dostaneme:

$$B_{jS} = \frac{\alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{pFe} \cdot l \cdot h_{jS}} \quad (3.94)$$

Z rovnice (3.94) vyjádříme výšku jha statoru [4]:

$$h_{jS} = \frac{\alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{pFe} \cdot l \cdot B_{jS}} = \frac{0,80 \cdot 0,621 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 1,3} = 14,33 \text{ mm} \quad (3.95)$$

Výška jha statoru je dle dokumentace referenčního stroje:

$$h_{jS} = 18 \text{ mm} \quad (3.96)$$

Výšce jha statoru danou rovnicí (3.96) odpovídá magnetická indukce ve jhu statoru:

$$B_{jS} = \frac{\alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{pFe} \cdot l \cdot h_{jS}} = \frac{0,80 \cdot 0,621 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-3}} = 1,035 \text{ T} \quad (3.97)$$

Dále budeme počítat s výškou jha statoru dle dokumentace. Analogicky k rovnici (3.95) lze spočítat výšku jha rotoru [4]:

$$h_{jR} = \frac{\alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{pFe} \cdot l \cdot B_{jR}} = \frac{0,80 \cdot 0,621 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4} = 13,30 \text{ mm} \quad (3.98)$$

Výšku jha rotoru s dokumentací referenčního stroje porovnávat nebudeme, neboť jho rotoru musí být dimenzováno také mechanicky z hlediska sil při otáčení rotoru.

Nyní vypočítáme magnetická napětí na jhu statoru a na jhu rotoru. Dle zdroje [3] je přesný výpočet těchto magnetických napětí možný jen numericky. Pro „ruční“ výpočet těchto je využíváno přepočítávacích koeficientů c_S (pro stator) a c_R (pro rotor), které respektují nelinearitu intenzity magnetického pole ve jhu. Magnetická napětí ve jhu statoru $U_{m,jS}$ a jhu rotoru $U_{m,jR}$ spočteme [3]:

$$U_{m,jS} = c_S \cdot H_{jS} \cdot \tau_{jS} \quad (3.99)$$

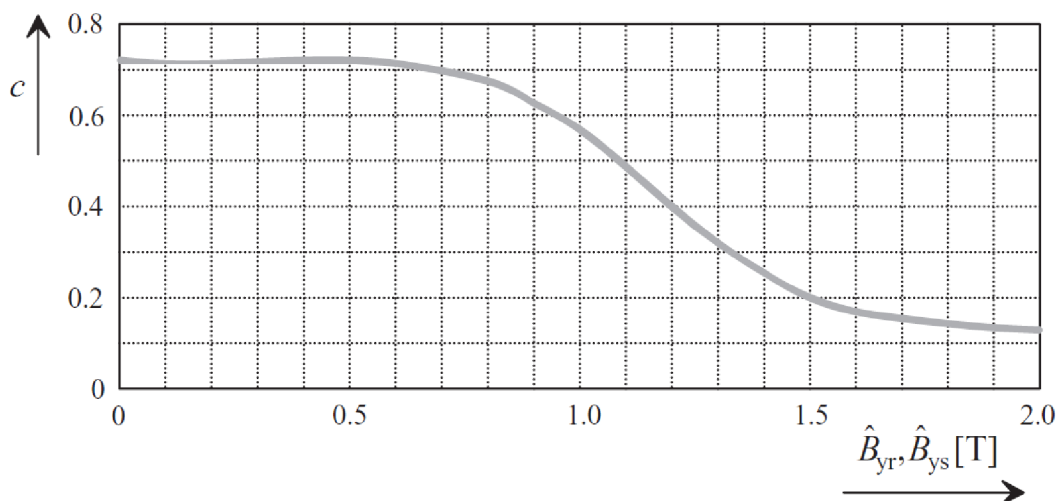
$$U_{m,jR} = c_R \cdot H_{jR} \cdot \tau_{jR} \quad (3.100)$$

kde H_{jS} (resp. H_{jR}) je intenzita magnetického pole ve jhu statoru (resp. rotoru) a τ_{jS} (resp. τ_{jR}) je pólová rozteč ve středu jha statoru (resp. rotoru).

Přepočítávací koeficienty c_S a c_R získáme z **Obr. 3-9** [3]:

$$c_S = 0,55 \quad (3.101)$$

$$c_R = 0,26 \quad (3.102)$$

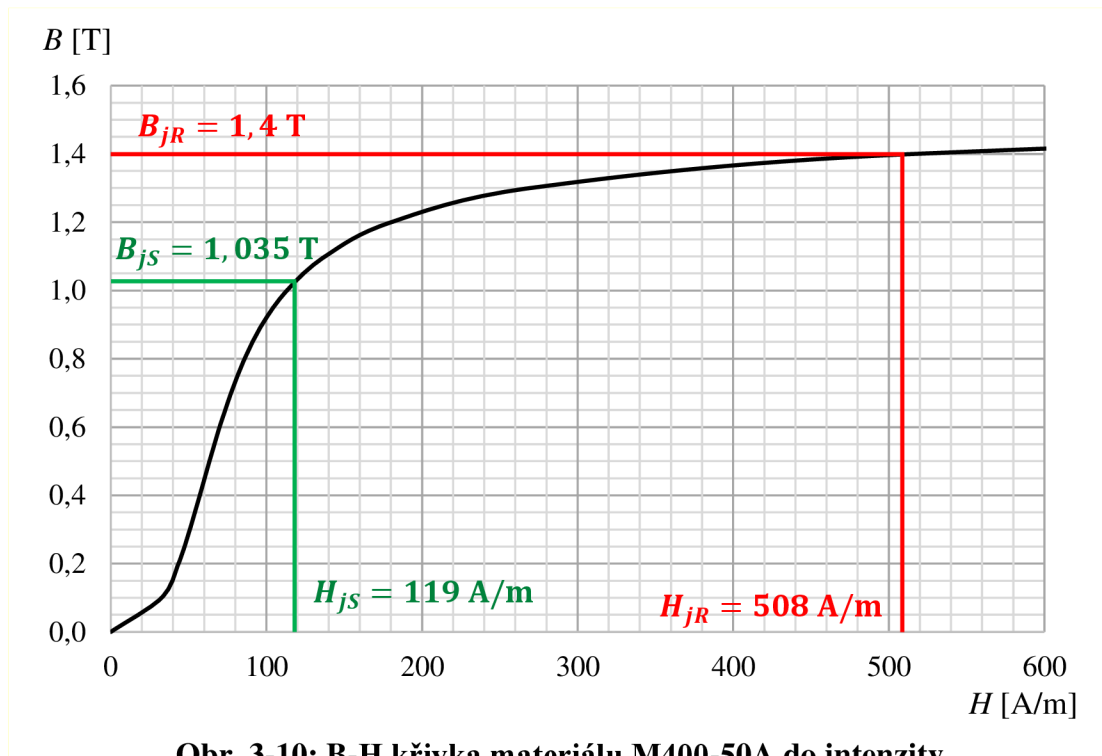


Obr. 3-9: Přepočítávací koeficient pro jha statoru a rotoru [3]

Intenzity magnetického pole ve jhu statoru H_{jS} a jhu rotoru H_{jR} odečteme z B-H křivky materiálu M400-50A (Obr. 3-10):

$$H_{jS} = 119 \text{ A/m} \quad (3.103)$$

$$H_{jR} = 508 \text{ A/m} \quad (3.104)$$



Obr. 3-10: B-H křivka materiálu M400-50A do intenzity magnetického pole 600 A/m a určení intenzit magnetického pole ve jhu statoru a rotoru

Pólová rozteč ve středu jha statoru je dána [4]:

$$\tau_{jS} = \frac{\pi \cdot D_{jS}}{2p} \quad (3.105)$$

kde D_{jS} je střední průměr jha statoru, který je dán:

$$D_{jS} = D_S + 2 \cdot (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_6) + h_{jS} \quad (3.106)$$

$$D_{jS} = 360 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} + 38,6 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-3}) + 18 \cdot 10^{-3} = 462 \text{ mm} \quad (3.107)$$

Nyní spočítáme pólovou rozteč ve středu jha statoru [4]:

$$\tau_{jS} = \frac{\pi \cdot D_{jS}}{2p} = \frac{\pi \cdot 462 \cdot 10^{-3}}{16} = 90,71 \text{ mm} \quad (3.108)$$

Magnetické napětí na jhu statoru bude [3]:

$$U_{m,jS} = c_S \cdot H_{jS} \cdot \tau_{jS} = 0,55 \cdot 119 \cdot 90,71 \cdot 10^{-3} = 5,9 \text{ A} \quad (3.109)$$

Pólová rozteč ve středu jha rotoru je dána vztahem [4]:

$$\tau_{jR} = \frac{\pi \cdot D_{jR}}{2p} \quad (3.110)$$

kde D_{jR} je střední průměr jha rotoru, pro který platí [4]:

$$D_{jR} = D_r - 2 \cdot h_{PM} - h_{jR} \quad (3.111)$$

kde h_{PM} je výška permanentních magnetů.

Dosadíme rovnici (3.111) do rovnice (3.110) a dostaneme pro střední průměr jha rotoru [4]:

$$\tau_{jR} = \frac{\pi}{2p} \cdot (D_r - 2 \cdot h_{PM} - h_{jR}) \quad (3.112)$$

Střední průměr rotoru zatím spočítat nemůžeme, neboť neznáme výšku permanentních magnetů.

V dalším kroku výpočtu budeme navrhovat výšku permanentních magnetů na rotoru. Ke stanovení této výšky musíme znát magnetická napětí na jednotlivých částech stroje. Cílem tedy bude nejprve tato magnetická napětí vypočítat.

Magnetická napětí na zubu statoru a jhu statoru byla již vypočítána a jejich hodnoty jsou:

$$U_{m,d} = 104,7 \text{ A} \quad (3.113)$$

$$U_{m,jS} = 5,9 \text{ A} \quad (3.114)$$

Nyní spočítáme magnetické napětí na vzduchové mezeře. Začneme výpočtem Carterova činitele k_C , který bude sloužit pro výpočet ekvivalentní vzduchové mezery [4]:

$$k_C = \frac{\tau_u}{\tau_u - \kappa \cdot b_1} \quad (3.115)$$

kde κ je dle zdroje [3] činitel pro redukcí otevíření drážky. Tento činitel spočítáme dle následující rovnice s využitím délky vzduchové mezery δ a otevíření drážky b_1 [4]:

$$\kappa = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\operatorname{arctg}\left(\frac{b_1}{2\delta}\right) - \frac{2\delta}{b_1} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2\delta}\right)^2} \right] \quad (3.116)$$

$$\kappa = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\operatorname{arctg}\left(\frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}\right) - \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}\right)^2} \right] \quad (3.117)$$

$$\kappa = 0,2794 \quad (3.118)$$

Zdroj [3] uvádí pro výpočet činitele κ mimo rovnice (3.116) také následující empirický vztah:

$$\kappa \approx \frac{\frac{b_1}{\delta}}{5 + \frac{b_1}{\delta}} \quad (3.119)$$

Pro zajímavost jako porovnání výsledků získaných přesným a empirickým vztahem spočítáme Carterův činitel i dle rovnice (3.119).

$$\kappa \approx \frac{\frac{b_1}{\delta}}{5 + \frac{b_1}{\delta}} = \frac{\frac{3 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}}}{5 + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}}} = 0,2857 \quad (3.120)$$

Porovnáním výsledků rovnic (3.118) a (3.120) vidíme rozdíl výsledku činitele κ při zjednodušeném výpočtu empirickým vztahem na konkrétním stroji v této práci. Dále bude využit činitel κ dle rovnice (3.118). Nyní spočítáme Carterův činitel [4]:

$$k_C = \frac{\tau_u}{\tau_u - \kappa \cdot b_1} = \frac{15,71 \cdot 10^{-3}}{15,71 \cdot 10^{-3} - 0,2794 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 1,056 \quad (3.121)$$

Pomocí Carterova činitele spočítáme ekvivalentní délku vzduchové mezery δ_e , která respektuje vliv drážek na průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře [3]:

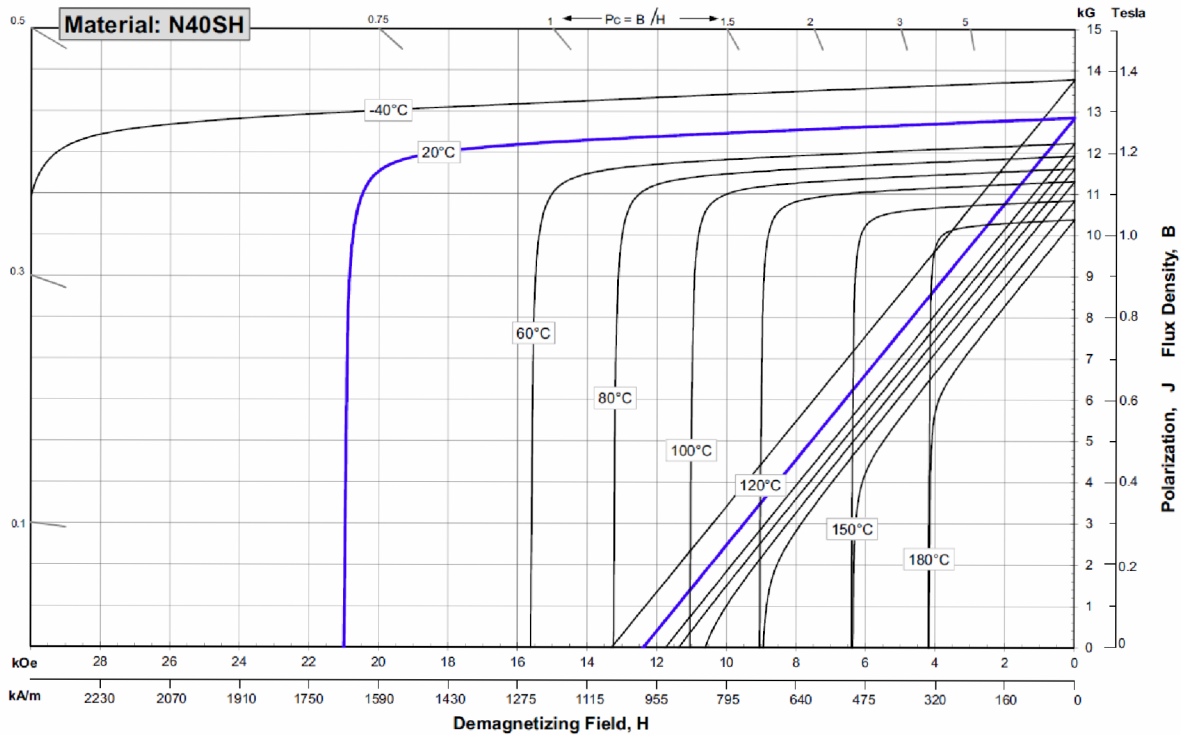
$$\delta_e = k_C \cdot \delta = 1,056 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 1,584 \text{ mm} \quad (3.122)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře bude [4]:

$$U_{m,\delta e} = \frac{B_{max}}{\mu_0} \cdot \delta_e = \frac{0,621}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,584 \cdot 10^{-3} = 782,8 \text{ A} \quad (3.123)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua.

Nyní spočteme výšku permanentního magnetu. Uvažujeme stejné magnety jako v referenčním stroji, které jsou **NdFeB s označením PZK 40 SH**. Vzhledem k tomu, že jakosti magnetů (zde 40 SH) jsou standardizované, lze použít dokumentaci od libovolného výrobce, zde od Arnold Magnetic Technologies. Demagnetizační B-H charakteristika magnetů 40 SH výrobce Arnold Magnetic Technologies je vyobrazena na **Obr. 3-11**.



Obr. 3-11: Demagnetizační B-H charakteristika magnetů NdFeB jakosti 40 SH [9]

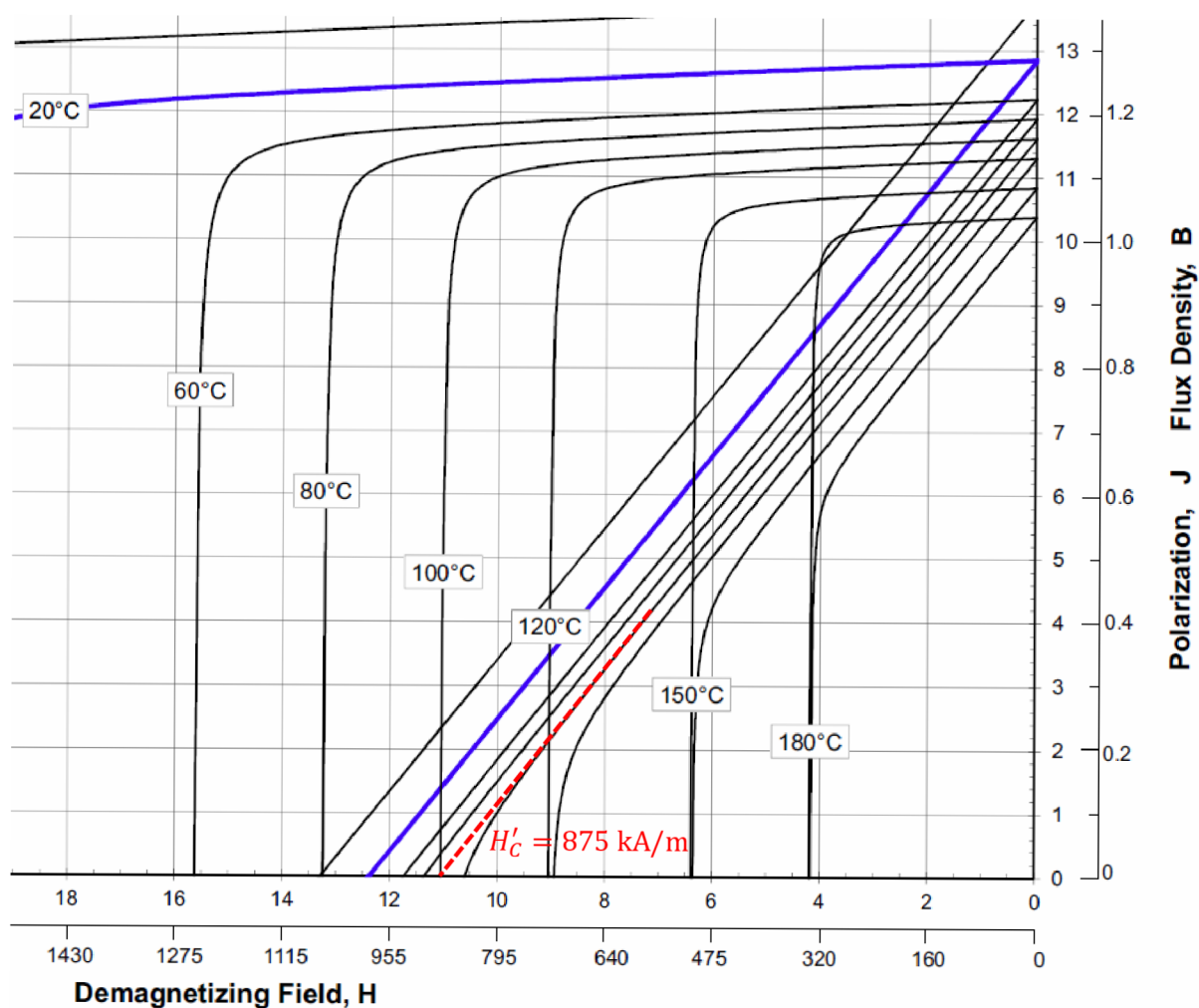
Permanentní magnet musí pokrýt úbytky magnetického napětí na všech částech stroje. Musí tedy platit [4]:

$$U_{m,celk} = U_{m,\delta e} + U_{m,d} + U_{m,PM} + \frac{U_{m,jS}}{2} + \frac{U_{m,jR}}{2} = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} \cdot h_{PM} \quad (3.124)$$

kde $U_{m,celk}$ je celkové magnetické napětí, $U_{m,PM}$ je úbytek magnetického napětí na permanentním magnetu v pracovním bodě, B_r je remanentní indukce permanentního magnetu a μ_{rPM} je jeho relativní permeabilita, která je dána [3]:

$$\mu_{rPM} = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot H'_C} \quad (3.125)$$

kde H'_C je fiktivní koercitivní síla permanentního magnetu, která udává koercitivní sílu permanentního magnetu, pokud by průběh jeho B-H charakteristiky byl lineární, tedy neexistovalo by na ní typické „koleno“. Její odečtení na naznačeno na **Obr. 3-12**, kdy uvažujeme provozní teplotu stroje 100 °C.



Obr. 3-12: Část B-H charakteristiky magnetů NdFeB jakosti 40 SH z Obr. 3-11 [9] a určení fiktivní koercitivní síly

Důvodem nahrazení skutečné koercitivní síly fiktivní hodnotou spočívá ve skutečnosti, že pokud bychom ze skutečné hodnoty koercitivní síly určili relativní permeabilitu permanentního magnetu, dopustili bychom se chyby v celém rozsahu B-H křivky. Relativní permeabilitu lze považovat za konstantní pouze v lineární části B-H charakteristiky. Pro tuto část určíme relativní permeabilitu právě užitím hodnoty H'_C . Je důležité, aby byl stroj provozován pouze v lineární části B-H charakteristiky permanentního magnetu, tedy pracovní bod permanentního magnetu se nesmí dostat do „kolena“ nebo za něj, neboť by nastala jeho trvalá demagnetizace.

Remanentní indukce pro uvažovanou provozní teplotu stroje 100 °C je dle **Obr. 3-11** (resp. **Obr. 3-12**):

$$B_r = 1,16 \text{ T} \quad (3.126)$$

Pro úbytek magnetického napětí na permanentním magnetu v pracovním bodě bude platit [4]:

$$U_{m,PM} = H_{PM} \cdot h_{PM} = \frac{B_{PM}}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} \cdot h_{PM} \quad (3.127)$$

kde H_{PM} je intenzita magnetického pole permanentního magnetu v pracovním bodě a B_{PM} je magnetická indukce permanentního magnetu v pracovním bodě.

Magnetická indukce permanentního magnetu v pracovním bodě je shodná s magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře [4]:

$$B_{PM} = B_{max} = 0,621 \text{ T} \quad (3.128)$$

Dosazením rovnic (3.100), (3.112), (3.125) a (3.127) do rovnice (3.124) a její následnou úpravou dostaneme vztah pro výpočet výšky permanentního magnetu [4]:

$$h_{PM} = \frac{U_{m,\delta e} + U_{m,d} + \frac{U_{m,jS}}{2} + \frac{c_R \cdot H_{JR}}{2} \cdot \frac{\pi}{2p} \cdot (D_r - h_{JR})}{H'_C - \frac{H'_C}{B_r} \cdot B_{PM} + c_R \cdot H_{JR} \cdot \frac{\pi}{2p}} \quad (3.129)$$

$$h_{PM} = \frac{782,8 + 104,7 + \frac{5,9}{2} + \frac{0,26 \cdot 508}{2} \cdot \frac{\pi}{16} \cdot (357 \cdot 10^{-3} - 13,30 \cdot 10^{-3})}{875 \cdot 10^3 - \frac{875 \cdot 10^3}{1,16} \cdot 0,621 + 0,26 \cdot 508 \cdot \frac{\pi}{16}} \quad (3.130)$$

$$h_{PM} = 2,2 \text{ mm} \quad (3.131)$$

Dosazením rovnice (3.125) do rovnice (3.127) a její následnou úpravou dopočítáme úbytek magnetického napětí na permanentním magnetu [4]:

$$U_{m,PM} = \frac{H'_C}{B_r} \cdot B_{PM} \cdot h_{PM} \quad (3.132)$$

$$U_{m,PM} = \frac{875 \cdot 10^3}{1,16} \cdot 0,621 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} = 1030,5 \text{ A} \quad (3.133)$$

Nyní můžeme dopočítat střední průměr jha rotoru a pólovou rozteč ve středu jha rotoru [4]:

$$D_{jR} = D_r - 2 \cdot h_{PM} - h_{jR} = 357 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} - 13,30 \cdot 10^{-3} = 339,3 \text{ mm} \quad (3.134)$$

$$\tau_{jR} = \frac{\pi \cdot D_{jR}}{2p} = \frac{\pi \cdot 339,3 \cdot 10^{-3}}{16} = 66,62 \text{ mm} \quad (3.135)$$

Magnetické napětí na jhu rotoru bude [3]:

$$U_{m,jR} = c_R \cdot H_{jR} \cdot \tau_{jR} = 0,26 \cdot 508 \cdot 66,62 \cdot 10^{-3} = 8,8 \text{ A} \quad (3.136)$$

V poslední řadě dopočítáme vnější průměr statoru D_{SO} a vnitřní průměr rotoru D_{RI} [4]:

$$D_{SO} = D_{jS} + h_{jS} = 462 \cdot 10^{-3} + 18 \cdot 10^{-3} = 480 \text{ mm} \quad (3.137)$$

$$D_{RI} = D_{jR} - h_{jR} = 339,3 \cdot 10^{-3} - 13,3 \cdot 10^{-3} = 326 \text{ mm} \quad (3.138)$$

Celkové magnetické napětí magnetického obvodu ve stroji bude dle zdroje [4]:

$$U_{m,celk} = U_{m,\delta e} + U_{m,d} + U_{m,PM} + \frac{U_{m,jS}}{2} + \frac{U_{m,jR}}{2} \quad (3.139)$$

$$U_{m,celk} = 782,8 + 104,7 + 1030,5 + \frac{5,9}{2} + \frac{8,8}{2} = 1925,4 \text{ A} \quad (3.140)$$

Nyní spočítáme přetížitelnost navrženého stroje s ohledem na nebezpečí trvalé demagnetizace permanentního magnetu statorovým proudem při přetěžování. Vyjdeme z rovnice uvedené ve zdroji [10], která zanedbává úbytky magnetického napětí na feromagnetických částech stroje a uvažuje pouze úbytek magnetického napětí ve vzduchové mezeře a reakci kotvy. Tuto rovnici rozšíříme o úbytek magnetického napětí na permanentním magnetu:

$$U_{m,celk} = U_{m,\delta e} + U_{m,PM} + \frac{1}{2} \cdot U_{m,reakce} = H'_C \cdot h_{PM} \quad (3.141)$$

kde $U_{m,reakce}$ je reakce kotvy. Reakci kotvy budeme stanovovat v časovém okamžiku, kdy je proud fáze U nulový a proudy fázemi V a W jsou nenulové:

$$i_U = 0 \quad (3.142)$$

$$i_V = -i_W = \sqrt{2} \cdot I_{ef} \cdot \sin \varphi_F \quad (3.143)$$

kde I_{ef} je efektivní hodnota proudu fáze vinutí a φ_F je okamžitý elektrický úhel fáze V v uvažovaný časový okamžik a platí pro něj:

$$\varphi_F = 120^\circ \quad (3.144)$$

Protože je satorové vinutí zapojeno do hvězdy, bude platit:

$$I_{ef} = I_S = 84,3 \text{ A} \quad (3.145)$$

Vzorec pro výpočet reakce kotvy je uveden ve zdroji [10]. Tvar rovnice ve zdroji [10] upravíme na tvar, který bude pro náš výpočet výhodnější:

$$U_{m,reakce} = q \cdot m_A \cdot N_{aS} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I_{ef}}{a} \cdot \sin \varphi_F \cdot \frac{I_k}{I_n} \quad (3.146)$$

kde m_A je počet současně aktivních fází v uvažovaný časový okamžik a $\frac{I_k}{I_n}$ je přetížitelnost stroje. Protože v uvažovaný časový okamžik prochází proud pouze fázemi V a W, platí:

$$m_A = 2 \quad (3.147)$$

Magnetická indukce permanentního magnetu musí být v lineární části jeho demagnetizační B-H charakteristiky, tedy se jeho pracovní bod nesmí dostat do jejího „kolena“ nebo za něj. Z tohoto důvodu odečteme z **Obr. 3-11** (resp. **Obr. 3-12**) s rezervou minimální přípustnou magnetickou indukci permanentního magnetu $B_{PM,min}$:

$$B_{PM,min} = 0,2 \text{ T} \quad (3.148)$$

Minimální přípustná magnetická indukce permanentního magnetu je shodná s magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře v daném stavu přetěžování:

$$B_{PM,min} = B_{\delta,min} = B_{min} = 0,2 \text{ T} \quad (3.149)$$

Dosazením rovnice (3.123), (3.127) a (3.146) do rovnice (3.141) a její následnou úpravou dostaneme pro výpočet přetížitelnosti stroje:

$$\frac{I_k}{I_n} = \frac{2 \cdot \left(H'_C \cdot h_{PM} - \frac{B_{min}}{\mu_0} \cdot \delta_e - \frac{H'_C}{B_r} \cdot B_{min} \cdot h_{PM} \right)}{q \cdot m_A \cdot N_{ds} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I_{ef}}{a} \cdot \sin \varphi_F} \quad (3.150)$$

$$\frac{I_k}{I_n} = \frac{2 \cdot \left(875 \cdot 10^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} - \frac{0,2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,584 \cdot 10^{-3} - \frac{875 \cdot 10^3}{1,16} \cdot 0,2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} \right)}{1,5 \cdot 2 \cdot 42 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 84,3}{4} \cdot \sin 120^\circ} \quad (3.151)$$

$$\frac{I_k}{I_n} = 0,825 \quad (3.152)$$

Přetížitelnost stroje je menší než 1 a navržený stroj nebude fungovat. Musíme navýšit výšku permanentních magnetů. Tuto výšku přebereme z dokumentace referenčního stroje:

$$h_{PM} = 6 \text{ mm} \quad (3.153)$$

Změna výšky permanentního magnetu vyvolá změnu magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Nyní musíme provést iteraci magnetické indukce ve vzduchové mezeře, která bude provedena v následující podkapitole.

3.8. Iterace magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Následující výpočet bude mít za cíl spočítat magnetickou indukci ve vzduchové mezeře po změně výšky permanentních magnetů. Protože na magnetické indukci ve vzduchové mezeře závisí sycení jednotlivých částí stroje, musíme je nyní zanedbat, čímž získáme prvotní odhad velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Protože byl již postup výpočtu stroje popsán v předchozích podkapitolách, bude zde proveden výpočet magnetické indukce ve vzduchové mezeře **bez dodatečného komentáře**.

Celkové magnetické napětí ve stroji – rovnice (3.124) – se zanedbáním úbytků na feromagnetických částech stroje:

$$U_{m,celk} \approx U_{m,\delta_e} + U_{m,PM} \approx \frac{B_r}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} \cdot h_{PM} \quad (3.154)$$

Po dosazení rovnic (3.123) a (3.127) a úpravě s uvažováním $B_{PM} = B_{max}$:

$$B_{max} \approx \frac{B_r \cdot h_{PM}}{\mu_{rPM} \cdot \delta_e + h_{PM}} = \frac{1,16 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{1,055 \cdot 1,584 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3}} = 0,907 \text{ T} \quad (3.155)$$

Šířka statorového zubu – rovnice (3.56):

$$b_d = \frac{l' \cdot \tau_u}{k_{pFe} \cdot l} \cdot \frac{B_{max}}{B_{dapp}} + 0,1 \cdot 10^{-3} \quad (3.156)$$

$$b_d = \frac{253 \cdot 10^{-3} \cdot 15,71 \cdot 10^{-3}}{0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,907}{1,6} + 0,1 \cdot 10^{-3} = 9,6 \text{ mm} \quad (3.157)$$

Magnetická indukce v zubu statoru dle rovnice (3.84):

$$B_d = B_{dapp} - \left(\frac{l' \cdot \tau_u}{k_{pFe} \cdot l \cdot b_d} - 1 \right) \cdot \mu_0 \cdot H_d \quad (3.158)$$

$$B_d = B_{dapp} - \left(\frac{253 \cdot 10^{-3} \cdot 15,71 \cdot 10^{-3}}{0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 9,6 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H_d \quad (3.159)$$

$$B_d = B_{dapp} - 9,34006519 \cdot 10^{-7} \cdot H_d \quad (3.160)$$

Na **Obr. 3-7** a **Obr. 3-8** je naznačeno získání hodnot B_d a H_d z průsečíku závislosti magnetické indukce statorového zubu na intenzitě magnetického pole a B-H křivky materiálu M400-50A. Novou závislost zde uvádět nebudeme, uvedeme přímo průsečík:

$$H_d = 3120,6 \text{ A/m} \quad (3.161)$$

$$B_d = 1,59709 \text{ T} \cong 1,597 \text{ T} \quad (3.162)$$

Magnetické napětí na zubu statoru – rovnice (3.88):

$$U_{m,d} = H_d \cdot (h_3 + h_5) = 3120,6 \cdot (1 \cdot 10^{-3} + 33,5 \cdot 10^{-3}) = 107,7 \text{ A} \quad (3.163)$$

Magnetická indukce ve jhu statoru – rovnice (3.94):

$$B_{jS} = \frac{\alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{pFe} \cdot l \cdot h_{jS}} = \frac{0,80 \cdot 0,907 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-3}} = 1,511 \text{ T} \quad (3.164)$$

Intenzita magnetického pole v zubu statoru – B-H křivka materiálu M400-50
(**Obr. 3-5**):

$$H_{jS} = 1307 \text{ A/m} \quad (3.165)$$

Přepočítávací součinitel pro jho statoru dle **Obr. 3-9**:

$$c_S = 0,195 \quad (3.166)$$

Magnetické napětí na jhu statoru – rovnice (3.99):

$$U_{m,jS} = c_S \cdot H_{jS} \cdot \tau_{jS} = 0,195 \cdot 1307 \cdot 90,71 \cdot 10^{-3} = 23,1 \text{ A} \quad (3.167)$$

Výška jha rotoru – rovnice (3.98):

$$h_{jR} = \frac{\alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{pFe} \cdot l \cdot B_{jR}} = \frac{0,80 \cdot 0,907 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4} = 19,43 \text{ mm} \quad (3.168)$$

Pólová rozteč ve středu jha rotoru – rovnice (3.112):

$$\tau_{jR} = \frac{\pi}{2p} \cdot (D_r - 2 \cdot h_{PM} - h_{jR}) \quad (3.169)$$

$$\tau_{jR} = \frac{\pi}{16} \cdot (357 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - 19,43 \cdot 10^{-3}) = 63,93 \text{ mm} \quad (3.170)$$

Magnetické napětí na jhu rotoru – rovnice (3.100):

$$U_{m,jR} = c_R \cdot H_{jR} \cdot \tau_{jR} = 0,26 \cdot 508 \cdot 63,93 \cdot 10^{-3} = 8,4 \text{ A} \quad (3.171)$$

Z celkového magnetického napětí ve stroji – rovnice (3.123), (3.124), (3.127) a (3.128) – vyjádříme magnetickou indukci ve vzduchové mezeře:

$$B_{max} = \frac{H'_C \cdot h_{PM} - U_{m,d} - \frac{U_{m,jS}}{2} - \frac{U_{m,jR}}{2}}{\frac{\delta_e}{\mu_0} + \frac{H'_C}{B_r} \cdot h_{PM}} \quad (3.172)$$

$$B_{max} = \frac{875 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - 107,7 - \frac{23,1}{2} - \frac{8,4}{2}}{\frac{1,584 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7}} + \frac{875 \cdot 10^3}{1,16} \cdot 6 \cdot 10^{-3}} = 0,886 \text{ T} \quad (3.173)$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře stanovená rovnicí (3.173) se příliš liší od hodnoty stanovené rovnicí (3.155). Musíme provést druhý iterační krok, kdy jako novou magnetickou indukci uvažujeme hodnotu 0,886 T dle rovnice (3.173).

Šířka statorového zubu – rovnice (3.56):

$$b_d = \frac{l' \cdot \tau_u}{k_{pFe} \cdot l} \cdot \frac{B_{max}}{B_{dapp}} + 0,1 \cdot 10^{-3} \quad (3.174)$$

$$b_d = \frac{253 \cdot 10^{-3} \cdot 15,71 \cdot 10^{-3}}{0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,886}{1,6} + 0,1 \cdot 10^{-3} = 9,27 \text{ mm} \quad (3.175)$$

Magnetická indukce v zubu statoru dle rovnice (3.84):

$$B_d = B_{dapp} - \left(\frac{l' \cdot \tau_u}{k_{pFe} \cdot l \cdot b_d} - 1 \right) \cdot \mu_0 \cdot H_d \quad (3.176)$$

$$B_d = B_{dapp} - \left(\frac{253 \cdot 10^{-3} \cdot 15,71 \cdot 10^{-3}}{0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 9,27 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H_d \quad (3.177)$$

$$B_d = B_{dapp} - 1,011990595 \cdot 10^{-6} \cdot H_d \quad (3.178)$$

Průsečík závislosti popsané rovnicí (3.178) a B-H křivky materiálu M400-50A:

$$H_d = 3095,4 \text{ A/m} \quad (3.179)$$

$$B_d = 1,59687 \text{ T} \cong 1,597 \text{ T} \quad (3.180)$$

Magnetické napětí na zubu statoru – rovnice (3.88):

$$U_{m,d} = H_d \cdot (h_3 + h_5) = 3095,4 \cdot (1 \cdot 10^{-3} + 33,5 \cdot 10^{-3}) = 106,8 \text{ A} \quad (3.181)$$

Magnetická indukce ve jhu statoru – rovnice (3.94):

$$B_{jS} = \frac{\alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{pFe} \cdot l \cdot h_{jS}} = \frac{0,80 \cdot 0,886 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-3}} = 1,476 \text{ T} \quad (3.182)$$

Intenzita magnetického pole v zubu statoru – B-H křivka materiálu M400-50

(Obr. 3-5):

$$H_{jS} = 1037 \text{ A/m} \quad (3.183)$$

Přepočítávací součinitel pro jhu statoru dle **Obr. 3-9:**

$$c_S = 0,21 \quad (3.184)$$

Napětí na jhu statoru – rovnice (3.99):

$$U_{m,jS} = c_S \cdot H_{jS} \cdot \tau_{jS} = 0,21 \cdot 1037 \cdot 90,71 \cdot 10^{-3} = 19,8 \text{ A} \quad (3.185)$$

Výška jha rotoru – rovnice (3.98):

$$h_{jR} = \frac{\alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{pFe} \cdot l \cdot B_{jR}} = \frac{0,80 \cdot 0,886 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,95 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4} = 19 \text{ mm} \quad (3.186)$$

Pólová rozteč ve středu jha rotoru – rovnice (3.112):

$$\tau_{jR} = \frac{\pi}{2p} \cdot (D_r - 2 \cdot h_{PM} - h_{jR}) \quad (3.187)$$

$$\tau_{jR} = \frac{\pi}{16} \cdot (357 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - 19 \cdot 10^{-3}) = 64 \text{ mm} \quad (3.188)$$

Magnetické napětí na jhu rotoru – rovnice (3.100):

$$U_{m,jR} = c_R \cdot H_{jR} \cdot \tau_{jR} = 0,26 \cdot 508 \cdot 64 \cdot 10^{-3} = 8,5 \text{ A} \quad (3.189)$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře dle rovnice (3.172):

$$B_{max} = \frac{H'_C \cdot h_{PM} - U_{m,d} - \frac{U_{m,jS}}{2} - \frac{U_{m,jR}}{2}}{\frac{\delta_e}{\mu_0} + \frac{H'_C}{B_r} \cdot h_{PM}} \quad (3.190)$$

$$B_{max} = \frac{875 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - 106,8 - \frac{19,8}{2} - \frac{8,5}{2}}{\frac{1,584 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7}} + \frac{875 \cdot 10^3}{1,16} \cdot 6 \cdot 10^{-3}} = 0,886 \text{ T} \quad (3.191)$$

Hodnota výsledku rovnice (3.191) byla zaokrouhlena na tři desetinná místa a po tomto zaokrouhlení se shoduje s hodnotou magnetické indukce ve vzduchové mezeře spočtenou rovnicí (3.173). **Iteraci zde ukončíme** a dále pro nás bude směrodatná nová iterovaná magnetická indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_{max} = 0,886 \text{ T} \quad (3.192)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře – rovnice (3.123):

$$U_{m,\delta e} = \frac{B_{max}}{\mu_0} \cdot \delta_e = \frac{0,886}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,584 \cdot 10^{-3} = 1116,8 \text{ A} \quad (3.193)$$

Úbytek magnetického napětí na permanentním magnetu – rovnice (3.127) a (3.128):

$$U_{m,PM} = \frac{B_{max}}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} \cdot h_{PM} = \frac{0,886}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,055} \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 4009,8 \text{ A} \quad (3.194)$$

Celkové magnetické napětí ve stroji – rovnice (3.124):

$$U_{m,celk} = U_{m,\delta e} + U_{m,d} + U_{m,PM} + \frac{U_{m,jS}}{2} + \frac{U_{m,jR}}{2} \quad (3.195)$$

$$U_{m,celk} = 1116,8 + 106,8 + 4009,8 + \frac{19,8}{2} + \frac{8,5}{2} = 5247,6 \text{ A} \quad (3.196)$$

Nová přetížitelnost stroje při uvažování $B_{min} = 0,2 \text{ T}$ – rovnice (3.150):

$$\frac{I_k}{I_n} = \frac{2 \cdot \left(H'_C \cdot h_{PM} - \frac{B_{min}}{\mu_0} \cdot \delta_e - \frac{H'_C}{B_r} \cdot B_{min} \cdot h_{PM} \right)}{q \cdot m_A \cdot N_{dS} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I_{ef}}{a} \cdot \sin \varphi_F} \quad (3.197)$$

$$\frac{I_k}{I_n} = \frac{2 \cdot \left(875 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - \frac{0,2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,584 \cdot 10^{-3} - \frac{875 \cdot 10^3}{1,16} \cdot 0,2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \right)}{1,5 \cdot 2 \cdot 42 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 84,3}{4} \cdot \sin 120^\circ} \quad (3.198)$$

$$\frac{I_k}{I_n} = 2,517 \quad (3.199)$$

Dle rovnice (3.199) je přetížitelnost stroje 2,517 a **stroj je tedy dostatečně odolný proti demagnetizaci permanentních magnetů.**

Dopočet vnitřního průměru rotoru – rovnice (3.138):

$$D_{RI} = D_{jR} - h_{jR} = 339,3 \cdot 10^{-3} - 19 \cdot 10^{-3} = 320,3 \text{ mm} \quad (3.200)$$

Změnou výšky permanentního magnetu se změní mimo magnetické indukce ve vzduchové mezeře také napětí indukované permanentním magnetem. Novou hodnotu napětí indukovaného permanentním magnetem dopočítáme upravením rovnice (3.20) na tvar:

$$U_{PM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \omega \cdot k_{v1} \cdot \alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot N \cdot \tau_p \cdot l' \quad (3.201)$$

$$U_{PM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 293,22 \cdot 0,945 \cdot 0,80 \cdot 0,886 \cdot 126 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} \cdot 253 \cdot 10^{-3} \quad (3.202)$$

$$U_{PM} = 311,6 \text{ V} \quad (3.203)$$

Napětí indukované permanentním magnetem je větší než jmenovité napětí stroje (fázová hodnota). To znamená, že **motor bude pracovat v přebuzeném stavu.**

3.9. Odpor statorového vinutí

V této podkapitole spočítáme odpor statorového vinutí. Průměrnou délku vodiče statorového vinutí l_{av} lze dle zdroje [3] spočítat následujícím přibližným vztahem:

$$l_{av} \approx 2 \cdot l + 2,4 \cdot \frac{y}{\tau_p} \cdot \tau_{p,m} + 0,1 \quad (3.204)$$

kde $\tau_{p,m}$ je pólová rozteč vyjádřená v metrech. Průměrná délka vodiče statorového vinutí bude [3]:

$$l_{av} \approx 2 \cdot l + 2,4 \cdot \frac{y}{\tau_p} \cdot \tau_{p,m} + 0,1 \quad (3.205)$$

$$l_{av} \approx 2 \cdot 250 \cdot 10^{-3} + 2,4 \cdot \frac{4}{4,5} \cdot 70,39 \cdot 10^{-3} + 0,1 = 0,7502 \text{ m} \quad (3.206)$$

Budeme uvažovat následující provozní teplotu stroje ϑ :

$$\vartheta = 100 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.207)$$

Nyní určíme rezistivitu mědi při provozní teplotě. Dle zdroje [3] je rezistivita mědi při teplotě 20 °C:

$$\rho_{Cu,20^\circ C} = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m} \quad (3.208)$$

Teplotní součinitel odporu pro měď α_{Cu} je dle zdroje [3]:

$$\alpha_{Cu} = 3,81 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (3.209)$$

Nyní přepočítáme rezistivitu mědi na provozní teplotu stroje [4]:

$$\rho_{Cu,\vartheta} = \rho_{Cu,20^\circ C} \cdot [1 + \alpha_{Cu} \cdot (\vartheta - 20)] \quad (3.210)$$

$$\rho_{Cu,100^\circ C} = 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot [1 + 3,81 \cdot 10^{-3} \cdot (100 - 20)] = 2,283 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m} \quad (3.211)$$

Odpor statorového vinutí bude [4]:

$$R = \rho_{Cu,100^\circ C} \cdot \frac{N \cdot l_{av}}{a \cdot S_v} = 2,283 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{126 \cdot 0,7502}{4 \cdot 4,44724 \cdot 10^{-6}} = 0,1213 \text{ } \Omega \quad (3.212)$$

Dle dokumentace referenčního stroje je odpor statorového vinutí:

$$R = 0,200 \text{ } \Omega \quad (3.213)$$

Dále budeme počítat s hodnotu stanovenou rovnicí (3.212). Důvodem je skutečnost, že hodnota odporu vinutí uvedená v dokumentaci referenčního stroje je měřena při teplotě 20 °C a mezi dvěma fázemi vinutí, které je zapojeno do hvězdy, tedy hodnota odporu jedné fáze vinutí při teplotě 20 °C by činila 0,100 Ω. Výpočet podle rovnice (3.212) uvažuje provozní teplotu 100 °C.

3.10. Magnetizační indukčnost

Magnetizační indukčnost spočítáme pomocí efektivní délky vzduchové mezery δ_{ef} [4]:

$$\delta_{ef} = \frac{U_{m,\delta e} + U_{m,d} + U_{m,PM} + \frac{U_{m,jS}}{2} + \frac{U_{m,jR}}{2}}{U_{m,\delta e}} \cdot \delta_e \quad (3.214)$$

$$\delta_{ef} = \frac{1116,8 + 106,8 + 4009,8 + \frac{19,8}{2} + \frac{8,5}{2}}{1116,8} \cdot 1,584 \cdot 10^{-3} \quad (3.215)$$

$$\delta_{ef} = 7,443 \text{ mm} \quad (3.216)$$

Magnetizační indukčnost v ose d bude [4]:

$$L_{md} = \frac{m}{2} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \mu_0 \cdot l' \cdot \frac{1}{2p} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\tau_p}{\delta_{ef}} \cdot (k_{v1} \cdot N)^2 \quad (3.217)$$

$$L_{md} = \frac{3}{2} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 253 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{16} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{70,39 \cdot 10^{-3}}{7,443 \cdot 10^{-3}} \cdot (0,945 \cdot 126)^2 \quad (3.218)$$

$$L_{md} = 3,239 \text{ mH} \quad (3.219)$$

Protože se jedná o stroj s permanentními magnety na povrchu rotoru, bude magnetizační indukčnost v ose q shodná s magnetizační indukčností v ose d [4]:

$$L_{mq} = L_{md} = 3,239 \text{ mH} \quad (3.220)$$

3.11. Rozptylové indukčnosti, indukčnosti v osách d a q

Rozptylová indukčnost vzduchové mezery bude spočítána pomocí činitele rozptylu σ_δ , který je obecně dán pro všechny harmonické [3]:

$$\sigma_\delta = \sum_{\substack{v=-\infty \\ v \neq 1}}^{\infty} \left(\frac{k_{vv}}{v \cdot k_{v1}} \right)^2 \quad (3.221)$$

Literární zdroj [3] uvádí pro výpočet činitele rozptylu také zjednodušený vztah (3.222), který lze použít pro třífázový stroj, ve kterém mají cívký vinutí zkrácený krok. V této práci bude činitel rozptylu vypočítán právě pomocí vztahu (3.222).

$$\sigma_\delta = \frac{2 \cdot \pi^2}{9 \cdot k_{v1}^2} \cdot \frac{5 \cdot q^2 + 1 + \frac{\varepsilon_{sp}^3}{4 \cdot q} - \frac{3 \cdot \varepsilon_{sp}^2}{2} - \frac{\varepsilon_{sp}}{4 \cdot q}}{12 \cdot q^2} - 1 \quad (3.222)$$

kde ε_{sp} je rozdíl mezi pólovou roztečí a krokem cívký, tedy [3]:

$$\varepsilon_{sp} = m \cdot q - y = 3 \cdot 1,5 - 4 = 0,5 \quad (3.223)$$

Vypočítáme činitel rozptylu [3]:

$$\sigma_\delta = \frac{2 \cdot \pi^2}{9 \cdot k_{v1}^2} \cdot \frac{5 \cdot q^2 + 1 + \frac{\varepsilon_{sp}^3}{4 \cdot q} - \frac{3 \cdot \varepsilon_{sp}^2}{2} - \frac{\varepsilon_{sp}}{4 \cdot q}}{12 \cdot q^2} - 1 \quad (3.224)$$

$$\sigma_\delta = \frac{2 \cdot \pi^2}{9 \cdot 0,945^2} \cdot \frac{5 \cdot 1,5^2 + 1 + \frac{0,5^3}{4 \cdot 1,5} - \frac{3 \cdot 0,5^2}{2} - \frac{0,5}{4 \cdot 1,5}}{12 \cdot 1,5^2} - 1 \quad (3.225)$$

$$\sigma_\delta = 0,07449 \quad (3.226)$$

Rozptylová indukčnost vzduchové mezery bude [4]:

$$L_{\sigma\delta} = \sigma_\delta \cdot L_{md} = 0,07449 \cdot 3,239 \cdot 10^{-3} = 241,3 \mu\text{H} \quad (3.227)$$

Rozptylová reaktance ve vzduchové mezeře bude [4]:

$$X_{\sigma\delta} = 2\pi \cdot f \cdot L_{\sigma\delta} = 2\pi \cdot \frac{n_n}{60} \cdot p \cdot L_{\sigma\delta} \quad (3.228)$$

$$X_{\sigma\delta} = 2\pi \cdot \frac{350}{60} \cdot 8 \cdot 241,3 \cdot 10^{-6} = 70,75 \text{ m}\Omega \quad (3.229)$$

Dále vypočítáme rozptylovou indukčnost statorové drážky. K výpočtu této indukčnosti budeme potřebovat činitel λ_u , který zdroj [4] nazývá činitelem propustnosti statorové drážky:

$$\lambda_u = k_1 \cdot \frac{h_4 - h'}{3 \cdot b_4} + k_2 \cdot \left[\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln \left(\frac{b_4}{b_1} \right) \right] + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \quad (3.230)$$

kde koeficienty k_1 a k_2 jsou dány [4]:

$$k_1 = 1 - \frac{9}{16} \cdot \varepsilon \quad (3.231)$$

$$k_2 = 1 - \frac{3}{4} \cdot \varepsilon \quad (3.232)$$

kde ε je činitel zkrácení kroku, který je dán [4]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{y}{\tau_p} = 1 - \frac{4}{4,5} = \frac{1}{9} \quad (3.233)$$

Koeficienty k_1 a k_2 budou [4]:

$$k_1 = 1 - \frac{9}{16} \cdot \varepsilon = 1 - \frac{9}{16} \cdot \frac{1}{9} = \frac{15}{16} \quad (3.234)$$

$$k_2 = 1 - \frac{3}{4} \cdot \varepsilon = 1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{9} = \frac{11}{12} \quad (3.235)$$

Činitel propustnosti statorové drážky bude [4]:

$$\lambda_u = k_1 \cdot \frac{h_4 - h'}{3 \cdot b_4} + k_2 \cdot \left[\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln \left(\frac{b_4}{b_1} \right) \right] + \frac{h'}{4 \cdot b_4} \quad (3.236)$$

$$\lambda_u = \frac{15}{16} \cdot \frac{38,6 \cdot 10^{-3} - 0,4 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 8 \cdot 10^{-3}} + \frac{11}{12} \cdot \left[\frac{1 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}} \cdot \ln \left(\frac{8 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} \right) \right] + \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 8 \cdot 10^{-3}} \quad (3.237)$$

$$\lambda_u = 2,04178 \quad (3.238)$$

Rozptylovou indukčnost statorové drážky spočítáme takto [4]:

$$L_{\sigma u} = \frac{4 \cdot m}{Q_s} \cdot \mu_0 \cdot l' \cdot N^2 \cdot \lambda_u \quad (3.239)$$

$$L_{\sigma u} = \frac{4 \cdot 3}{72} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 253 \cdot 10^{-3} \cdot 126^2 \cdot 2,04178 \quad (3.240)$$

$$L_{\sigma u} = 1,718 \text{ mH} \quad (3.241)$$

Rozptylová reaktance statorové drážky bude [4]:

$$X_{\sigma u} = 2\pi \cdot f \cdot L_{\sigma u} = 2\pi \cdot \frac{n_n}{60} \cdot p \cdot L_{\sigma u} \quad (3.242)$$

$$X_{\sigma u} = 2\pi \cdot \frac{350}{60} \cdot 8 \cdot 1,718 \cdot 10^{-3} = 503,7 \text{ m}\Omega \quad (3.243)$$

Nyní spočítáme rozptylovou indukčnost cípu statorového zubu (část zubu v blízkosti krčku drážky) analogicky k výpočtu rozptylové indukčnosti statorové drážky. Činitel propustnosti cípu zubu definuje zdroj [4] takto:

$$\lambda_d = k_2 \cdot \frac{5 \cdot \frac{\delta}{b_1}}{5 + 4 \cdot \frac{\delta}{b_1}} = \frac{11}{12} \cdot \frac{5 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}}}{5 + 4 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}}} = 0,32738 \quad (3.244)$$

Rozptylová indukčnost cípu statorového zubu bude [4]:

$$L_{\sigma d} = \frac{4 \cdot m}{Q_s} \cdot \mu_0 \cdot l' \cdot N^2 \cdot \lambda_d \quad (3.245)$$

$$L_{\sigma d} = \frac{4 \cdot 3}{72} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 253 \cdot 10^{-3} \cdot 126^2 \cdot 0,32738 = 275,4 \text{ }\mu\text{H} \quad (3.246)$$

Reaktance cípu statorového zubu bude [4]:

$$X_{\sigma d} = 2\pi \cdot f \cdot L_{\sigma d} = 2\pi \cdot \frac{n_n}{60} \cdot p \cdot L_{\sigma d} \quad (3.247)$$

$$X_{\sigma d} = 2\pi \cdot \frac{350}{60} \cdot 8 \cdot 275,4 \cdot 10^{-6} = 80,75 \text{ m}\Omega \quad (3.248)$$

Dále vypočítáme rozptylovou indukčnost čela cívek statorového vinutí. Průměrnou délku vodiče čela cívky vinutí l_w lze dle zdroje [4] vypočítat takto:

$$l_w = 2 \cdot l_{ew} + W_{ew} = \frac{l_{av}}{2} - l = \frac{0,7502}{2} - 250 \cdot 10^{-3} = 0,1251 \text{ m} \quad (3.249)$$

kde l_{ew} je axiální délka vodiče čela cívky vinutí a W_{ew} je rozteč vodiče cívky. Zdroj [4] vychází ze známé hodnoty l_{ew} , ze které pomocí rovnice (3.249) vypočítá rozteč vodiče cívky W_{ew} .

V této práci provedeme výpočet rozteče vodiče cívky W_{ew} , kterou spočítáme přibližným vztahem:

$$W_{ew} \approx \frac{y}{Q_S} \cdot \pi \cdot \left(D_S + h_1 + h_2 + h_3 + h_5 - \frac{b_{5c}}{2} \right) \quad (3.250)$$

$$W_{ew} = \frac{4}{72} \cdot \pi \cdot (360 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} + 33,5 \cdot 10^{-3} - \frac{10,2 \cdot 10^{-3}}{2}) = 68,3 \text{ mm} \quad (3.251)$$

Nyní můžeme dopočítat axiální délku vodiče čela cívky [4]:

$$l_{ew} = \frac{l_w - W_{ew}}{2} = \frac{0,1251 - 68,3 \cdot 10^{-3}}{2} = 28,4 \text{ mm} \quad (3.252)$$

Zdroj [3] dále uvádí rovnici (3.249) rozšířenou o činitele propustnosti:

$$l_w \cdot \lambda_w = 2 \cdot l_{ew} \cdot \lambda_{ew} + W_{ew} \cdot \lambda_{wew} \quad (3.253)$$

kde λ_w je činitel propustnosti čela vodiče cívky, λ_{ew} je činitel propustnosti axiální části vodiče čela cívky a λ_{wew} je činitel propustnosti vodiče rozteče čela cívky. Činitele propustnosti λ_{ew} a λ_{wew} lze ve zdroji [3] dohledat pro různé typy stroje. Pro náš typ stroje zdroj [3] udává následující hodnoty:

$$\lambda_{ew} = 0,342 \quad (3.254)$$

$$\lambda_{wew} = 0,413 \quad (3.255)$$

Úpravou rovnice (3.253) můžeme vyjádřit a dopočítat činitele propustnosti čela vodiče cívky vinutí:

$$\lambda_w = \frac{2 \cdot l_{ew} \cdot \lambda_{ew} + W_{ew} \cdot \lambda_{wew}}{l_w} \quad (3.256)$$

$$\lambda_w = \frac{2 \cdot 28,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,342 + 68,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,413}{0,1251} = 0,3808 \quad (3.257)$$

Rozptylová indukčnost vodičů čela cívky vinutí bude [4]:

$$L_{\sigma w} = \frac{4 \cdot m}{Q_S} \cdot q \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot l_w \cdot \lambda_w \quad (3.258)$$

$$L_{\sigma w} = \frac{4 \cdot 3}{72} \cdot 1,5 \cdot 126^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,1251 \cdot 0,3808 = 237,6 \text{ } \mu\text{H} \quad (3.259)$$

Rozptylová reaktance vodičů čela cívky vinutí bude [4]:

$$X_{\sigma w} = 2\pi \cdot f \cdot L_{\sigma w} = 2\pi \cdot \frac{n_n}{60} \cdot p \cdot L_{\sigma w} \quad (3.260)$$

$$X_{\sigma w} = 2\pi \cdot \frac{350}{60} \cdot 8 \cdot 237,6 \cdot 10^{-6} = 69,67 \text{ m}\Omega \quad (3.261)$$

V posledním kroku dopočítáme synchronní indukčnost a reaktanci stroje. Celková rozptylová indukčnost stroje bude [4]:

$$L_{S\sigma} = L_{\sigma\delta} + L_{\sigma u} + L_{\sigma d} + L_{\sigma w} \quad (3.262)$$

$$L_{S\sigma} = 241,3 \cdot 10^{-6} + 1,718 \cdot 10^{-3} + 275,4 \cdot 10^{-6} + 237,6 \cdot 10^{-6} \quad (3.263)$$

$$L_{S\sigma} = 2,472 \text{ mH} \quad (3.264)$$

Indukčnost v ose d bude:

$$L_d = L_{md} + L_{S\sigma} = 3,239 \cdot 10^{-3} + 2,472 \cdot 10^{-3} = 5,711 \text{ mH} \quad (3.265)$$

Protože se jedná o stroj s permanentními magnety na povrchu rotoru, chovající se principiálně jako stroj s hladkým rotorem, bude indukčnost v ose q shodná s indukčností v ose d [4]:

$$L_q = L_d = 5,711 \text{ mH} \quad (3.266)$$

Nyní dopočítáme reaktance v osách d a q a synchronní reaktanci [4]:

$$X_d = 2\pi \cdot f \cdot L_d = 2\pi \cdot \frac{n_n}{60} \cdot p \cdot L_d \quad (3.267)$$

$$X_d = 2\pi \cdot \frac{350}{60} \cdot 8 \cdot 5,711 \cdot 10^{-3} = 1,675 \Omega \quad (3.268)$$

$$X_s = X_q = X_d = 1,675 \Omega \quad (3.269)$$

3.12. Ztráty ve stroji

Pro výpočet ztrát v železe stroje musíme dopočítat objemy a hmotnosti jednotlivých částí stroje. Uvedme nejprve hodnoty magnetických indukcí ve jhu statoru, jhu rotoru a zubu statoru:

$$B_{jS} = 1,476 \text{ T} \quad (3.270)$$

$$B_{jR} = 1,4 \text{ T} \quad (3.271)$$

$$B_d = 1,59687 \text{ T} \cong 1,597 \text{ T} \quad (3.272)$$

Jmenovitá napájecí frekvence stroje je:

$$f = \frac{n_n}{60} \cdot p = \frac{350}{60} \cdot 8 = 46,67 \text{ Hz} \quad (3.273)$$

Spočítáme nejprve objemy jednotlivých částí stroje. Celkový objem statoru je [4]:

$$V_S = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{SO}^2 - D_S^2) \cdot l \quad (3.274)$$

$$V_S = \frac{\pi}{4} \cdot [(480 \cdot 10^{-3})^2 - (360 \cdot 10^{-3})^2] \cdot 250 \cdot 10^{-3} \quad (3.275)$$

$$V_S = 19,792 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (3.276)$$

Objem jha statoru je [4]:

$$V_{jS} = \pi \cdot \left[\left(\frac{D_{SO}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{SO}}{2} - h_{jS} \right)^2 \right] \cdot l \quad (3.277)$$

$$V_{jS} = \pi \cdot \left[\left(\frac{480 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left(\frac{480 \cdot 10^{-3}}{2} - 18 \cdot 10^{-3} \right)^2 \right] \cdot 250 \cdot 10^{-3} \quad (3.278)$$

$$V_{jS} = 6,531 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (3.279)$$

Objem statorových drážek je [4]:

$$V_{dS} = Q_S \cdot S_{dS} \cdot l \quad (3.280)$$

$$V_{dS} = 72 \cdot 383 \cdot 10^{-6} \cdot 250 \cdot 10^{-3} = 6,894 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (3.281)$$

Celkový objem statorových zubů je [4]:

$$V_d = V_S - V_{jS} - V_{dS} \quad (3.282)$$

$$V_d = 19,792 \cdot 10^{-3} - 6,531 \cdot 10^{-3} - 6,894 \cdot 10^{-3} \quad (3.283)$$

$$V_d = 6,367 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (3.284)$$

Nyní vypočítáme hmotnost jednotlivých částí stroje s využitím hodnot jejich objemů a hustoty železa ρ_{Fe} , kterou zdroj [3] uvádí takto:

$$\rho_{Fe} = 7300 \text{ kg/m}^3 \quad (3.285)$$

Hmotnost jha statoru je [4]:

$$m_{jS} = k_{pFe} \cdot \rho_{Fe} \cdot V_{jS} \quad (3.286)$$

$$m_{jS} = 0,95 \cdot 7300 \cdot 6,5314 \cdot 10^{-3} = 45,31 \text{ kg} \quad (3.287)$$

Hmotnost zubů statoru je [4]:

$$m_d = k_{pFe} \cdot \rho_{Fe} \cdot V_d \quad (3.288)$$

$$m_d = 0,95 \cdot 7300 \cdot 6,367 \cdot 10^{-3} = 44,16 \text{ kg} \quad (3.289)$$

Zdroj [4] udává, že největší část ztrát v zubu statoru vzniká v oblasti zubu, která je omezena rozměrem h_5 (viz **Obr. 3-4**). Z tohoto důvodu zdroj [4] zanedbává zbylou část ztrát a výpočet hmotnosti zubu statoru pro výpočet ztrát udává takto:

$$m'_d = k_{pFe} \cdot \rho_{Fe} \cdot Q_S \cdot b_d \cdot h_5 \cdot l \quad (3.290)$$

$$m'_d = 0,95 \cdot 7300 \cdot 72 \cdot 9,27 \cdot 10^{-3} \cdot 33,5 \cdot 10^{-3} \cdot 250 \cdot 10^{-3} \quad (3.291)$$

$$m'_d = 38,77 \text{ kg} \quad (3.292)$$

V této práci se pokusíme kompenzovat chybu, která vznikla zanedbáním ztrát na koncích zubů statoru. Hmotnost konců zubů statoru bude:

$$m_{dk} = m_d - m'_d = 44,16 - 38,77 = 5,39 \text{ kg} \quad (3.293)$$

Hmotnost konců zubů stanovenou rovnicí (3.293) použijeme k výpočtu ztrát v koncích zubů statoru.

Nyní budeme počítat ztráty v jednotlivých částech stroje. Ztráty ve jhu statoru $\Delta P_{Fe,jS}$ lze podle zdroje [4] „ručně“ vypočítat následující rovnicí:

$$\Delta P_{Fe,jS} = k_{Fe,jS} \cdot \Delta p_{Fe,14} \cdot \left(\frac{B_{jS}}{1,4}\right)^2 \cdot m_{jS} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} \quad (3.294)$$

kde $k_{Fe,jS}$ je činitel opracování jha statoru a $\Delta p_{Fe,14}$ jsou měrné ztráty v železe při magnetické indukci 1,4 T. Hodnota 1,4, kterou je dělena magnetická indukce ve jhu statoru, se shoduje s hodnotou magnetické indukce, pro kterou jsou udány měrné ztráty. Činitele opracování pro různé stroje a jejich jednotlivé části lze dohledat ve zdroji [3]. Dle něj je hodnota pro jho statoru našeho stroje:

$$k_{Fe,jS} = 1,6 \quad (3.295)$$

Měrné ztráty materiálu M400-50A pro magnetickou indukci 1,4 T a frekvenci 50 Hz dohledáme ve zdroji [8]:

$$\Delta p_{Fe,14} = 2,96 \text{ W/kg} \quad (3.296)$$

Ztráty ve jhu statoru budou [4]:

$$\Delta P_{Fe,jS} = k_{Fe,jS} \cdot \Delta p_{Fe,14} \cdot \left(\frac{B_{jS}}{1,4}\right)^2 \cdot m_{jS} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} \quad (3.297)$$

$$\Delta P_{Fe,jS} = 1,6 \cdot 2,96 \cdot \left(\frac{1,476}{1,4}\right)^2 \cdot 45,31 \cdot \left(\frac{46,67}{50}\right)^{1,5} = 215 \text{ W} \quad (3.298)$$

Výpočet ztrát je jhu rotoru je komplikovaný. Pracovní harmonická magnetické indukce ve jhu rotoru teoreticky žádné ztráty negeneruje, neboť se rotor otáčí synchronní rychlostí. Ztráty je jhu rotoru tedy budou nízké. Výpočet ztrát je jhu rotoru vytvářených vyššími harmonickými zde z důvodu složitosti provádět nebudeme. Dle dokumentace referenčního stroje činí ztráty ve jhu rotoru 5 W. Z důvodu takto nízké hodnoty a skutečnosti, že referenční stroj má jinou výšku jha rotoru, je zde zanedbáme.

Činitel opracování zubů statoru pro náš typ stroje je dle zdroje [3] následující:

$$k_{Fe,d} = 2,0 \quad (3.299)$$

Dle zdroje [8] jsou měrné ztráty pro magnetickou indukci 1,6 T a frekvenci 50 Hz následující:

$$\Delta p_{Fe,16} = 4,38 \text{ W/kg} \quad (3.300)$$

Ztráty v zubech statoru (mimo jejich konců) s využitím jejich hmotnosti získané zjednodušeným výpočtem dle rovnice (3.292) budou [4]:

$$\Delta P_{Fe,d1} = k_{Fe,d} \cdot \Delta p_{Fe,16} \cdot \left(\frac{B_d}{1,6}\right)^2 \cdot m'_d \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} \quad (3.301)$$

$$\Delta P_{Fe,d1} = 2,0 \cdot 4,38 \cdot \left(\frac{1,597}{1,6}\right)^2 \cdot 38,77 \cdot \left(\frac{46,67}{50}\right)^{1,5} = 305 \text{ W} \quad (3.302)$$

Konce zubů statoru nejsou obvykle syceny a magnetická indukce v nich je nižší než v části mezi jejich konci a jhem statoru [3]. Pro redukci chyby zanedbání ztrát v koncích zubů v nich uvažujeme poloviční magnetickou indukci oproti částem mezi jejich konci a jhem statoru:

$$B_{dk} \approx \frac{B_d}{2} \cong \frac{1,597}{2} = 0,799 \text{ T} \quad (3.303)$$

Dle zdroje [8] jsou měrné ztráty pro magnetickou indukci 0,8 T a frekvenci 50 Hz následující:

$$\Delta p_{Fe,08} = 1,01 \text{ W/kg} \quad (3.304)$$

Ztráty na koncích zubu spočítáme analogicky k rovnici (3.301):

$$\Delta P_{Fe,d2} = k_{Fe,d} \cdot \Delta p_{Fe,08} \cdot \left(\frac{B_{dk}}{0,8}\right)^2 \cdot m_{dk} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} \quad (3.305)$$

$$\Delta P_{Fe,d2} = 2,0 \cdot 1,01 \cdot \left(\frac{0,799}{0,8}\right)^2 \cdot 5,39 \cdot \left(\frac{46,67}{50}\right)^{1,5} = 10 \text{ W} \quad (3.306)$$

Celkové ztráty v železe stroje budou (se zanedbáním ztrát ve jhu rotoru) [4]:

$$\Delta P_{Fe,S} = \Delta P_{Fe,jS} + \Delta P_{Fe,d1} + \Delta P_{Fe,d2} \quad (3.307)$$

$$\Delta P_{Fe,S} = 215 + 305 + 10 = 530 \text{ W} \quad (3.308)$$

Dále vypočítáme ventilační ztráty ve stroji, které tvoří část celkových mechanických ztrát. Zdroj [3] udává experimentální rovnici, podle které lze tyto ztráty vypočítat:

$$\Delta P_{mech,vent} = k_\rho \cdot D_r \cdot (l + 0,6 \cdot \tau_p) \cdot v_r^2 \quad (3.309)$$

kde k_ρ je experimentální činitel a v_r je obvodová rychlost rotoru. Hodnoty experimentálního činitele udává zdroj [3] pro různé metody chlazení stroje. Pro náš stroj činí:

$$k_\rho = 10 \quad (3.310)$$

Obvodová rychlost rotoru je dána [4]:

$$v_r = \pi \cdot \frac{n_n}{60} \cdot D_r = \pi \cdot \frac{350}{60} \cdot 357 \cdot 10^{-3} = 6,542 \text{ m/s} \quad (3.311)$$

Ventilační ztráty ve stroji budou [3]:

$$\Delta P_{mech,vent} = k_p \cdot D_r \cdot (l + 0,6 \cdot \tau_p) \cdot v_r^2 \quad (3.312)$$

$$\Delta P_{mech,vent} = 10 \cdot 357 \cdot 10^{-3} \cdot (250 \cdot 10^{-3} + 0,6 \cdot 70,39 \cdot 10^{-3}) \cdot 6,542^2 \quad (3.313)$$

$$\Delta P_{mech,vent} = 45 \text{ W} \quad (3.314)$$

Celkové mechanické ztráty zde nespočítáme, protože není k dispozici informace o ložisku v referenčním stroji. Přeberme zde celkové mechanické ztráty, které udává dokumentace referenčního stroje:

$$\Delta P_{mech} = 300 \text{ W} \quad (3.315)$$

Nyní bude cílem vypočítat ztráty v permanentních magnetech. Permanentní magnet se vzhledem k nízké relativní permeabilitě chová principiálně jako vzduchová mezera. Dle zdroje [3] je ekvivalentní délka vzduchové mezery s uvažováním permanentního magnetu:

$$\delta_{PMe} = \delta + \frac{h_{PM}}{\mu_{rPM}} \quad (3.316)$$

Relativní permeabilitu permanentního magnetu dopočítáme z rovnice (3.125):

$$\mu_{rPM} = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot H'_C} = \frac{1,16}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 875 \cdot 10^3} = 1,055 \quad (3.317)$$

Ekvivalentní délka vzduchové mezery s uvažováním permanentního magnetu bude [3]:

$$\delta_{PMe} = \delta + \frac{h_{PM}}{\mu_{rPM}} = 1,5 \cdot 10^{-3} + \frac{6 \cdot 10^{-3}}{1,055} = 7,187 \text{ mm} \quad (3.318)$$

Nyní vypočítáme následující koeficient β_u , který využijeme k výpočtu poloviny rozdílu mezi maximální a minimální magnetické indukce ve vzduchové mezeře [3]:

$$\beta_u = \frac{1 + u^2 - 2 \cdot u}{2 \cdot (1 + u^2)} \quad (3.319)$$

kde u je dáno rovnicí [3]:

$$u = \frac{b_1}{2 \cdot \delta_{PMe}} + \sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta_{PMe}}\right)^2} \quad (3.320)$$

$$u = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 7,187 \cdot 10^{-3}} + \sqrt{1 + \left(\frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 7,187 \cdot 10^{-3}}\right)^2} = 1,2303 \quad (3.321)$$

Koeficient β_u bude [3]:

$$\beta_u = \frac{1 + u^2 - 2 \cdot u}{2 \cdot (1 + u^2)} = \frac{1 + 1,2303^2 - 2 \cdot 1,2303}{2 \cdot (1 + 1,2303^2)} = 0,0106 \quad (3.322)$$

Poloviční hodnota rozdílu maximální a minimální hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře B_0 bude [4]:

$$B_0 = \beta_u \cdot B_{max} = 0,0106 \cdot 0,886 = 0,0094 \text{ T} \quad (3.323)$$

Zdroj [11] definuje převrácenou hodnotu hloubky vniku elektromagnetického pole:

$$a' = \frac{1}{\delta_v} = \sqrt{\frac{\pi \cdot \sigma_{PM} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rPM} \cdot Q_S \cdot n_n}{60}} \quad (3.324)$$

kde σ_{PM} je elektrická konduktivita permanentního magnetu, která je dle zdroje [9]:

$$\sigma_{PM} = 555,56 \cdot 10^3 \text{ S/m} \quad (3.325)$$

Převrácená hodnota hloubky vniku bude [11]:

$$a' = \sqrt{\frac{\pi \cdot \sigma_{PM} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rPM} \cdot Q_S \cdot n_n}{60}} \quad (3.326)$$

$$a' = \sqrt{\frac{\pi \cdot 555,56 \cdot 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,055 \cdot 72 \cdot 350}{60}} = 31,174 \text{ m}^{-1} \quad (3.327)$$

Zdroj [11] se zabývá přídavnými ztrátami ve strojích. Popsaný postup výpočtu těchto ztrát ve zdroji [11] je určený primárně pro výpočet ztrát vířivými proudy v železe. Mělo by být možné jej ale použít i pro ztráty v permanentních magnetech. Tyto ztráty budou [11]:

$$\Delta P_{PM} = \frac{2 \cdot Q_S \cdot l}{\sigma_{PM}} \cdot \left(a' \cdot \frac{\tau_u}{2}\right)^3 \cdot \left(\frac{B_0}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM} \cdot \pi}\right)^2 \quad (3.328)$$

$$\Delta P_{PM} = \frac{2 \cdot 72 \cdot 250 \cdot 10^{-3}}{555,56 \cdot 10^3} \cdot \left(31,174 \cdot \frac{15,71 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^3 \cdot \left(\frac{0,0094}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,055 \cdot \pi} \right)^2 \quad (3.329)$$

$$\Delta P_{PM} = 5 \text{ W} \quad (3.330)$$

Dle dokumentace referenčního stroje jsou ztráty v permanentních magnetech $\Delta P_{PM} = 95 \text{ W}$. Výše provedený výpočet tedy není přesný. V této práci budeme dále budeme uvažovat ztráty v permanentních magnetech dle dokumentace referenčního stroje.

Nyní určíme dodatečné ztráty ΔP_d ve stroji. Zdroj [4] uvažuje dodatečné ztráty ve výši 0,5 % jmenovitého výkonu stroje, zde je budeme uvažovat stejně:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_n = 0,005 \cdot 50 \cdot 10^3 = 250 \text{ W} \quad (3.331)$$

Stanovené dodatečné ztráty se shodují s dokumentací referenčního stroje.

V poslední řadě určíme ztráty v mědi statorového vinutí [4]:

$$\Delta P_{Cu} = m \cdot R \cdot I_S^2 = 3 \cdot 0,1213 \cdot 84,3^2 = 2586 \text{ W} \quad (3.332)$$

Dle dokumentace referenčního stroje jsou ztráty v mědi 2640 W, což se přibližně shoduje s hodnotou dle rovnice (3.332).

Celkové ztráty ve stroji budou (se zanedbáním ztrát ve jhu rotoru) [4]:

$$\Delta P = \Delta P_{Fe,S} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{PM} + \Delta P_d + \Delta P_{Cu} \quad (3.333)$$

$$\Delta P = 530 + 300 + 95 + 250 + 2586 = 3761 \text{ W} \quad (3.334)$$

Příkon stroje bude [4]:

$$P_1 = P_n + \Delta P = 50 \cdot 10^3 + 3761 = 53,761 \text{ kW} \quad (3.335)$$

3.13. Zátěžný úhel stroje, proudy v osách d a q

Nyní vypočítáme jmenovitý zátěžný úhel stroje β podle následující rovnice, kterou udává zdroj [4]:

$$P_1 = m \cdot \left(\frac{U_{n,f} \cdot U_{PM}}{X_d} \cdot \sin \beta + U_{n,f}^2 \cdot \frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \cdot \sin(2 \cdot \beta) \right) \quad (3.336)$$

Protože se v našem případě jedná o synchronní stroj s permanentními magnety na povrchu rotoru, tedy platí $L_d = L_q$, přejde rovnice (3.336) do tvaru:

$$P_1 = m \cdot \frac{U_{n,f} \cdot U_{PM}}{X_d} \cdot \sin \beta \quad (3.337)$$

Podotkněme, že rovnice (3.337) zanedbává úbytek napětí na odporu vinutí. Chyba takto zavedená do výpočtu je ale zanedbatelná, protože synchronní reaktance u větších stojů nabývá daleko vyšších hodnot než odpor fáze vinutí, což platí i pro náš stroj. Nyní z rovnice (3.337) vyjádříme zátěžný úhel:

$$\beta = \arcsin \left(\frac{P_1 \cdot X_d}{m \cdot U_{n,f} \cdot U_{PM}} \right) = \arcsin \left(\frac{P_1 \cdot X_d}{m \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot U_{PM}} \right) \quad (3.338)$$

$$\beta = \arcsin \left(\frac{53,761 \cdot 10^3 \cdot 1,675}{3 \cdot \frac{390}{\sqrt{3}} \cdot 311,6} \right) = 25,33^\circ \quad (3.339)$$

Statorový proud v ose d bude [4]:

$$I_d = \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot (X_q \cdot \cos \beta - R \cdot \sin \beta) - U_{PM} \cdot X_q}{X_d \cdot X_q + R^2} \quad (3.340)$$

$$I_d = \frac{\frac{390}{\sqrt{3}} \cdot (1,675 \cdot \cos 25,33^\circ - 0,1213 \cdot \sin 25,33^\circ) - 311,6 \cdot 1,675}{1,675 \cdot 1,675 + 0,1213^2} \quad (3.341)$$

$$I_d = -68,3 \text{ A} \quad (3.342)$$

Statorový proud v ose q bude [4]:

$$I_q = \frac{\frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot (R \cdot \cos \beta + X_d \cdot \sin \beta) - U_{PM} \cdot R}{X_d \cdot X_q + R^2} \quad (3.343)$$

$$I_q = \frac{\frac{390}{\sqrt{3}} \cdot (0,1213 \cdot \cos 25,33^\circ + 1,675 \cdot \sin 25,33^\circ) - 311,6 \cdot 0,1213}{1,675 \cdot 1,675 + 0,1213^2} \quad (3.344)$$

$$I_q = 52,6 \text{ A} \quad (3.345)$$

3.14. Účinnost a účiník stroje

Účinnost daného stroje spočítáme vztahem [4]:

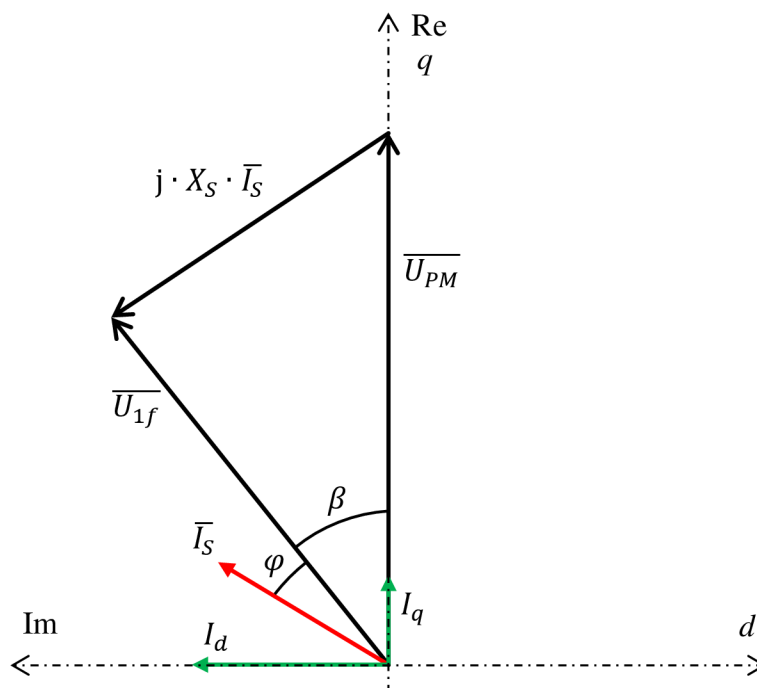
$$\eta = \frac{P_n}{P_1} \cdot 100 \% = \frac{50 \cdot 10^3}{53,761 \cdot 10^3} \cdot 100 \% = 93,0 \% \quad (3.346)$$

Účiník stroje spočteme následovně [4]:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_S} = \frac{53,761 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 390 \cdot 84,3} = 0,944 \quad (3.347)$$

3.15. Fázorový diagram stroje

Na **Obr. 3-13** je sestrojen fázorový diagram stroje, který je grafickým vyobrazením hodnot vypočítaných v předchozích podkapitolách. Měřítko napětí a proudů je 1:1, tedy 1 V odpovídá 1 A. Při sestrovování fázorového diagramu byl zanedbán úbytek napětí na odporu vinutí, což je shodné s postupem uvedeným podkapitole 3.13, kde je počítán zátěžný úhel stroje. Napětí indukované permanentním magnetem leží v ose q a je uvažováno na reálné ose, tedy reálná osa je současně osou q . Osa d se za osou q zpožďuje o 90° el., tedy je oproti imaginární ose opačně orientovaná.



Obr. 3-13: Fázorový diagram stroje

3.16. Dopočet hmotností ostatních částí stroje

V podkapitole 3.11 byly vypočítány hmotnosti pouze těch částí stroje, ve kterých byly počítány ztráty. V této podkapitole dopočítáme hmotnosti ostatních částí stroje.

Hmotnost permanentních magnetů m_{PM} určíme takto [4]:

$$m_{PM} = \frac{D_r - 2 \cdot h_{PM} + D_{RI}}{2} \cdot \pi \cdot \alpha_{PM} \cdot l \cdot h_{PM} \cdot \rho_{PM} \quad (3.348)$$

kde ρ_{PM} je hustota permanentních magnetů, která je podle zdroje [9]:

$$\rho_{PM} = 7500 \text{ kg/m}^3 \quad (3.349)$$

Hmotnost permanentních magnetů bude [4]:

$$m_{PM} = \frac{D_r - 2 \cdot h_{PM} + D_{RI}}{2} \cdot \pi \cdot \alpha_{PM} \cdot l \cdot h_{PM} \cdot \rho_{PM} \quad (3.350)$$

$$m_{PM} = \frac{357 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} + 320,3 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \pi \cdot 0,80 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 7500 \quad (3.351)$$

$$m_{PM} = 9,41 \text{ kg} \quad (3.352)$$

Hmotnost mědi statorového vinutí m_{Cu} bude [4]:

$$m_{Cu} = \rho_{Cu} \cdot (l + 2 \cdot l_w) \cdot Q_S \cdot N_{dS} \cdot S_v \quad (3.353)$$

kde ρ_{Cu} je hustota mědi, která je podle zdroje [3]:

$$\rho_{Cu} = 8960 \text{ kg/m}^3 \quad (3.354)$$

Dopočítáme hmotnost mědi statorového vinutí [4]:

$$m_{Cu} = \rho_{Cu} \cdot (l + 2 \cdot l_w) \cdot Q_S \cdot N_{dS} \cdot S_v \quad (3.355)$$

$$m_{Cu} = 8960 \cdot (250 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,1251) \cdot 72 \cdot 42 \cdot 4,44724 \cdot 10^{-6} = 60,27 \text{ kg} \quad (3.356)$$

Hmotnost statorového vinutí je dle dokumentace referenčního stroje 47,2 kg. Pověšimněme si, že významnou část hmotnosti mědi tvoří čela cívek (rozměr l_w). Vyplývá tedy, že referenční stroj bude mít jinou délku čel cívek vinutí, než byla délka l_w stanovená rovnicí (3.249), která využívala empiricky stanovenou průměrnou délku vodiče l_{av} dle rovnice (3.205).

Hmotnost jha rotoru bude [4]:

$$m_{jR} = k_{pFe} \cdot \pi \cdot \frac{(D_r - 2 \cdot h_{PM})^2 - D_{RI}^2}{4} \cdot l \cdot \rho_{Fe} \quad (3.357)$$

$$m_{jR} = 0,95 \cdot \pi \cdot \frac{(357 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3})^2 - (326 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 7300 \quad (3.358)$$

$$m_{jR} = 24,58 \text{ kg} \quad (3.359)$$

Zde opět podotkněme, že výška jha rotoru nebyla porovnávána s dokumentací referenčního stroje z důvodu nutnosti přizpůsobení jha rotoru silám, které na jho při otáčení rotoru působí. Hmotnost jha rotoru u referenčního stroje bude jiná, než je hmotnost vypočítaná v této práci.

Celková hmotnost železa, mědi a permanentních magnetů ve stroji je [4]:

$$m_{celk} = m_{jS} + m_{jR} + m_d + m_{Cu} + m_{PM} \quad (3.360)$$

$$m_{celk} = 45,31 + 24,58 + 44,16 + 60,27 + 9,41 = 183,73 \text{ kg} \quad (3.361)$$

3.17. Závislost momentu na zátěžném úhlu

V poslední řadě vyneseme závislost momentu stroje na zátěžném úhlu. Závislost je popsána rovnicí [4]:

$$M = \frac{m \cdot U_{PM} \cdot U_{n,f}}{\omega_n \cdot X_S} \cdot \sin \beta = M_{max} \cdot \sin \beta \quad (3.362)$$

kde M_{max} je maximální moment stroje.

Jmenovitá synchronní úhlová rychlost stroje je:

$$\omega_n = 2\pi \cdot \frac{n_n}{60} = 2\pi \cdot \frac{350}{60} = 36,65 \text{ s}^{-1} \quad (3.363)$$

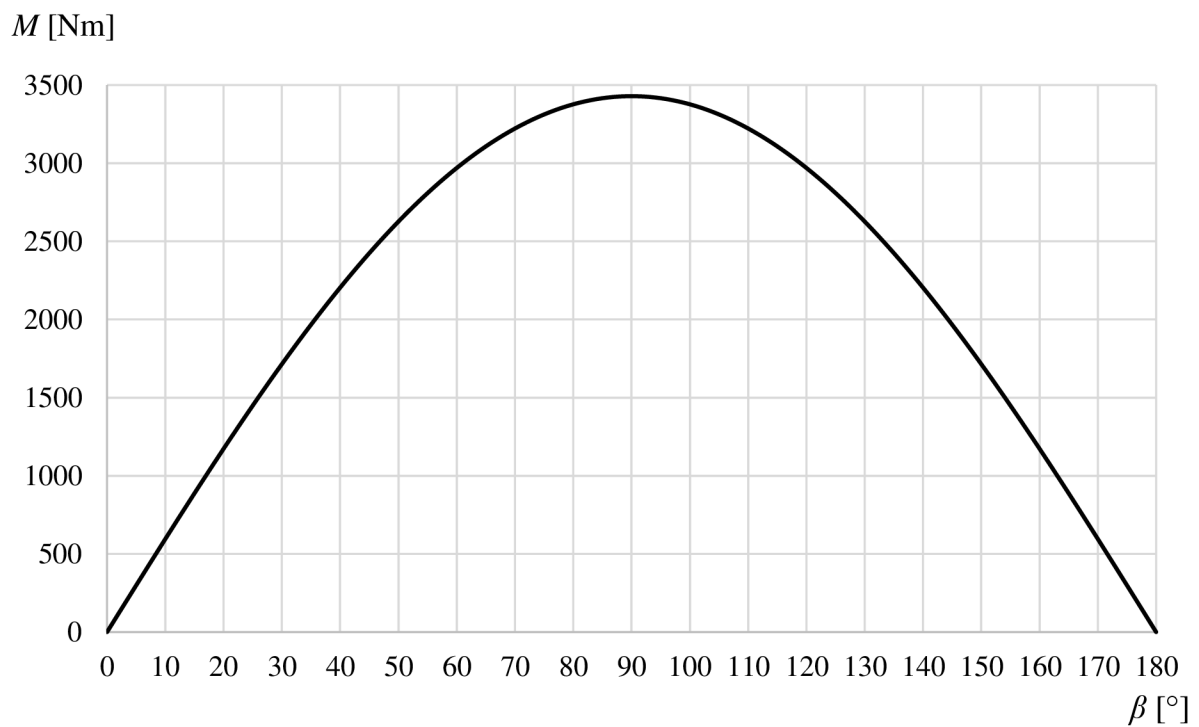
Maximální moment stroje bude [4]:

$$M_{max} = \frac{m \cdot U_{PM} \cdot U_{n,f}}{\omega_n \cdot X_S} = \frac{3 \cdot 311,6 \cdot \frac{390}{\sqrt{3}}}{36,65 \cdot 1,675} = 3428,7 \text{ Nm} \quad (3.364)$$

Závislost momentu stroje na zátěžném úhlu bude popsána závislostí [4]:

$$M = 3428,7 \cdot \sin \beta \quad (3.365)$$

Závislost momentu na zátěžném úhlu dle rovnice (3.365) je vynesena na **Obr. 3-14**.



Obr. 3-14: Závislost momentu stroje na zátěžném úhlu

Veškeré hodnoty stanovené analytickým výpočtem jsou uvedeny v přehledové tabulce v Příloze C, spolu s hodnotami vypočítanými pomocí programů Ansys RMXprt a Ansys Maxwell 2D.

4. VÝPOČET V ANSYS RMXprt

V rámci této diplomové práce byl proveden výpočet stroje mimo jiné v softwaru Ansys RMXprt. Stroj byl namodelován tak, aby se výchozí hodnoty v RMXprtu shodovaly s výpočtem provedeným v přechodí kapitole. V následující tabulce jsou uvedeny vybrané hodnoty vypočítané RMXprtem a pro srovnání také hodnoty stanovené analytickým výpočtem. Hodnoty byly z důvodu lepší přehlednosti vhodně zaokrouhleny.

Tab. 4-1: Parametry stroje vypočítané softwarem Ansys RMXprt a porovnání s analytickým výpočtem

Veličina	Značení	Ansys RMXprt	Analytický výpočet
Parametry v ustáleném stavu			
Činitel vinutí	k_{v1}	0,945	0,945
Magnetizační indukčnost v ose d	L_{md}	3,185 mH	3,239 mH
Magnetizační indukčnost v ose q	L_{mq}	3,185 mH	3,239 mH
Indukčnost v ose d	L_d	5,238 mH	5,711 mH
Indukčnost v ose q	L_q	5,238 mH	5,711 mH
Rozptylová indukčnost drážky	$L_{\sigma u}$	1,846 mH	1,718 mH
Rozptylová indukčnost čela cívky vinutí	$L_{\sigma w}$	124 μ H	237,6 μ H
Rozptylová indukčnost ve vzduchové mezeře	$L_{\sigma \delta}$	83,7 μ H	241,3 μ H
Celková rozptylová indukčnost	$L_{S\sigma}$	2,054 mH	2,472 mH
Odpor fáze vinutí	R	0,1234 Ω	0,1213 Ω
Magnetické indukce – chod naprázdno			
Zub statoru	B_d	1,78 T	1,597 T
Jho statoru	B_{jS}	1,21 T	1,476 T
Jho rotoru	B_{jR}	1,94 T	1,4 T
Vzduchová mezera	B_{max}	0,80 T	0,886 T
Permanentní magnet	B_{PM}	0,83 T	0,886 T

Magnetická napětí – chod naprázdno			
Zub statoru	$U_{m,d}$	346,9 A	106,8 A
Jho statoru	$U_{m,jS}$	4,8 A	19,8 A
Jho rotoru	$U_{m,jR}$	120,8 A	8,5 A
Vzduchová mezera	$U_{m,\delta e}$	1028,4 A	1116,8 A
Chod naprázdno			
Statorový proud	$I_{S,0}$	29,5 A	---
Vstupní činný výkon	$P_{1,0}$	1138 W	---
Chod při plné zátěži			
Maximální indukované napětí (sdružená hodnota)	$U_{PM,max,S}$	667 V	---
Statorový proud (efektivní hodnota)	I_S	80,4 A	84,3 A
Proudová hustota ve statorovém vinutí	J_S	4,516 A/mm ²	4,739 A/mm ²
Mechanické ztráty	ΔP_{mech}	300 W	300 W
Ztráty v železe	ΔP_{Fe}	511 W	530 W (pouze stator)
Ztráty ve vinutí	ΔP_{Cu}	2389 W	2586 W
Celkové ztráty	ΔP	3200 W	3761 W
Výstupní výkon	P	50,021 kW	50 kW
Vstupní výkon	P_1	53,221 kW	53,761 kW
Účinnost	η	94,0 %	93,0 %
Synchronní rychlost	n_n	350 min ⁻¹	350 min ⁻¹
Jmenovitý moment	M_n	1364,8 Nm	1364,2 Nm
Zátěžný úhel	β	25,64°	25,33°
Maximální výstupní výkon	P_{max}	108,791 kW	125,668 kW

Zátěžný úhel stroje vychází ve výpočtu RMxprtem téměř shodně s analytickým výpočtem.

Magnetizační indukčnosti vychází v RMxprtu relativně shodné s analytickým výpočtem. U rozptylových indukčností jsou rozdíly významnější. Rozdíl hodnot rozptylových indukčností v analytickém výpočtu a ve výpočtu RMxprtem společně s mírným rozdílem v magnetizačních indukčnostech zavádí do synchronní indukčnosti (resp. indukčností v osách d a q) rozdíl zhruba 0,5 mH. Tato odchylka ale není příliš významná. Hodnoty synchronní a magnetizační indukčnosti získané výpočtem a RMxprtem se tedy dají považovat za přibližně shodné. Důvodem rozdílů v rozptylových indukčnostech bude s největší pravděpodobností samotný způsob výpočtu, který využívá RMxprt, oproti analytickému výpočtu z kapitoly 3, kde byly pro stanovení jednotlivých rozptylových indukčností využity koeficienty zohledňující geometrii stroje.

RMxprt nestanovuje dodatečné ztráty ve stroji ani ztráty v permanentních magnetech, což je hlavním důvodem vyšší účinnosti stroje vypočtené RMxprtem v porovnání s analytickým výpočtem.

RMxprt stanovil nižší ztráty ve vinutí stroje, což je pravděpodobně dáno skutečností, že RMxprt odhaduje geometrii čel cívek vinutí. U analytického výpočtu byla použita empirická rovnice (3.204) pro stanovení střední délky vodiče vinutí. Čela vinutí mají zásadní vliv na odpor vinutí.

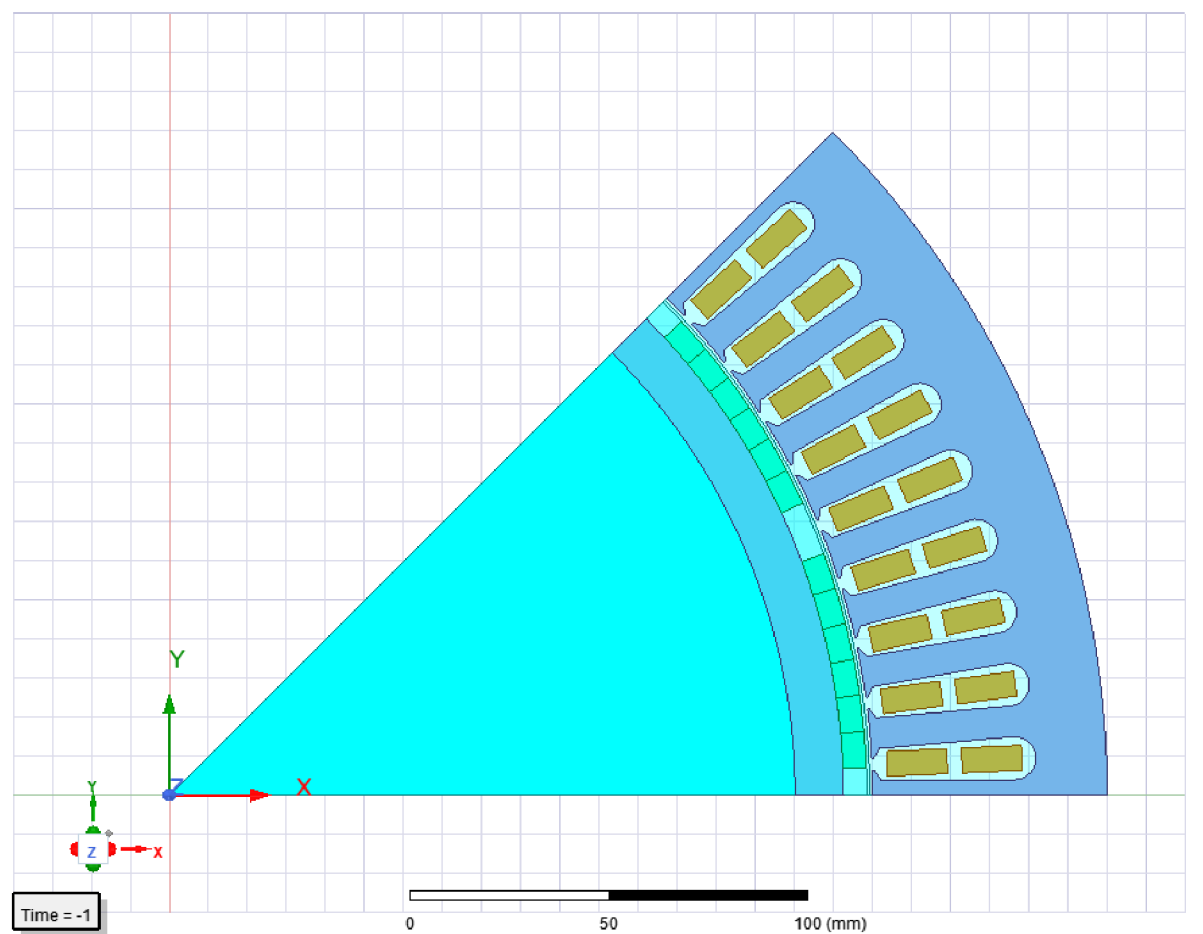
Pozoruhodné je sycení jednotlivých částí stroje a z nich vyplývající magnetická napětí. RMxprt udává větší sycení statorových zubů a daleko větší sycení jha rotoru. Protože ztráty v rotoru jsou velmi malé, vyšší sycení jha rotoru v RMxprtu se neprojeví v účinnosti stroje.

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře udaná RMxprtem je nižší než u analytického výpočtu. Hodnota v analytickém výpočtu je však bližší magnetické indukci ve vzduchové mezeře udané dokumentací referenčního stroje.

Veškeré hodnoty stanovené výpočtem v Ansys RMxprt jsou uvedeny v přehledové tabulce v Příloze C, spolu s hodnotami vypočítanými pomocí analytického výpočtu a programu Ansys Maxwell 2D.

5. VÝPOČET V ANSYS MAXWELL 2D

Tato kapitola shrnuje hodnoty parametrů stroje získaných výpočtem metodou konečných prvků v softwaru Ansys Maxwell 2D. Na **Obr. 5-1** je vyobrazen model stroje v daném softwaru, který byl použit pro výpočet. **Exportované grafy časových průběhů jednotlivých veličin z Ansys Maxwell 2D jsou uvedeny v Příloze A.**



Obr. 5-1: Model stroje v programu Ansys Maxwell 2D

Ve výpočtu byl nastaven právě takový zátěžný úhel stroje, aby bylo v simulaci dosaženo jmenovitého momentu a současně byl moment navýšen o mechanické ztráty (odpovídají 8,19 Nm), které by jinak ve výpočtu nebyly zahrnuty. Následně byla ověřena hodnota výkonu stroje. Po nutném zadání, resp. přizpůsobení některých parametrů modelu (např. výpočet ztrát, nastavení sítě, aj.) byl proveden výpočet. Pro přehlednost jsou všechny získané hodnoty veličin

uvedeny v následující tabulce společně s hodnotami stanovenými analytickým výpočtem. Hodnota příkonu stroje byla v původním vygenerovaném výsledku softwarem Ansys Maxwell 2D nepřesná, a proto byl příkon stanoven na základě mechanického výkonu a ztrát.

Tab. 5-1: Parametry stroje vypočítané softwarem Ansys Maxwell 2D a porovnání s analytickým výpočtem

Veličina	Značení	Ansys Maxwell 2D	Analytický výpočet
Moment (včetně mechanických ztrát)	M	1372,7 Nm	1372,4 Nm
Mechanický výkon (bez mechanických ztrát)	P	50,005 kW	50 kW
Vstupní výkon (příkon)	P_1	53,430 kW	53,761 kW
Napětí na svorkách stroje (sdružené)	U_1	390 V	390 V
Napětí na vinutí stroje (fázové)	U_{1f}	225,17 V	225,17 V
Indukované napětí permanentním magnetem	U_{PM}	280,08 V	311,6 V
Statorový proud	I_S	83,99 A	84,3 A
Indukčnost v ose d	L_d	5,193 mH	5,711 mH
Indukčnost v ose q	L_q	5,106 mH	5,711 mH
Mechanické ztráty	ΔP_{mech}	300 W	300 W
Ztráty v železe	ΔP_{Fe}	486,2 W	530 W
Ztráty v permanentních magnetech	ΔP_{PM}	27,5 W	95 W
Ztráty v mědi	ΔP_{Cu}	2610,5 W	2586 W
Účinnost	η	93,6 %	93,0 %

Hodnota momentu i mechanického výkonu u analytického výpočtu i výpočtu v Maxwell 2D je totožná, neboť moment v Ansys Maxwell 2D byl přizpůsoben pomocí nastavení zátěžného úhlu stroje, přičemž do nastaveného zátěžného úhlu byl zahrnut i moment mechanických ztrát, které by Ansys Maxwell 2D jinak nepočítal. Stejně tak se shodují hodnoty

napájecího napětí. Jeho hodnota byla v Ansys Maxwell 2D nastavena podle výpočtu, protože jde o návrhový parametr stroje.

Napětí indukované permanentním magnetem spočtená v Ansys Maxwell 2D je nižší než hodnota stanovená analytickým výpočtem, což může být dáno odlišným časovým průběhem tohoto napětí v Ansys Maxwell 2D oproti analytickému výpočtu, kde byl uvažován idealizovaný průběh tohoto napětí.

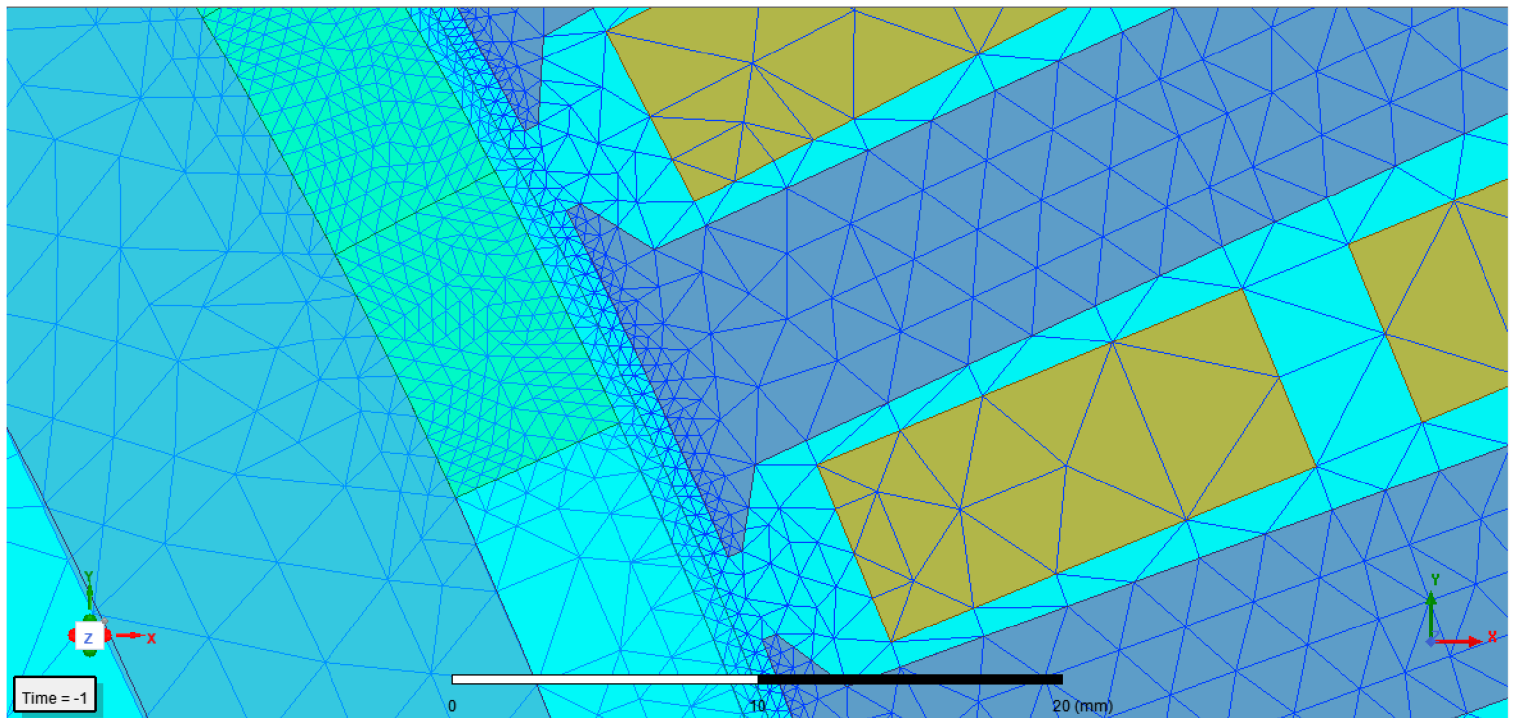
Hodnoty statorového proudu jsou u obou způsobů výpočtu prakticky stejné.

Indukčnosti v osách d a q se v Ansys Maxwell 2D nerovnají. Odchylka L_d od L_q činí 1,7 %. Tato odchylka ale není výrazná a pravděpodobně se jedná pouze o odchylku v numerickém výpočtu v Ansys Maxwell 2D. Mohla by být snížena zjemněním sítě modelu stroje, avšak za cenu výrazného prodloužení času výpočtu.

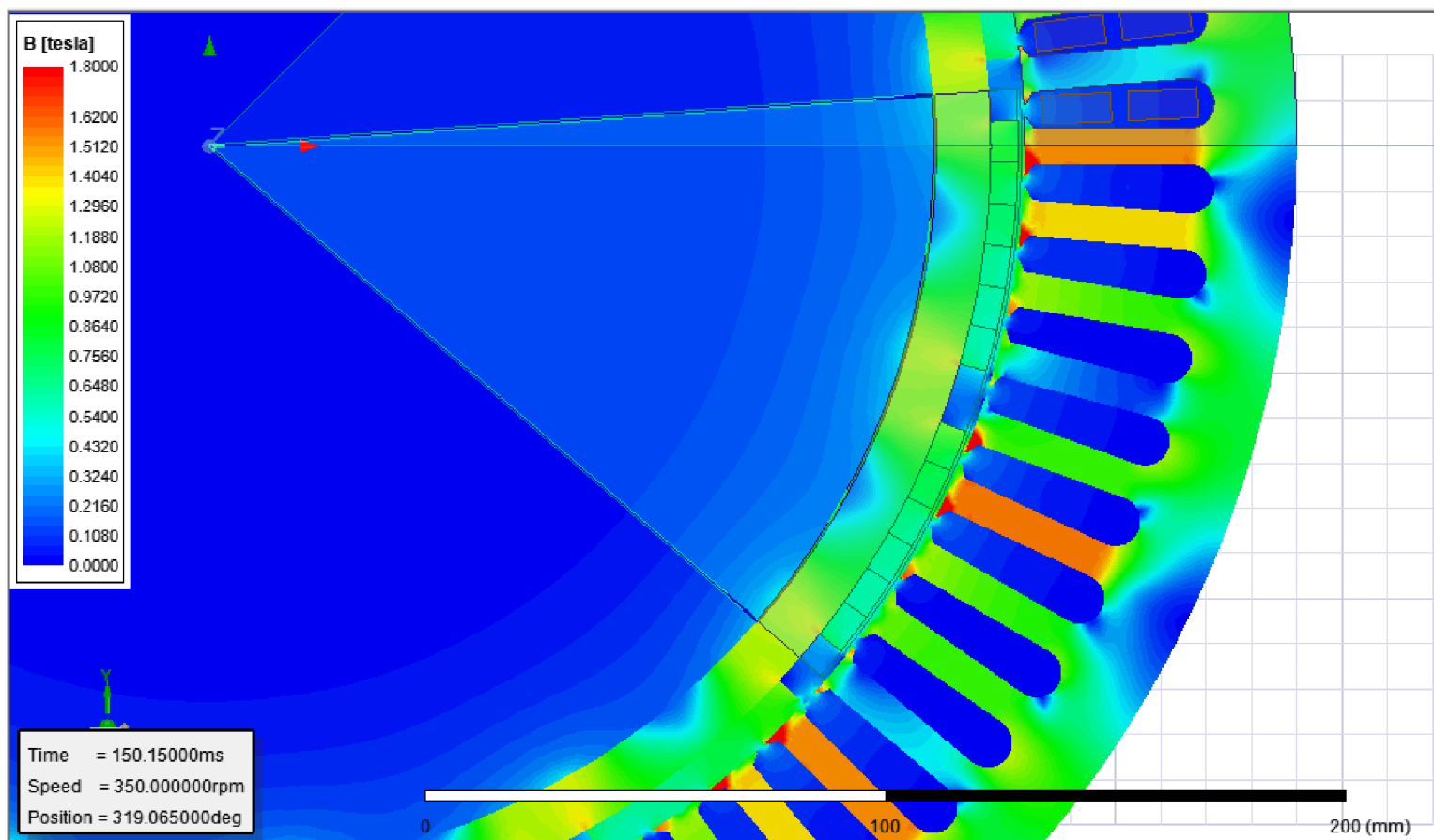
Ztráty v železe stanovené v Ansys Maxwell 2D jsou nižší než u analytického výpočtu. Je nutné podotknout, že Ansys Maxwell 2D počítá ztráty v železe v jednotlivých uzlech sítě. Některé uzly sítě budou v jednotlivých časových okamžicích výrazně syceny, tzn. v těchto uzlech budou v daný časový okamžik stanoveny vyšší ztráty. Analytický výpočet uvažoval stejnou magnetickou indukci v celém jhu statoru a stejnou magnetickou indukci v zubech statoru. Popsané skutečnosti mohou být příčinou odchylky (činí 9,05 %) ztrát v železe stanovených analytickým výpočtem a výpočtem v Ansys Maxwell 2D.

Ztráty v mědi se prakticky shodují (rozdíl činí 24,5 W, což je oproti hodnotám ztrát v mědi zanedbatelné). Zde by měla být odchylka výraznější, neboť v Ansys Maxwell 2D není zadána geometrie čel cívek vinutí. Odpor vinutí převzal Ansys Maxwell 2D z Ansys RMxprt. Praktická shoda hodnot ztrát v mědi se projeví kladně v případě, kdy porovnáváme účinnost stroje a její rozdíl mezi analytickým výpočtem a výpočtem v Ansys Maxwell 2D činí 0,6 %.

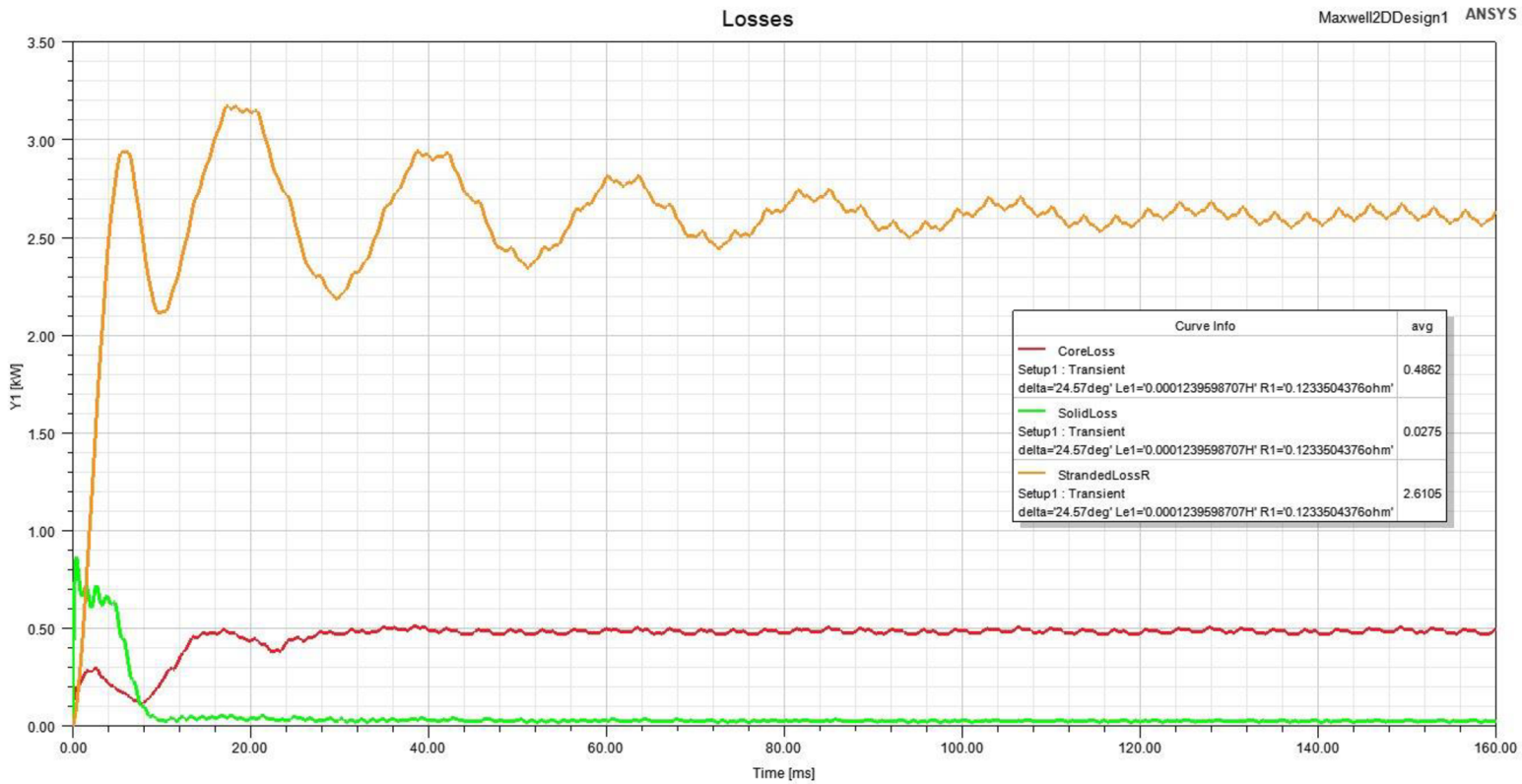
Na **Obr. 5-2** je vyobrazena síť, která byla nastavena pro výpočet modelu stroje v programu Ansys Maxwell 2D. Na **Obr. 5-3** je vyobrazeno rozložení magnetické indukce ve vypočítaném modelu stroje. Na **Obr. 5-4** je pro ukázkou vyobrazen časový průběh ztrát (ve vinutí, v železe a v permanentních magnetech) ve stroji, **příčemž všechny časové průběhy jednotlivých veličin vypočítaných programem Ansys Maxwell 2D jsou uvedeny v Příloze A.**



Obr. 5-2: Detail sítě pro výpočet stroje v Ansys Maxwell 2D



Obr. 5-3: Rozložení magnetické indukce ve stroji v Ansys Maxwell 2D



Obr. 5-4 Časový průběh ztrát ve stroji v Ansys Maxwell 2D

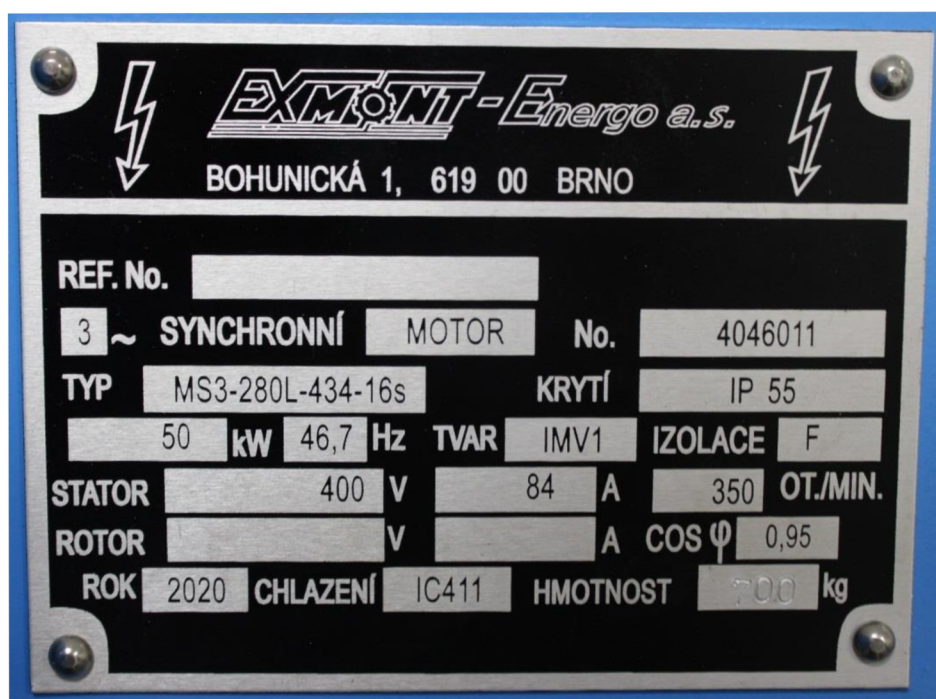
Veškeré hodnoty stanovené výpočtem v Ansys Maxwell 2D jsou uvedeny v přehledové tabulce v Příloze C, spolu s hodnotami vypočítanými pomocí analytického výpočtu a programu Ansys RMxpert.

6. MĚŘENÍ MOTORU

V rámci diplomové práce bylo provedeno měření referenčního stroje na dynamometru.

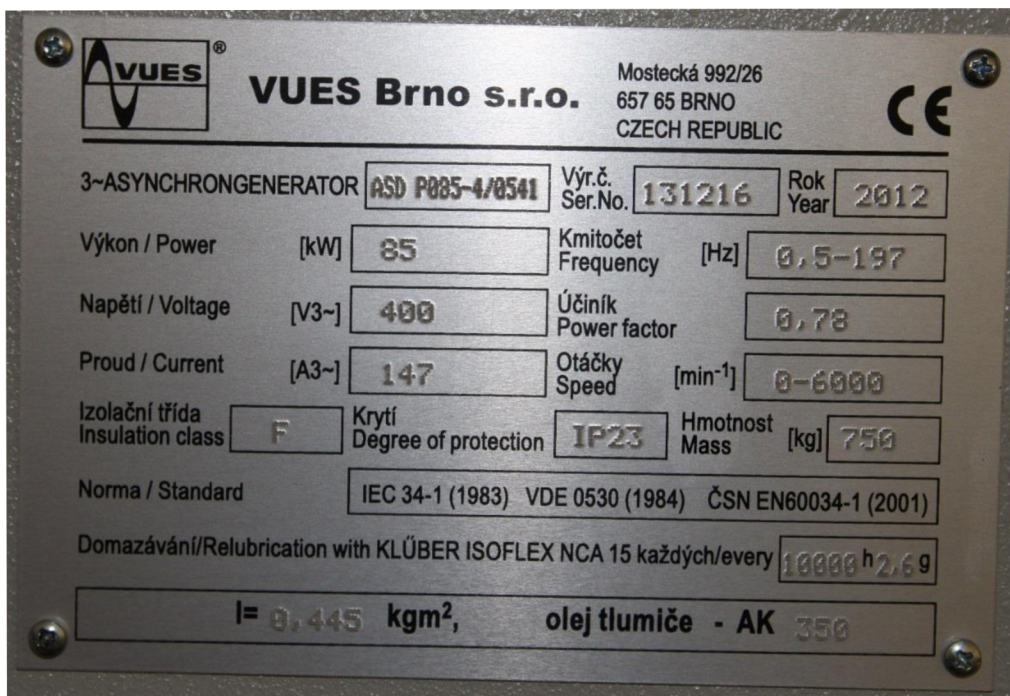
6.1. Údaje vybavení měřicího pracoviště

- Měřený stroj: Synchronní stroj s permanentními magnety, 50 kW, 350 min⁻¹ (viz štítek na **Obr. 6-1**)
- Dynamometr VUES Brno, 85 kW, 0-6000 min⁻¹ (viz štítek na **Obr. 6-2**)
- Frekvenční měnič Control Techniques Unidrive M700 (M700-084 01570 A) (viz štítek na **Obr. 6-3**)
- Analyzátor výkonu YOKOGAWA WT3003E-2A0-30A3-F/G6/C7/C5/MTR (výr. č.: 91RB24030)
- 3 x proudová sonda LEM IT 200-S Ultrastab, rozsah 200 A, převod 1:1000 (výr. č.: 1132700003, 1132700004, 1132880018)
- Mikroohmmetr CROPICO DO5001 (výr. č.: 24E-0406)

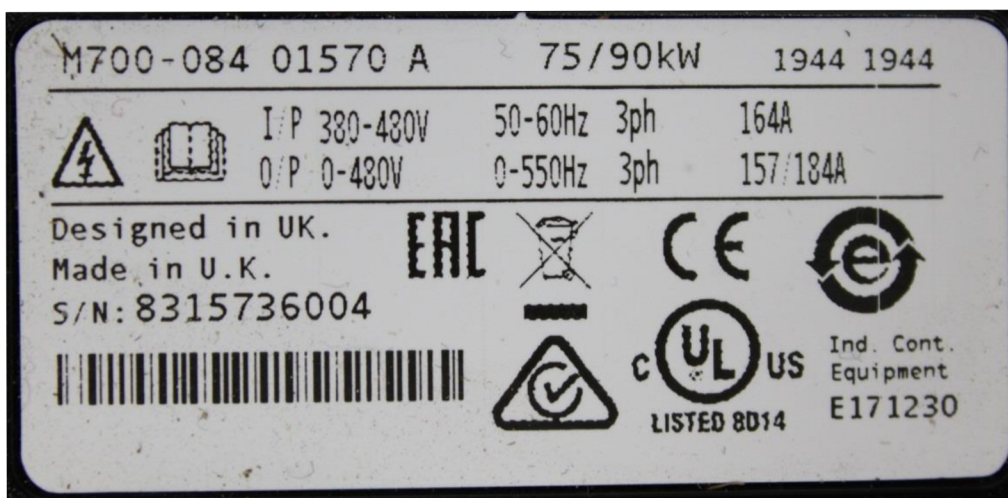


Obr. 6-1: Štítek motoru

Pozn.: Na štítku motoru (Obr. 6-1) je namísto jmenovitého napětí 390 V, uvedeného v dokumentaci stroje, uvedeno standardní napětí 400 V.



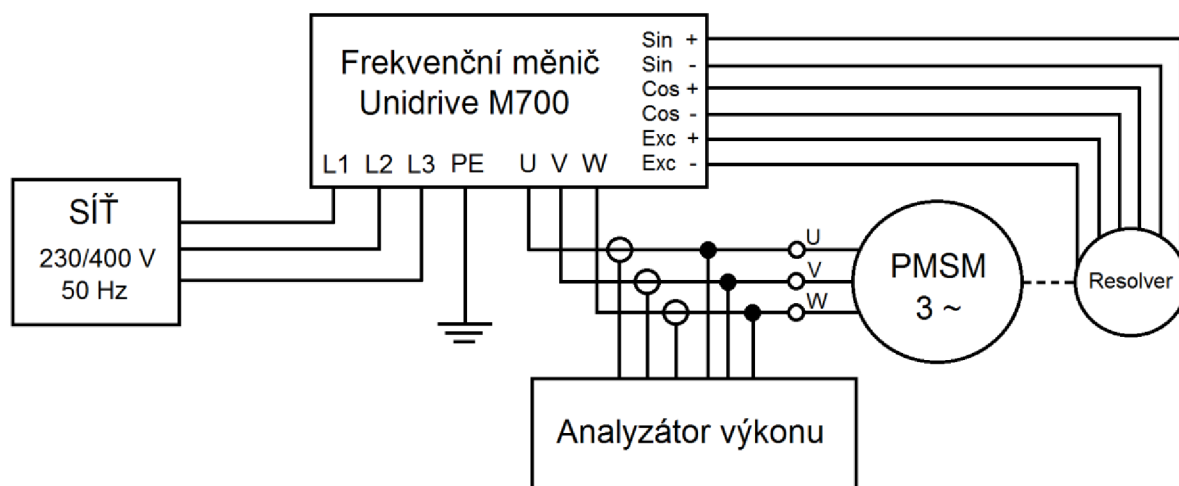
Obr. 6-2: Štítek dynamometru



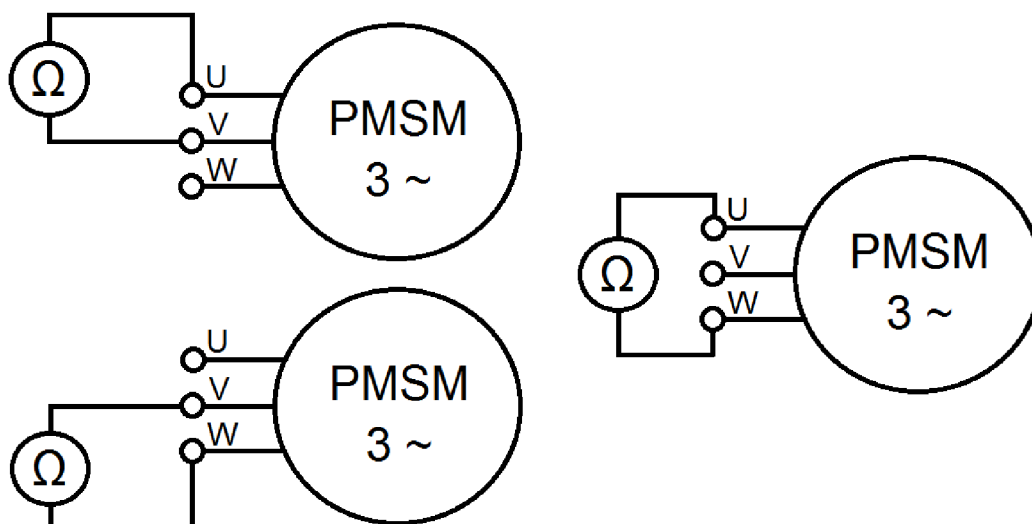
Obr. 6-3: Štítek frekvenčního měniče

6.2. Popis měření stroje

Na Obr. 6-4 a Obr. 6-5 jsou vyobrazena schémata zapojení měřicího pracoviště.



Obr. 6-4: Schéma zapojení měřicího pracoviště pro měření motoru



Obr. 6-5: Schéma zapojení měřicího pracoviště pro měření odporu vinutí

Stroj byl napájen z frekvenčního měniče Unidrive M700 od firmy Control Techniques. Měřený stroj měl být řízen pomocí zpětnovazebního vektorového řízení s použitím resolveru.

Tento režim však nefungoval. Při spuštění měniče a nastavení nenulových otáček docházelo k vibracím a rotor stroje se neotáčel. Funkce „Autotune“, kterou je frekvenční měnič vybaven, neproběhla správně. V režimu „Rotating“ má tato funkce s rotorem stroje pootočit přibližně o půl otáčky. Při použití resolveru se však motor rozbíhal na otáčky přibližně 250 min^{-1} . Přesnou příčinu nefunkčnosti zpětnovazebního řízení s resolverem se nepodařilo zjistit.

Měnič byl nastaven do **bezsenzorového vektorového řízení**. Bylo však nutné režim nastavit tak, aby jej bylo možné použít. Navíc bylo nutné zvýšit zadanou jmenovitou hodnotu napětí motoru ve frekvenčním měniči, a to z 390 V na 500 V. Motor pracuje v přebuzeném stavu (pokud je proud v ose d nulový) a měnič napětí indukované permanentními magnety vyhodnotil jako přepětí. Bezsenzorové řízení poté již pracovalo správně a funkce „Autotune“ proběhla v pořádku.

Je nutné podotknout, že v režimu bezsenzorového vektorového řízení má měnič vlastní algoritmus, který pro řízení používá. Z měření vyplynulo, že měnič motor v chodu naprázdno napájí při nižších než jmenovitých otáčkách (méně než 300 min^{-1}) jmenovitým proudem, který je orientován do d osy, a motor tak odbuzuje. S rostoucím zatížením velikost tohoto proudu neklesá, ale orientuje se postupně do q osy. Při otáčkách blízkých jmenovitým proud poklesne a jeho velikost pak závisí na zatížení.

Při měření bylo zjištěno, že při zatěžovacím momentu 376 Nm při jmenovitých otáčkách 350 min^{-1} se rotor kýve, proto již zatěžovací moment nebyl navyšován. Dále bylo zjištěno, že při otáčkách 300 min^{-1} je možné motor zatěžovat momentem 500 Nm bez kývání rotoru.

Z důvodu nefunkčnosti zpětnovazebního řízení s resolverem a nesprávné funkce bezsenzorového řízení při vyšších zatěžovacích momentech nebylo možné naměřit motor ve jmenovitém pracovním bodě a byl tedy naměřen v jiných pracovních bodech. Porovnání naměřených parametrů s výpočtem bude provedeno pro jeden z naměřených pracovních bodů.

6.3. Naměřené hodnoty

Nejprve byly změřeny velikosti indukovaných napětí permanentními magnety při chodu motoru naprázdno ve jmenovitých otáčkách. Naměřené hodnoty osciloskopem při jmenovitých otáčkách jsou uvedeny v **Tab. 6-1**, hodnoty naměřené analyzátozem výkonu jsou uvedeny v **Tab. 6-2**. Snímky naměřených průběhů z osciloskopu jsou uvedeny v Příloze B.

Tab. 6-1: Indukované napětí naprázdno naměřené osciloskopem při jmenovitých otáčkách

Fáze	Indukované napětí mezi fázemi (sdružená hodnota)	Fáze	Indukované napětí fázové (mezi svorkou a středem hvězdy)
U-V	488,46 V	U	282,59 V
V-W	489,82 V	V	281,97 V
W-U	488,73 V	W	282,46 V

Tab. 6-2: Indukované napětí naprázdno naměřené analyzátozem výkonu

Otáčky	Indukované napětí mezi fázemi (sdružená hodnota)
50 min ⁻¹	70,71 V
100 min ⁻¹	140,98 V
150 min ⁻¹	211,59 V
200 min ⁻¹	282,01 V
250 min ⁻¹	352,24 V
300 min ⁻¹	422,49 V
350 min ⁻¹	492,70 V

Naměřené hodnoty při zatěžování motoru při otáčkách 200, 300 a 350 min⁻¹ jsou uvedeny v **Tab. 6-3** až **Tab. 6-5**.

Tab. 6-3: Naměřené hodnoty při otáčkách 200 min⁻¹

$n = 200 \text{ min}^{-1}, f = 26,67 \text{ Hz}$								
Zatěžovací moment	Napájecí napětí	Statorový proud	Proud v d -ose	Proud v q -ose	Činný příkon motoru	Zdánlivý výkon motoru	Účinník	Účinnost
M [Nm]	U_1 [V]	I_S [A]	I_d [A]	I_q [A]	P [kW]	S [kVA]	λ [–]	η [%]
0	430,05	84,24	84,24	0,00	3,247	62,749	0,052	0,00
50	430,85	84,25	84,22	2,14	4,273	62,875	0,068	24,51
100	429,70	84,24	84,13	4,29	5,420	62,694	0,086	38,64
150	428,83	84,25	84,00	6,43	6,429	62,575	0,103	48,87
200	427,88	84,24	83,80	8,58	7,490	62,428	0,120	55,93

Tab. 6-4: Naměřené hodnoty při otáčkách 300 min⁻¹

$n = 300 \text{ min}^{-1}, f = 40 \text{ Hz}$								
Zatěžovací moment	Napájecí napětí	Statorový proud	Proud v d -ose	Proud v q -ose	Činný příkon motoru	Zdánlivý výkon motoru	Účinník	Účinnost
M [Nm]	U_1 [V]	I_S [A]	I_d [A]	I_q [A]	P [kW]	S [kVA]	λ [-]	η [%]
0	485,06	12,03	12,03	0,00	0,954	10,108	0,094	0,00
50	480,44	9,67	9,43	2,15	2,499	8,043	0,311	62,86
100	478,80	9,51	8,49	4,29	4,039	7,886	0,512	77,78
150	474,93	9,35	6,78	6,44	5,574	7,694	0,724	84,54
200	472,83	10,62	6,25	8,59	7,168	8,697	0,824	87,66
250	471,23	12,40	6,21	10,73	8,731	10,120	0,863	89,96
300	470,50	14,35	6,33	12,88	10,331	11,694	0,883	91,23
350	467,27	16,43	6,65	15,03	11,897	13,295	0,895	92,42
400	467,36	18,63	7,22	17,17	13,511	15,080	0,896	93,01
420	465,99	19,54	7,53	18,03	14,120	15,769	0,895	93,45
450	467,66	20,74	7,54	19,32	15,104	16,796	0,899	93,60
480	463,34	22,39	8,75	20,61	16,063	17,970	0,894	93,88
500	463,20	23,29	9,04	21,47	16,700	18,683	0,894	94,06

Při měření při momentu 500 Nm a otáčkách 350 min⁻¹ (Tab. 6-4) byl motor nejstabilnější. Proto byl pro tento pracovní bod proměřen větší rozsah hodnot oproti ostatním měřeným pracovním bodům.

Tab. 6-5: Naměřené hodnoty při otáčkách 350 min⁻¹

$n = 350 \text{ min}^{-1}, f = 46,67 \text{ Hz}$								
Zatěžovací moment	Napájecí napětí	Statorový proud	Proud v d -ose	Proud v q -ose	Činný příkon motoru	Zdánlivý výkon motoru	Účinník	Účinnost
M [Nm]	U_1 [V]	I_S [A]	I_d [A]	I_q [A]	P [kW]	S [kVA]	λ [-]	η [%]
0	485,24	24,80	24,80	0,00	1,008	20,840	0,048	0,00
50	476,76	28,52	28,44	2,15	2,851	23,552	0,121	64,28
100	477,14	29,00	28,68	4,29	4,697	23,966	0,196	78,03
150	474,18	30,82	30,14	6,44	6,561	25,310	0,259	83,79
200	469,53	33,41	32,29	8,59	8,424	27,172	0,310	87,02

V **Tab. 6-6** jsou uvedeny naměřené hodnoty při zatěžování motoru při otáčkách 200 min⁻¹, kdy byl ve frekvenčním měniči nahrazen jmenovitý proud motoru 84 A hodnotou 20 A.

Tab. 6-6: Naměřené hodnoty při otáčkách 200 min⁻¹ a zadaném jmenovitém proudu motoru 20 A

$n = 200 \text{ min}^{-1}, f = 26,67 \text{ Hz}, I_n = 20 \text{ A}$								
Zatěžovací moment	Napájecí napětí	Statorový proud	Proud v d -ose	Proud v q -ose	Činný příkon motoru	Zdánlivý výkon motoru	Účinník	Účinnost
M [Nm]	U_1 [V]	I_S [A]	I_d [A]	I_q [A]	P [kW]	S [kVA]	λ [-]	η [%]
50	399,75	20,41	20,30	2,14	1,784	14,132	0,126	58,70
100	397,85	20,37	19,91	4,29	2,863	14,038	0,204	73,15
150	397,43	20,39	19,35	6,43	3,893	14,034	0,277	80,70
200	395,97	20,35	18,45	8,58	4,938	13,958	0,354	84,83

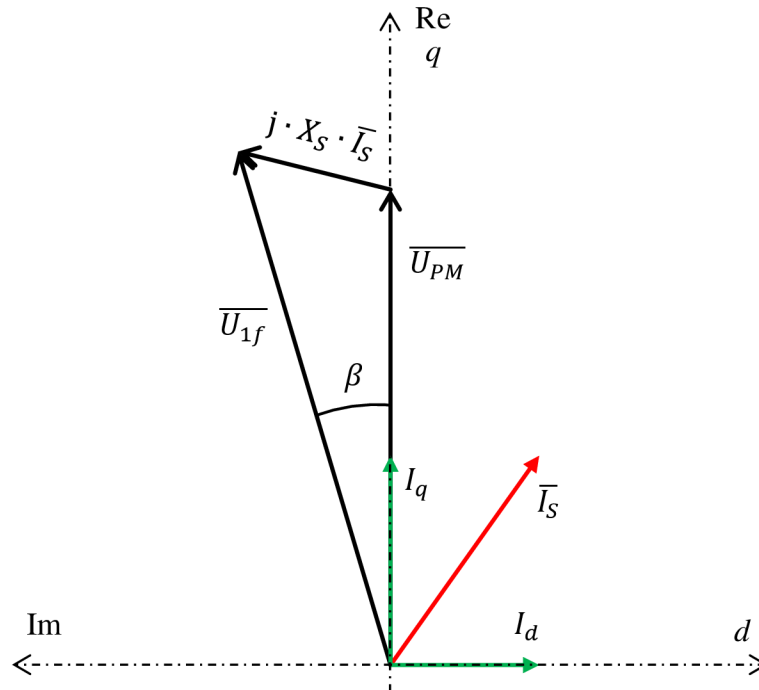
6.4. Vyhodnocení naměřených hodnot

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 6.2, proud motoru je při daném nastavení měniče (bezsenzorové vektorové řízení) velký při chodu v nižších otáčkách, a to i při malých zatěžovacích momentech a chodu naprázdno. Hodnoty proudu jsou menší při chodu v otáčkách 300 a 350 min⁻¹, což se projevuje vyšším účínkem a menším zdánlivým výkonem motoru, a tedy i menším odebíraným jalovým výkonem, a jejich velikost je již závislá na zatížení. O těchto skutečnostech se nepřímo zmiňuje také literární zdroj [2] a jsou dány algoritmem frekvenčního měniče v režimu bezsenzorového vektorového řízení. Mimo velikostí proudu motoru se chod v nižších otáčkách také projevuje velmi malým účínkem a odběrem velkého jalového výkonu ze sítě, kterým měnič motor odbuzuje. Velikost proudu v tomto případě odpovídá jmenovité hodnotě proudu motoru, která je do měniče zadána. Tato skutečnost byla ověřena změnou jmenovitého proudu motoru 84 A na hodnotu 20 A (viz **Tab. 6-6**).

Opět je nutné podotknout, že frekvenční měnič měl nastavenou vyšší hodnotu jmenovitého napětí motoru (500 V), jak již bylo zmíněno v podkapitole 6.2. Toto nastavení se projeví ve vyšším napětí na svorkách stroje, než je napětí jmenovité. Měnič motor v bezsenzorovém vektorovém řízení odbuzuje a v rozsahu měřených zatěžovacích momentů neorientuje proud do q osy. Motor tedy v tomto rozsahu momentů nedosáhne účínku rovného jedné.

Protože nejsou k dispozici naměřené hodnoty pro jmenovitý pracovní bod motoru, nelze na základě měření provést komplexní vyhodnocení přesnosti analytického výpočtu, aniž by byl celý stroj přepočítán na jiný jmenovitý pracovní bod (tj. opětovné provedení výpočtů v kapitole 3). Aby bylo možné výpočet alespoň částečně vyhodnotit, byl stroj přepočítán v Ansys RMXprt i Maxwell 2D a byl naměřen odpor vinutí. Dále byl sestrojen fázorový diagram z hodnot získaných měřením pro vybraný pracovní bod.

Jako pracovní bod byl zvolen zatěžovací moment 500 Nm při otáčkách 300 min⁻¹. Pro tento bod byl sestrojen fázorový diagram vyobrazený na **Obr. 6-6**. Fázorový diagram je v měřítku, kdy napětí 5 V odpovídá proudu 1 A. V diagramu je zanedbán úbytek napětí na odporu vinutí. Jak již bylo vysvětleno v podkapitole 3.13, synchronní reaktance (dle analytického výpočtu 1,675 Ω) nabývá daleko větších hodnot než odpor fáze vinutí (dle analytického výpočtu 0,1213 Ω). Odpor fáze vinutí je tak možné zanedbat, přičemž fázorový diagram bude zatížen pouze zanedbatelnou chybou.



Obr. 6-6: Fázorový diagram stroje – měření při $M = 500 \text{ Nm}$ a $n = 300 \text{ min}^{-1}$

Z fázorového diagramu na **Obr. 6-6** sestrojeného z naměřených hodnot ve vybraném pracovním bodě vyplývají následující hodnoty veličin:

$$\overline{U_{PM}} = (243,92 \angle 0^\circ) \text{ V} \quad (6.1)$$

$$\overline{U_{1f}} = (267,43 \angle 9,97^\circ) \text{ V} \quad (6.2)$$

$$\overline{I_S} = (23,29 \angle -22,80^\circ) \text{ A} \quad (6.3)$$

$$I_d = 9,04 \text{ A} \quad (6.4)$$

$$I_q = 21,47 \text{ A} \quad (6.5)$$

$$j \cdot X_S \cdot \overline{I_S} = (50,24 \angle 67,20^\circ) \text{ V} \quad (6.6)$$

$$\beta = 9,97^\circ \quad (6.7)$$

Z fázorového diagramu můžeme zhodnotit přesnost výpočtů indukčností. Stanovíme synchronní reaktanci a následně indukčnost:

$$\overline{U_{1f}} = \overline{U_{PM}} + j \cdot X_S \cdot \overline{I_S} \quad (6.8)$$

$$X_S = \frac{\overline{U_{1f}} - \overline{U_{PM}}}{j \cdot \overline{I_S}} \quad (6.9)$$

$$X_S = \frac{(267,43 \angle 9,97^\circ) - (243,92 \angle 0^\circ)}{j \cdot (23,29 \angle -22,80^\circ)} \approx 2,1567 \Omega \quad (6.10)$$

Pozn.: V rovnici (6.10) vychází po vyčíslení zlomku nemulová imaginární složka synchronní reaktance. Tato skutečnost je dána průběžným zaokrouhlováním veličin a její velikost je velmi malá, tedy nemá vliv na fyzikální smysl výpočtu.

Nyní vypočítáme indukčnosti v d a q ose, přičemž napájecí frekvence pro zvolený pracovní bod činila 40 Hz:

$$X_d = X_q = X_S = 2,1567 \Omega \quad (6.11)$$

$$L_S = L_q = L_d = \frac{X_d}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2,1567}{2 \cdot \pi \cdot 40} = 8,581 \text{ mH} \quad (6.12)$$

Naměřené odpory jednotlivých fází při teplotě okolí 20 °C činí:

$$R_U = 0,0982 \Omega \quad (6.13)$$

$$R_V = 0,0978 \Omega \quad (6.14)$$

$$R_W = 0,0982 \Omega \quad (6.15)$$

V analytickém výpočtu vyšla hodnota odporu fáze vinutí 0,1213 Ω při teplotě vinutí 100 °C. Přepočítáme-li odpor vinutí na teplotu 20 °C, vyjde hodnota 0,0930 Ω . Odpory dle rovnic (6.13) až (6.15) můžeme považovat za velmi dobrou shodu, pokud podotkneme, že střední délka vodiče vinutí byla stanovena přibližnou rovnicí (3.204). V softwarech RMXprt a Maxwell 2D nabývá odpor fáze vinutí hodnoty 0,1234 Ω při teplotě vinutí 100 °C. Při přepočtu na teplotu 20 °C vyjde hodnota odporu 0,0945 Ω , což je opět velmi dobrá shoda, neboť RMXprt, ze kterého Maxwell 2D hodnotu odporu převzal, nemá informace o geometrii čel cívek vinutí. Můžeme tedy prohlásit, že analytický výpočet i modely stroje mají v tomto ohledu dostatečnou přesnost.

Nyní porovnáme hodnoty získané měřením s hodnotami spočtenými softwary Ansys RMXprt a Ansys Maxwell 2D, kdy byl model stroje přenastaven na zvolený pracovní bod z měření ($M = 500 \text{ Nm}$, $n = 300 \text{ min}^{-1}$). Tyto hodnoty jsou uvedeny v **Tab. 6-7**.

Tab. 6-7: Porovnání hodnot získaných měření a výpočtem v Ansys RMxprt a Ansys Maxwell 2D ve vybraném pracovním bodě z měření

Veličina	Značení	Měření	Ansys RMxprt	Ansys Maxwell 2D
Moment	M	500 Nm	500,3 Nm	508,2 Nm
Mechanický výkon	P	15,708 kW	15,717 kW	15,966 kW
Vstupní výkon (příkon)	P_1	16,700 kW	16,572 kW	16,758 kW
Napětí na svorkách stroje (sdružené)	U_1	463,20 V	390 V	390 V
Napětí na vinutí stroje (fázové)	U_{1f}	267,43 V	225,17 V	225,17 V
Indukované napětí permanentním magnetem	U_{PM}	243,92 V	233,41 V	240,07 V
Statorový proud	I_S	23,29 A	24,57 A	28,24 A
Proud v d ose	I_d	9,04 A	- 9,98 A	- 17,49 A
Proud v q ose	I_q	21,47 A	22,45 A	22,17 A
Účinník	$\cos \varphi$	0,894 (<i>ind.</i>)	0,998 (<i>kap.</i>)	0,878 (<i>kap.</i>)
Indukčnost v ose d	L_d	8,581 mH	5,238 mH	5,058 mH
Indukčnost v ose q	L_q	8,581 mH	5,238 mH	5,092 mH
Mechanické ztráty	ΔP_{mech}	---	211,6 W	---
Ztráty v železe	ΔP_{Fe}	---	418,3 W	488,6 W
Ztráty v permanentních magnetech	ΔP_{PM}	---	---	7,9 W
Ztráty v mědi	ΔP_{Cu}	---	223,3 W	295,1 W
Celkové ztráty	ΔP	992 W	853,2 W	791,6 W
Účinnost	η	94,06 %	94,85 %	95,27 %

Veškeré časové průběhy veličin vypočítané softwarem Ansys Maxwell 2D pro vybraný pracovní bod z měření jsou uvedeny v Příloze D.

Nejprve popíšeme úpravy modelů stroje. V RMXprt byl přenastaven jmenovitý výkon stroje a jmenovité otáčky tak, aby se shodovaly s pracovním bodem z měření. Mechanické ztráty zůstaly zadány pro otáčky 350 min^{-1} , ale RMXprt tyto ztráty přepočítal na otáčky 300 min^{-1} . V Maxwellu mechanické ztráty nebyly respektovány. Mechanické ztráty při jmenovitých otáčkách činí $8,19 \text{ Nm}$ a při otáčkách 300 min^{-1} budou nižší. Dle RMXprt jsou mechanické ztráty z momentového hlediska při otáčkách 300 min^{-1} $6,74 \text{ Nm}$. Takto zavedená chyba do výpočtu v Maxwellu se téměř úplně vykompenzuje vyšší hodnotou momentu stroje oproti měření, která činí $508,2 \text{ Nm}$, a skutečný moment na hřídeli pak odpovídá $501,46 \text{ Nm}$ (pokud uvažujeme mechanické ztráty stanovené RMXprtem).

Napětí na svorkách stroje je značně nižší u výpočtů v RMXprt a Maxwellu (rozdíl činí $73,2 \text{ V}$). Tato skutečnost je dána vyšším nastaveným jmenovitým napětím v měniči, což bylo popsáno v podkapitole 6.2. Při nastavení napětí na svorkách stroje v Maxwellu tak, aby se shodovalo s měřením, byly vypočítané hodnoty nesmyslné, přičemž by v daném případě okamžitě došlo k demagnetizaci permanentních magnetů. Proto bylo ponecháno jmenovité napětí na svorkách 390 V . V RMXprt při nastavení vyššího napětí na svorkách stroje byly vypočítané hodnoty reálné, ale měly významné odchylky od měření a výpočet pak byl oproti měření nepřesný. I v RMXprt bylo tedy ponecháno jmenovité napětí stroje 390 V .

Indukované napětí permanentním magnetem stanovené Maxwellem je téměř totožné s měřením, u RMXprt je rozdíl $10,51 \text{ V}$. Oproti měření je přesnější výpočet v Maxwellu.

Statorový proud je naopak přesnější v RMXprt. V Maxwellu je odchylka výpočtu oproti reálné hodnotě $21,3 \%$, tedy výpočet je zatížený nezanedbatelnou chybou.

Skutečná indukčnost vinutí (činí $8,581 \text{ mH}$) je vyšší, než jsou indukčnosti stanovené analytickým výpočtem (činí $5,711 \text{ mH}$), výpočtem v RMXprt (činí $5,238 \text{ mH}$) a výpočtem v Maxwellu 2D (činí $5,193 \text{ mH}$ v d ose a $5,106 \text{ mH}$ v q ose). Nejbližše skutečné hodnotě je indukčnost stanovená analytickým výpočtem. Analytický výpočet používá různé činitele pro stanovení jednotlivých rozptylových indukčností motoru, které jsou poté sečteny. Jeho přesnost je velmi závislá na reálném konstrukčním řešení motoru. Výpočet v RMXprt a simulace v Maxwellu 2D nemohou uvažovat všechny vlivy konstrukčního řešení motoru – nesymetrie, čela cívek, aj. Není znám přesný způsob výpočtu, který využívá RMXprt, a proto není možné stanovit, do jaké míry RMXprt uvažuje reálné konstrukční řešení motorů. V Maxwellu 2D je

vytvořen 2D model, což znamená, že zde nejsou přítomny čela cívek, které mohou ovlivnit indukčnosti v d a q osách. Modely stroje z hlediska indukčností nejsou přesné, přičemž nebyla nalezena přesná příčina. Pravděpodobně se jedná o samotné modely stroje, kdy simulační softwary nemají k dispozici reálnou geometrii celého stroje. Dle dokumentace stroje je indukčnost vinutí 8,5 mH, tedy měření není chybné. Opět podotkneme, že nejbližší skutečné hodnotě indukčnosti byla hodnota stanovená analytickým výpočtem. Analytický výpočet používal empirické metody stanovení indukčností způsobených různými částmi stroje (např. čely cívek vinutí). To může být důvodem, proč je hodnota stanovená analytickým výpočtem nejbližší reálné hodnotě. V reálném stroji tedy působí s největší pravděpodobností vliv některé části stroje, který nebyl v modelech uvažován, a modely jsou z hlediska výpočtu indukčností nepřesné. Zmíněný vliv ve stroji se nepodařilo identifikovat.

Během měření byly několikrát frekvenčním měničem změřeny hodnoty indukčností v d a q osách, přičemž hodnoty byly po každém provedení měření jiné. Bylo vyzorováno, že se hodnoty těchto indukčností naměřené frekvenčním měničem mění v rozsahu cca 1,5 až 7,5 mH. Stanovenou hodnotu synchronní reaktance, resp. indukčnosti tedy není možné podložit hodnotami naměřenými frekvenčním měničem.

Ztráty v mědi z měření nebyly stanoveny, neboť nebyla naměřena teplota vinutí, která ovlivní jeho odpor a zároveň i statorový proud a tím také ztráty v mědi.

Celkové ztráty stanovené měřením činí 992 W, ztráty stanovené RMxpртом činí 853,2 W a ztráty stanovené Maxwellem činí 791,6 W. RMxprt ani Maxwell nestanovují dodatečné ztráty ve stroji, které mohou značně ovlivnit celkové ztráty. Dále podotkneme, že v Maxwellu vychází vyšší moment stroje, na který můžeme nahlížet způsobem, kdy jeho část kryje mechanické ztráty. Mechanické ztráty nejsou zohledněny v celkových ztrátách. Je tedy nutné celkové ztráty navýšit o mechanické ztráty, které Maxwell nepočítal. Využijeme-li mechanické ztráty z RMxpрту, po jejich přičtení k celkovým ztrátám v Maxwellu nám vyjde 1003,2 W, což je hodnota téměř shodná s měřením. Je tedy nutné k celkovým ztrátám přičíst mechanické ztráty, které jsou zahrnuty v momentu stroje a Maxwell je tak za ztráty nepovažuje. Model stroje je tedy v Maxwellu z hlediska celkových ztrát přesnější oproti RMxpрту, avšak za předpokladu, že známe mechanické ztráty.

Z výše uvedeného vyplývají účinnosti získané v RMxpрту (94,85 %) a Maxwellu (95,27 %). Účinnost danou Maxwellem snížíme zavedením mechanických ztrát a vyjde nám

hodnota 94,01 %. Tuto hodnotu účinnosti můžeme pokládat za shodnou s měřením (činí 94,06 %).

Ze všech skutečností vyplývá, že model stroje v Maxwellu je dostatečně přesný pro výpočet daného stroje. Výpočet v RMXprt je méně přesný, ale pro přibližný výpočet je dostačující. Využitím mechanických ztrát přepočítaných RMXprtem bylo možné zpřesnit ztráty získané Maxwellem. Měření ukázalo, že v analytickém výpočtu, výpočtu v RMXprt a simulaci v Maxwell 2D není s největší pravděpodobností závažná nepřesnost či chyba, která by způsobila nepřesnost výpočtů a simulací. Tato nepřesnost by se projevila velmi značným odchýlením hodnot z měření (odpor vinutí, satorový proud, účinnost, aj.). Výše bylo popsáno, že nepříjemná chyba se vyskytuje pouze u indukčností.

Z měření dále vyplývá, že výpočty (včetně analytického výpočtu) a simulace jsou v porovnání s měřením relativně přesné z hlediska odporů vinutí.

Je nutné opět zmínit, že měnič má vlastní algoritmus, který používá pro bezsenzorové řízení stroje. Na svorkách stroje je vyšší napětí než jmenovité a měnič motor odbuzuje. Z tohoto hlediska nemusí vytvořené modely zachycovat reálné poměry ve stroji, které budou oproti simulaci jiné.

Nebylo možné naměřit jmenovitý pracovní bod stroje, což by nám umožnilo důkladné vyhodnocení přesnosti všech provedených výpočtů a simulací. Proto bylo provedeno alespoň částečné vyhodnocení přesnosti, a to přepočítáním modelů stroje na zvolený pracovní bod z měření a dále také ověřením hodnot odporu a indukčnosti vinutí, včetně hodnot získaných analytickým výpočtem. Provedeme porovnání všech parametrů získaných výpočty, simulací i měření a následně provedeme úpravy pro snížení chyby u té veličiny, u které jsou odchylky jednotlivých hodnot, získaných výpočtem, simulacemi nebo měřením, největší.

7. SNÍŽENÍ CHYBY VÝPOČTU – ZTRÁTY V PERMANENTNÍCH MAGNETECH

Největší relativní odchylka jednotlivých způsobů analýzy stroje – analytický výpočet, výpočet v RMXprt, simulace v Maxwell 2D a měření – je u ztrát v permanentních magnetech. Tyto ztráty sice nelze podložit měřením, avšak simulace v Maxwell 2D může být považována za dostatečně přesný výpočet těchto ztrát. Relativní odchylka analytického výpočtu těchto ztrát je oproti simulaci v Maxwell 2D velká – 550 %. Zvolený způsob výpočtu podle literárního zdroje [11] se ukázal jako nepřesný. Protože u jiných veličin stanovených analytickým výpočtem není v porovnání se softwary RMXprt a Maxwell 2D a měřením tak velká odchylka jako u ztrát v permanentních magnetech, klade si tato práce za úkol zpřesnit právě tyto ztráty. Pro ztráty v permanentních magnetech nemůžeme pokládat hodnotu z dokumentace stroje za směrodatnou, neboť neznáme detailně, jak byla stanovena, a nelze ji podložit měřením.

Ztráty v permanentních magnetech tvoří jednotky až desítky wattů, a protože se jedná o stroj o výkonu 50 kW, jejich zpřesnění nepřinese téměř žádnou změnu, např. v účinnosti. Mimo vysoké relativní odchylky analytického výpočtu a simulace v Maxwell 2D je druhým důvodem pro volbu zpřesnění hodnoty ztrát v permanentních magnetech samotná problematika těchto ztrát.

Ztráty v permanentních magnetech jsou v drtivé většině případů v praxi počítány numerickými metodami, např. MKP. Dosud nebyl sestaven přesný analytický výpočet těchto ztrát, který by byl „univerzální“ ve smyslu možnosti přímé aplikace na veškeré rotační stroje, případně většinu těchto strojů. Hlavní důvod této skutečnosti je samotná analýza vířivých proudů, které v permanentních magnetech ve strojích vznikají. Tato analýza je problematická. Čistě analytickým výpočtem ztrát v permanentních magnetech se zabývá literární zdroj [14]. V tomto literárním zdroji je sestaven postup analytického výpočtu ztrát v permanentních magnetech. Na základě tohoto postupu výpočtu jsou ztráty v permanentních magnetech v této práci přepočítány.

Ztráty v permanentních magnetech jsou způsobeny vířivými proudy, které v nich vznikají vlivem poklesu magnetické indukce ve chvíli, kdy magnet prochází mezi zuby statoru, tzn. oblastí otevření drážky. Zdroj [14] uvádí rovnice, které platí obecně. Na základě těchto rovnic je odvozen výpočet ztrát v magnetech. Magnety ve strojích jsou obvykle segmentovány, čemuž je tak i u stroje v této práci. Vzorec pro ztráty v magnetech je nejprve odvozen pro

situaci, kdy šířka jednoho segmentu magnetů je daleko menší, než je pólová rozteč jednotlivých drážkových harmonických magnetické indukce. Vzorec je ve zdroji [14] dále upraven i pro případ, kdy je šířka jednoho segmentu magnetů menší než pólová rozteč jednotlivých drážkových harmonických magnetické indukce, ale současně větší než tato pólová rozteč vydělená přírozenými čísly většími nebo rovnými třem. Ani jeden z uvedených případů neplatí pro náš stroj. To znamená, že výpočet uvedený ve zdroji [14] zde nemůžeme aplikovat přímo a musí být upraven.

7.1. Magnetická indukce mezi zuby statoru

Zdroj [14] vychází z magnetické indukce mezi zuby statoru podle Carterovy teorie. Její průběh je vyobrazen na **Obr. 7-1** a je dána rovnicí [14]:

$$B_{\delta}(\alpha) = B_{av} \cdot \left[1 - \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cdot \beta \cdot k_C \cdot a_{1k} \cdot \cos(k \cdot Q_S \cdot \alpha) \right] \quad (7.1)$$

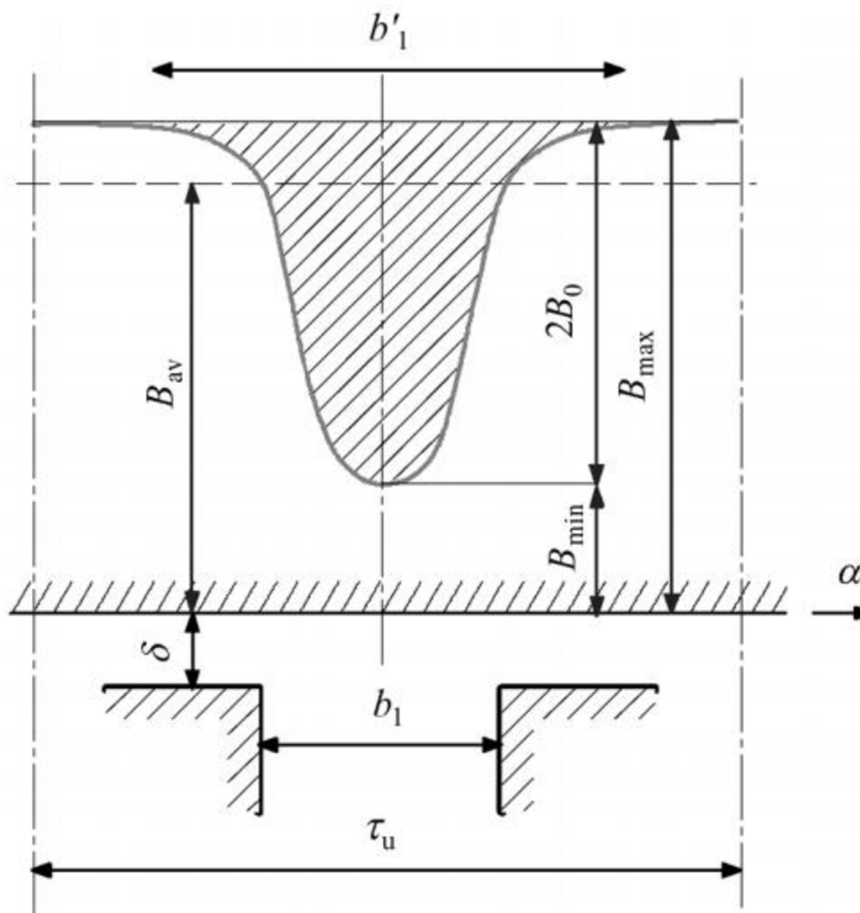
kde α je úhel polohy pod zubem (viz **Obr. 7-1**), B_{av} je střední hodnota magnetické indukce, k je řád drážkové harmonické, β je poměr poloviny rozdílu maximální a minimální hodnoty magnetické indukce ku maximální hodnotě a a_{1k} je dáno [14]:

$$a_{1k} = \frac{2 \cdot \sin\left(k \cdot \pi \cdot \frac{b'_1}{\tau_u}\right)}{k \cdot \pi \cdot \left[1 - \left(k \cdot \frac{b'_1}{\tau_u}\right) \right]} \quad (7.2)$$

kde b'_1 je fiktivní rozměr a je dán [14]:

$$b'_1 = \frac{\left(\frac{b_1}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_1}{\delta}} \cdot \frac{\delta}{\beta} \quad (7.3)$$

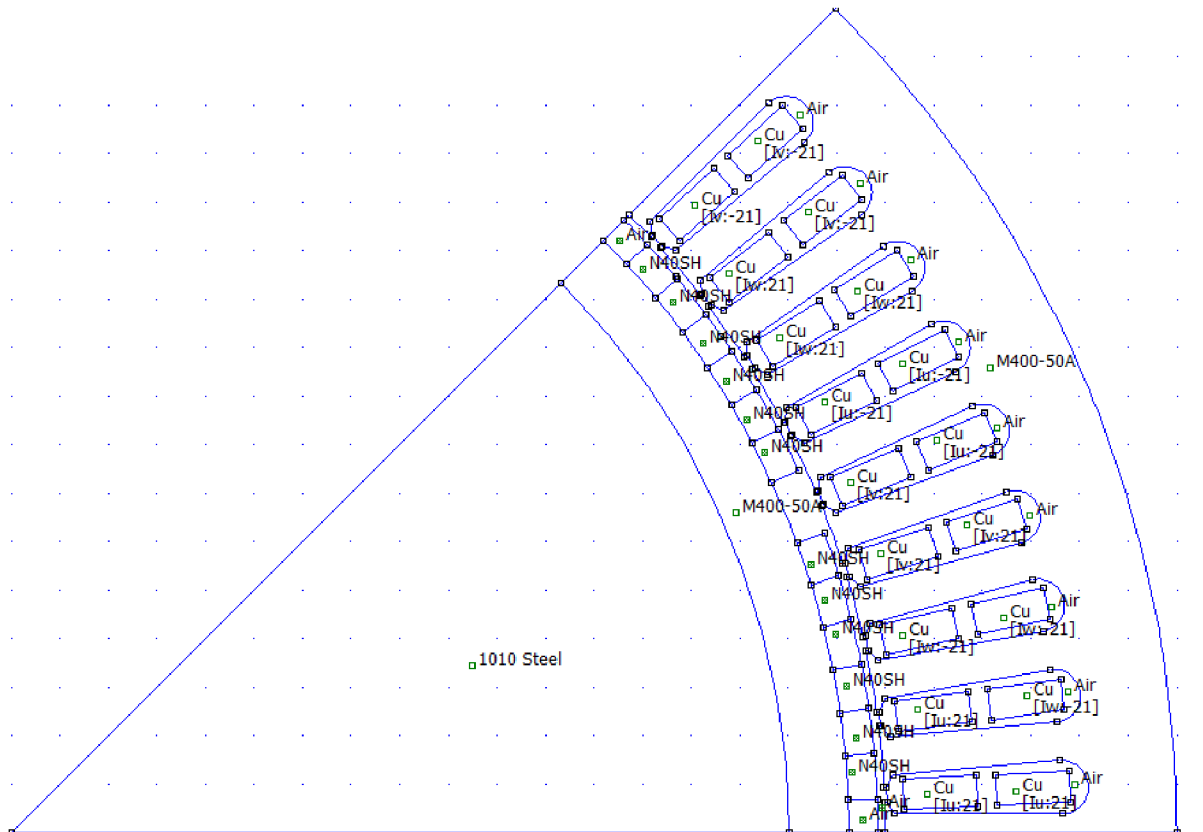
Průběh magnetické indukce podle rovnice (7.1) velmi závisí na geometrii stroje. Při širším otevření drážky ve stroji je „propad“ magnetické indukce dle **Obr. 7-1** větší a širší, ale vyšší drážkové harmonické nejsou tak výrazné. Při užším otevření drážky má průběh magnetické indukce značný obsah vyšších drážkových harmonických [14].



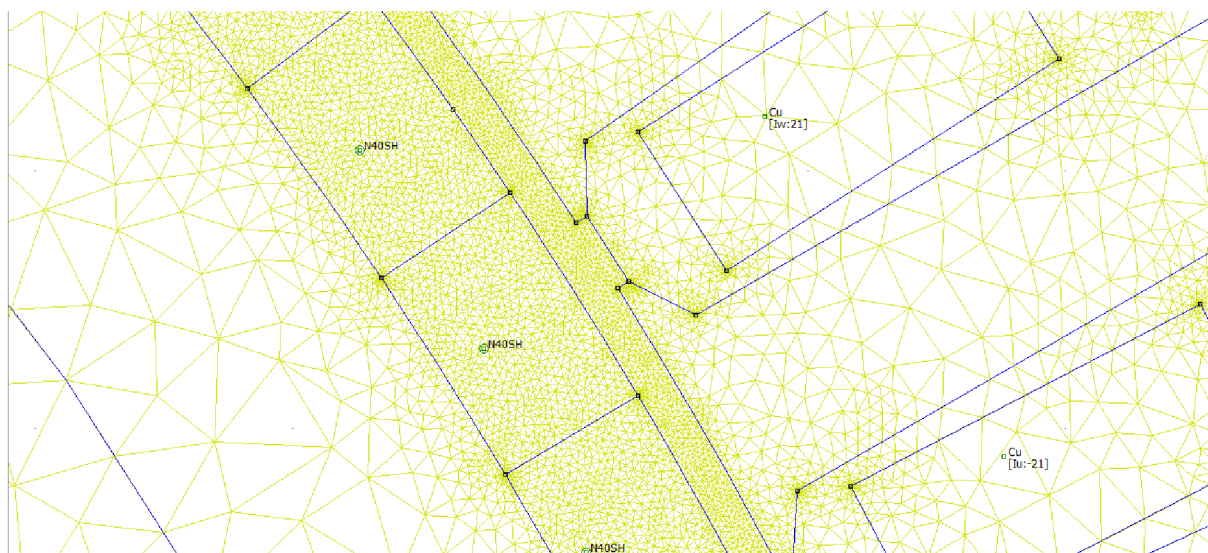
Obr. 7-1: Magnetická indukce pod zubem statoru [14]

Při výpočtu ztrát v permanentních magnetech bylo zjištěno, že při uvažování magnetické indukce pod zubem statoru dle rovnice (7.1), se současným využitím rovnice (7.2) a (7.3), vycházejí ztráty příliš vysoké, tedy skutečná magnetická indukce v oblasti otevření drážky bude jiná. Abychom mohli výpočet ztrát v permanentních magnetech uvedený ve zdroji [14] aplikovat a získat přesné výsledky, musíme znát skutečný průběh magnetické indukce na povrchu magnetů.

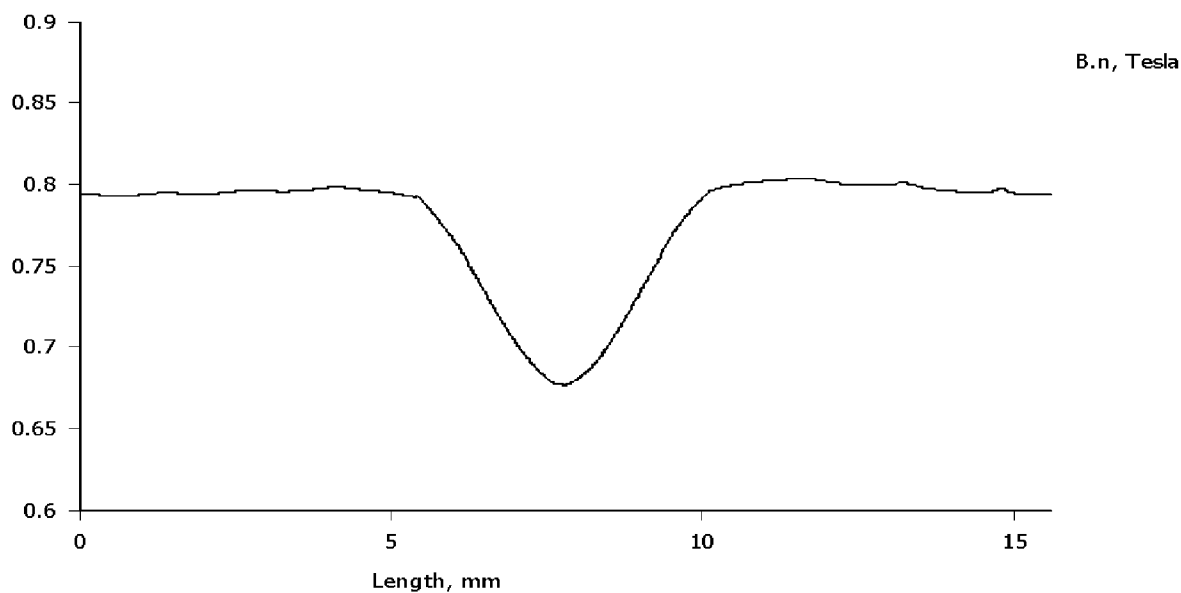
Pro přesné stanovení magnetické indukce na povrchu magnetů byl využit software FEMM. Model stroje v programu FEMM je vyobrazen na **Obr. 7-2**. Na **Obr. 7-3** je vyobrazen detail sítě ve vzduchové mezeře modelu stroje pro výpočet. Na **Obr. 7-4** je vyobrazen průběh magnetické indukce na povrchu magnetů přes jednu drážkovou rozteč vypočítaný programem FEMM.



Obr. 7-2: Model stroje v programu FEMM



Obr. 7-3: Detail sítě ve vzduchové mezeře pro výpočet modelu stroje v programu FEMM



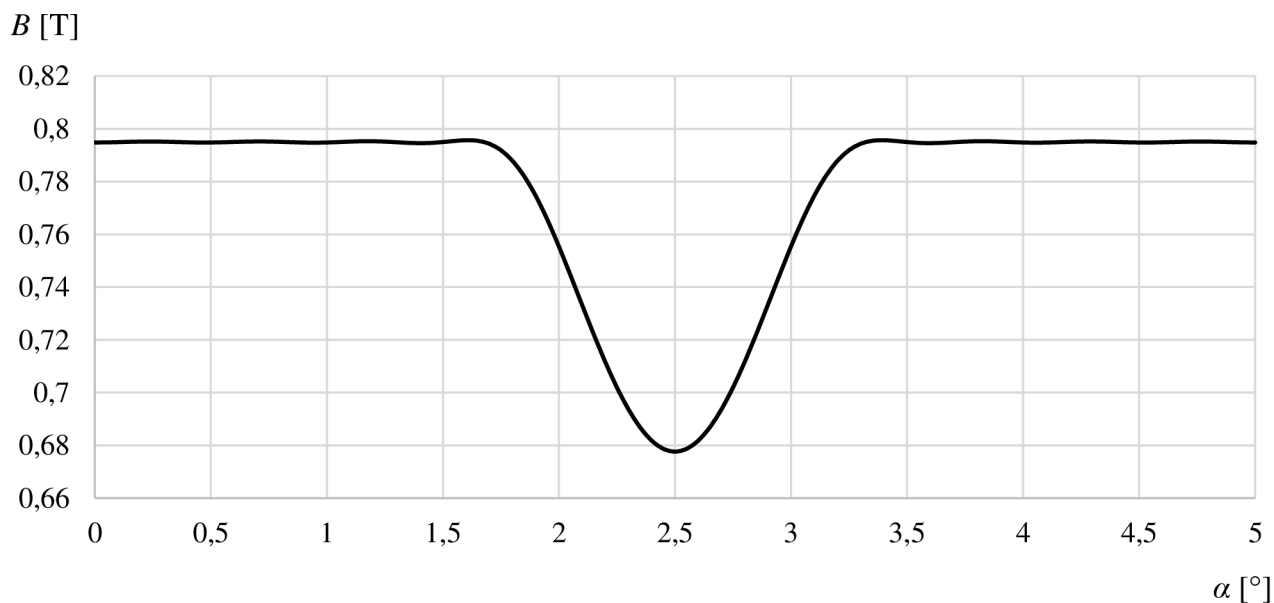
Obr. 7-4: Magnetická indukce na povrchu magnetů přes jednu drážkovou rozteč, vypočítaná programem FEMM

Z průběhu na **Obr. 7-4** byly stanoveny hodnoty poměru poloviny rozdílu maximální a minimální hodnoty magnetické indukce ku maximální hodnotě β a fiktivního rozměru b'_1 :

$$\beta = 0,0717 \quad (7.4)$$

$$b'_1 = 5,2 \text{ mm} \quad (7.5)$$

Na **Obr. 7-5** je vyobrazen rekonstruovaný průběh magnetické indukce na povrchu magnetů sestrojený rovnicemi (7.1) a (7.2) s využitím hodnot β a b'_1 dle rovnic (7.4) a (7.5). Tento průběh slouží pro kontrolu a pro výpočet ztrát v permanentních magnetech je nutné, aby se shodoval s průběhem vypočítaným programem FEMM.



Obr. 7-5: Rekonstruovaný průběh magnetické indukce na povrchu magnetů přes jednu drážkovou rozteč

Při výpočtu ztrát v permanentních magnetech bylo zjištěno, že tyto ztráty jsou ve stroji v této práci způsobeny především prvními sedmi drážkovými harmonickými magnetické indukce. Vyšší drážkové harmonické způsobují ztráty menší než 1 mW. Z tohoto důvodu budeme uvažovat pouze první až sedmou drážkovou harmonickou. Jednotlivé harmonické nabývají hodnot uvedených v **Tab. 7-1**. Tyto hodnoty by získány rozepsáním rovnice (7.1), do které byly dosazeny rovnice (7.2), (7.4) a (7.5).

Tab. 7-1: Harmonické magnetické indukce na povrchu magnetů vyvolané drážkováním

Řád harmonické	Hodnota magnetické indukce
1	0,036204 T
2	0,029057 T
3	0,019641 T
4	0,010563 T
5	0,003800 T
6	0,000093 T
7	0,001026 T

7.2. Výpočet ztrát v permanentních magnetech

Nyní sestavíme výpočet pro ztráty v permanentních magnetech pro stroj řešený v této práci na základě magnetické indukce na povrchu magnetů stanovené programem FEMM a literárního zdroje [14]. První drážková harmonická magnetické indukce má větší pólovou rozteč, než je polovina délky segmentu jednoho magnetu. Druhá a vyšší drážkové harmonické mají menší pólovou rozteč, než je polovina délky segmentu permanentního magnetu. Z tohoto důvodu musí být sestaven postup výpočtu pro ztráty způsobené první drážkovou harmonickou magnetické indukce a zvláště musí být stanoven postup výpočtu ztrát způsobených druhou a vyššími drážkovými harmonickými.

V magnetech vzniká frekvence drážkové harmonické k -tého řádu, která se odvíjí od počtu drážek a otáček rotoru. Tato frekvence je [14]:

$$f_{PM,k} = k \cdot Q_S \cdot \frac{n_n}{60} \quad (7.6)$$

Hloubka vniku elektromagnetického pole do permanentního magnetu je dána [14]:

$$\delta_{PM,k} = \sqrt{\frac{\rho_{PM}}{\pi \cdot f_{PM,k} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{r,PM}}} \quad (7.7)$$

kde ρ_{PM} je rezistivita magnetu, která je podle zdroje [9]:

$$\rho_{PM} = 180 \mu\Omega \cdot \text{cm} \quad (7.8)$$

Pólová rozteč k -té drážkové harmonické je dána [14]:

$$\tau_k = \frac{\tau_u}{2 \cdot k} \quad (7.9)$$

7.3. Ztráty způsobené první drážkovou harmonickou magnetické indukce

Nyní se budeme zabývat výpočtem ztrát způsobených **první drážkovou harmonickou**. Frekvence první drážkové harmonické je [14]:

$$f_{PM,1} = 1 \cdot Q_S \cdot \frac{n_n}{60} = 1 \cdot 72 \cdot \frac{350}{60} = 420 \text{ Hz} \quad (7.10)$$

Magnetický tok do části magnetu, kterou prochází vířivý proud, je [14]:

$$\phi_{PM,1} = \frac{2}{\pi} \cdot B_1 \cdot \frac{w_{PM}}{2 \cdot N_{lam}} \cdot l_{PM} \quad (7.11)$$

kde w_{PM} je šířka magnetů, N_{lam} je počet segmentů magnetů podél jednoho pólu stroje a l_{PM} je délka jednoho segmentu magnetů, které jsou dle dokumentace stroje:

$$w_{PM} = 54 \text{ mm} \quad (7.12)$$

$$N_{lam} = 6 \quad (7.13)$$

$$l_{PM} = 50 \text{ mm} \quad (7.14)$$

Spočteme zmíněný magnetický tok:

$$\phi_{PM,1} = \frac{2}{\pi} \cdot B_1 \cdot \frac{w_{PM}}{2 \cdot N_{lam}} \cdot l_{PM} = \frac{2}{\pi} \cdot 0,036204 \cdot \frac{54 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \quad (7.15)$$

$$\phi_{PM,1} = 5,18583 \text{ } \mu\text{Wb} \quad (7.16)$$

Hloubka vniku první drážkové harmonické bude [14]:

$$\delta_{PM,1} = \sqrt{\frac{\rho_{PM}}{\pi \cdot f_{PM,1} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{r,PM}}} = \sqrt{\frac{180 \cdot 10^{-8}}{\pi \cdot 420 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,055}} \quad (7.17)$$

$$\delta_{PM,1} = 32,078 \text{ mm} \quad (7.18)$$

Vířivý proud bude protékat plochami magnetů v axiálním i tangenciálním směru. Plocha v axiálním směru, přes kterou protéká proud, je stanovena [14]:

$$S_{PM,ax,1} = \frac{w_{PM}}{2 \cdot N_{lam}} \cdot \frac{\delta_{PM,1}}{2} \cdot \left(1 - e^{\frac{-2 \cdot h_{PM}}{\delta_{PM,1}}}\right) \quad (7.19)$$

$$S_{PM,ax,1} = \frac{54 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6} \cdot \frac{32,078 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left(1 - e^{\frac{-2 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{32,078 \cdot 10^{-3}}}\right) \quad (7.20)$$

$$S_{PM,ax,1} = 2,25248 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (7.21)$$

Polovina tangenciální plochy segmentu magnetu je daleko větší než polovina axiální plochy. Vířivý proud však nepoteče celou polovinou tangenciální plochy, nýbrž pouze její částí, která je přibližně shodná s axiální plochou, přes kterou teče vířivý proud [14]:

$$S_{PM,tan,1} \approx S_{PM,ax,1} = 2,25248 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Ekvivalentní odpor permanentního magnetu spočteme takto [14]:

$$R_{PM,1} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_{PM} \cdot \left[\frac{2 \cdot (l_{PM} - \delta_{PM,1})}{S_{PM,ax,1}} + \frac{2 \cdot \tau_1}{S_{PM,tan,1}} \right] \quad (7.23)$$

Konstanta $\frac{\pi}{2}$ v rovnici (7.23) vychází ze sinusového průběhu vybudování vířivých proudů, kdy rozložení vířivých proudů je také sinusové, a tedy zdánlivý odpor vodivé dráhy vířivého proudu bude $\frac{\pi}{2}$ -krát větší.

Pólová rozteč první drážkové harmonické bude [14]:

$$\tau_1 = \frac{\tau_u}{2 \cdot 1} = \frac{15,71 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1} = 7,855 \text{ mm} \quad (7.24)$$

Ekvivalentní odpor permanentního magnetu bude [14]:

$$R_{PM,1} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_{PM} \cdot \left[\frac{2 \cdot (l_{PM} - \delta_{PM,1})}{S_{PM,ax,1}} + \frac{2 \cdot \tau_1}{S_{PM,tan,1}} \right] \quad (7.25)$$

$$R_{PM,1} = \frac{\pi}{2} \cdot 180 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\frac{2 \cdot (50 \cdot 10^{-3} - 32,078 \cdot 10^{-3})}{2,25248 \cdot 10^{-5}} + \frac{2 \cdot 7,855 \cdot 10^{-3}}{2,25248 \cdot 10^{-5}} \right] \quad (7.26)$$

$$R_{PM,1} = 6,4713 \text{ m}\Omega \quad (7.27)$$

Amplitudu napětí indukovaného v permanentním magnetu spočteme na základě magnetického toku a frekvence drážkové harmonické [14]:

$$U_{max,PM,1} = 2\pi \cdot f_{PM,1} \cdot \phi_{PM,1} = 2\pi \cdot 420 \cdot 5,18583 \cdot 10^{-6} = 13,6851 \text{ mV} \quad (7.28)$$

Efektivní hodnota indukovaného napětí v permanentním magnetu bude [14]:

$$U_{PM,1} = \frac{U_{max,PM,1}}{\sqrt{2}} = \frac{13,6851 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} = 9,6768 \text{ mV} \quad (7.29)$$

Efektivní hodnota vířivého proudu permanentním magnetem bude [14]:

$$I_{PM,1} = \frac{U_{PM,1}}{\sqrt{2} \cdot R_{PM,1}} = \frac{9,6768 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2} \cdot 6,4713 \cdot 10^{-3}} = 1,0574 \text{ A} \quad (7.30)$$

Odpor je v rovnici (7.30) násoben $\sqrt{2}$ z důvodu navýšení impedance permanentního magnetu reaktancí, což je uvažováno právě navýšením odporu permanentního magnetu $\sqrt{2}$ -krát [14].

Ztráty v jednom segmentu permanentních magnetů budou [14]:

$$P'_{PM,1} = U_{PM,1} \cdot I_{PM,1} \cdot \cos 45^\circ \quad (7.31)$$

$$P'_{PM,1} = 9,6768 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0574 \cdot \cos 45^\circ = 7,235 \text{ mW} \quad (7.32)$$

Vzájemný fázový posun mezi napětí a proudem 45° v rovnici (7.31), resp. (7.32) vyplývá z teorie lineární povrchové impedance [14].

Nyní spočítáme celkové ztráty v permanentních magnetech způsobené první drážkovou harmonickou magnetické indukce [14]:

$$P_{PM,1} = 2p \cdot N_{lam} \cdot P'_{PM,1} = 16 \cdot 6 \cdot 7,235 \cdot 10^{-3} = 0,695 \text{ W} \quad (7.33)$$

7.4. Ztráty způsobené druhou a vyššími drážkovými harmonickými magnetické indukce

Dále sestavíme výpočet pro **druhou a vyšší drážkové harmonické**. Vztahy budou nejprve uvedeny obecně, a poté bude uveden příklad výpočtu ztrát způsobených druhou drážkovou harmonickou magnetické indukce.

Magnetický tok do části magnetu, kterou prochází vířivý proud, je [14]:

$$\phi_{PM,k} = B_k \cdot \tau_k \cdot l_{PM} \quad (7.34)$$

Plocha segmentu magnetu v axiálním směru, přes kterou protéká vířivý proud, je stanovena [14]:

$$S_{PM,ax,k} = \frac{\tau_k}{2} \cdot \frac{\delta_{PM,k}}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot h_{PM}}{\delta_{PM,k}}} \right) \quad (7.35)$$

Vířivý proud opět nepoteče celou polovinou tangenciální plochy, nýbrž pouze její částí, která je přibližně shodná s axiální plochou, přes kterou teče vířivý proud [14]:

$$S_{PM,tan,k} \approx S_{PM,ax,k} \quad (7.36)$$

Ekvivalentní odpor permanentního magnetu spočteme takto [14]:

$$R_{PM,k} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_{PM} \cdot \left[\frac{2 \cdot (l_{PM} - \delta_{PM,k})}{S_{PM,ax,k}} + \frac{2 \cdot \tau_k}{S_{PM,tan,k}} \right] \quad (7.37)$$

Amplitudu napětí indukovaného v permanentním magnetu spočteme na základě magnetického toku a frekvence drážkové harmonické [14]:

$$U_{max,PM,k} = 2\pi \cdot f_{PM,k} \cdot \Phi_{PM,k} \quad (7.38)$$

Efektivní hodnota indukovaného napětí v permanentním magnetu bude [14]:

$$U_{PM,k} = \frac{U_{max,PM,k}}{\sqrt{2}} \quad (7.39)$$

Efektivní hodnota vířivého proudu permanentním magnetem bude [14]:

$$I_{PM,k} = \frac{U_{PM,k}}{\sqrt{2} \cdot R_{PM,k}} \quad (7.40)$$

Ztráty v jednom segmentu permanentních magnetů budou [14]:

$$P'_{PM,k} = U_{PM,k} \cdot I_{PM,k} \cdot \cos 45^\circ \quad (7.41)$$

Celkové ztráty v permanentních magnetech, způsobené k-tou drážkovou harmonickou magnetické indukce [14]:

$$P_{PM,k} = 2p \cdot \frac{W_{PM}}{\tau_k} \cdot P'_{PM,k} \quad (7.42)$$

Příklad výpočtu ztrát způsobených druhou drážkovou harmonickou:

$$f_{PM,2} = 2 \cdot Q_S \cdot \frac{n_n}{60} = 2 \cdot 72 \cdot \frac{350}{60} = 840 \text{ Hz} \quad (7.43)$$

$$\delta_{PM,2} = \sqrt{\frac{\rho_{PM}}{\pi \cdot f_{PM,2} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{r,PM}}} = \sqrt{\frac{180 \cdot 10^{-8}}{\pi \cdot 840 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,055}} \quad (7.44)$$

$$\delta_{PM,2} = 22,682 \text{ mm} \quad (7.45)$$

$$\tau_2 = \frac{\tau_u}{2 \cdot 2} = \frac{15,71 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} = 3,9275 \text{ mm} \quad (7.46)$$

$$\Phi_{PM,2} = B_2 \cdot \tau_2 \cdot l_{PM} = 0,029057 \cdot 3,9275 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \quad (7.47)$$

$$\phi_{PM,2} = 5,70607 \mu\text{Wb} \quad (7.48)$$

$$S_{PM,ax,2} = \frac{\tau_2}{2} \cdot \frac{\delta_{PM,2}}{2} \cdot \left(1 - e^{\frac{-2 \cdot h_{PM}}{\delta_{PM,2}}}\right) \quad (7.49)$$

$$S_{PM,ax,2} = \frac{3,9275 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{22,682 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left(1 - e^{\frac{-2 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{22,682 \cdot 10^{-3}}}\right) \quad (7.50)$$

$$S_{PM,ax,2} = 9,14972 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (7.51)$$

$$S_{PM,tan,2} \approx S_{PM,ax,2} = 9,14972 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (7.52)$$

$$R_{PM,2} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_{PM} \cdot \left[\frac{2 \cdot (l_{PM} - \delta_{PM,2})}{S_{PM,ax,2}} + \frac{2 \cdot \tau_2}{S_{PM,tan,2}} \right] \quad (7.53)$$

$$R_{PM,2} = \frac{\pi}{2} \cdot 180 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\frac{2 \cdot (50 \cdot 10^{-3} - 22,682 \cdot 10^{-3})}{9,14972 \cdot 10^{-6}} + \frac{2 \cdot 3,9275 \cdot 10^{-3}}{9,14972 \cdot 10^{-6}} \right] \quad (7.54)$$

$$R_{PM,2} = 19,3109 \text{ m}\Omega \quad (7.55)$$

$$U_{max,PM,2} = 2\pi \cdot f_{PM,2} \cdot \phi_{PM,2} \quad (7.56)$$

$$U_{max,PM,2} = 2\pi \cdot 840 \cdot 5,70607 \cdot 10^{-6} = 30,1159 \text{ mV} \quad (7.57)$$

$$U_{PM,2} = \frac{U_{max,PM,2}}{\sqrt{2}} = \frac{30,1159 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} = 21,2952 \text{ mV} \quad (7.58)$$

$$I_{PM,2} = \frac{U_{PM,2}}{\sqrt{2} \cdot R_{PM,2}} = \frac{21,2952 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2} \cdot 19,3109 \cdot 10^{-3}} = 0,7798 \text{ A} \quad (7.59)$$

$$P'_{PM,2} = U_{PM,2} \cdot I_{PM,2} \cdot \cos 45^\circ = 21,2952 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7798 \cdot \cos 45^\circ \quad (7.60)$$

$$P'_{PM,2} = 11,742 \text{ mW} \quad (7.61)$$

$$P_{PM,2} = 2p \cdot \frac{w_{PM}}{\tau_2} \cdot P'_{PM,2} = 16 \cdot \frac{54 \cdot 10^{-3}}{3,9275 \cdot 10^{-3}} \cdot 11,742 \cdot 10^{-3} \quad (7.62)$$

$$P_{PM,2} = 2,583 \text{ W} \quad (7.63)$$

7.5. Celkové ztráty v permanentních magnetech

Magnety ve stroji jsou segmentovány jak po obvodu rotoru, tak i ve směru jeho osy. Celkové ztráty v permanentních magnetech spočteme součtem dílčích ztrát způsobených jednotlivými drážkovými harmonickými, který navíc vynásobíme počtem řad magnetů v axiálním směru. Dle dokumentace stroje je počet řad magnetů v axiálním směru:

$$N_{ax} = 5 \quad (7.64)$$

Jak již bylo zmíněno, drážkové harmonické magnetické indukce většího řádu než sedm způsobují zanedbatelné ztráty (menší než 1 mW) a nebudou brány v úvahu. Ztráty způsobené jednotlivými harmonickými v segmentech magnetů po obvodu rotoru jsou uvedeny v **Tab. 7-2**.

Tab. 7-2: Ztráty způsobené jednotlivými drážkovými harmonickými magnetické indukce v segmentech magnetů po obvodu rotoru

Řád harmonické	Ztráty v segmentech magnetů po obvodu rotoru
1	0,695 W
2	2,583 W
3	1,025 W
4	0,269 W
5	0,032 W
6	0,000 W
7	0,002 W

Celkové ztráty v permanentních magnetech budou:

$$\Delta P_{PM} = N_{ax} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} P_{PM,k} \approx N_{ax} \cdot \sum_{k=1}^7 P_{PM,k} \quad (7.65)$$

$$\Delta P_{PM} = 5 \cdot (0,695 + 2,583 + 1,025 + 0,269 + 0,032 + 0,000 + 0,002) \quad (7.66)$$

$$\Delta P_{PM} = 23 \text{ W} \quad (7.67)$$

Dle softwaru Maxwell 2D jsou ztráty v permanentních magnetech 27,5 W. Hodnota ztrát v permanentních magnetech 23 W stanovená analytickým výpočtem je značně přesná.

Přesnost analytického výpočtu je dána především díky přesnému průběhu magnetické indukce na povrchu magnetu získaného pomocí programu FEMM. Při stanovení průběhu magnetické indukce na povrchu magnetů analytickým postupem využívajícím Carterovu teorii uvedeným ve zdroji [14] bylo zjištěno, že výpočet ztrát z takto získané magnetické indukce je nepřesný. Proto byla magnetická indukce na povrchu magnetu vypočítána programem FEMM.

8. ZÁVĚR

Diplomová práce si kladla za cíl sestavení a provedení analytického výpočtu synchronního stroje s permanentními magnety, provedení jeho výpočtu v Ansys RMxprt, vytvoření modelu stroje a provedení výpočtu v Ansys Maxwell 2D, provedení měření reálného stroje, vyhodnocení přesností zmíněných výpočtů a provedení úpravy v analytickém výpočtu pro snížení jeho chyby. Všechny tyto cíle byly dosaženy.

Nahrazování hodnot získaných analytickým výpočtem stroje bylo až na výjimky možné. Vlastnosti a parametry stroje získané analytickým výpočtem by se měly dostatečně přesně shodovat s referenčním strojem.

Jednou z nepřesností v analytickém výpočtu by mohlo být použití vzorce (3.12). Délka vzduchové mezery byla převzata z dokumentace referenčního stroje, ale pro její návrh pro nový stroj by mohlo být vhodnější dohledat jiný způsob výpočtu.

Výpočet konkrétního stroje dokázal, že „univerzální“ vzorec (3.27) pro výpočet činitele vinutí není zcela přesný při aplikaci na konkrétní vinutí v navrhovaném stroji. Bylo nutné nejprve na základě způsobu vinutí ve stroji stanovit činitele rozlohy a činitele zkrácení kroku, ze kterých byl následně určen činitel vinutí, jehož hodnota byla korektní. Pokud by bylo nutné počítat činitel vinutí pro jiný stroj, volili bychom „ruční“ výpočet určením činitele rozlohy a činitele kroku, popř. činitele natočení drážek, ze kterých by byl stanoven činitel vinutí.

Stanovená výška j_{ha} rotoru je ve výpočtu jiná, než je výška j_{ha} rotoru referenčního stroje. Zde by bylo nutné převzít výšku j_{ha} rotoru z referenčního stroje, pokud by neměly být provedeny mechanické výpočty. Jho rotoru musí být dostatečně odolné z mechanického hlediska vlivem silového působení při otáčení rotoru a v této práci nebylo z mechanického hlediska optimalizováno. Přebráním hodnoty výšky j_{ha} rotoru z dokumentace referenčního stroje by bylo možné zvýšit přesnost výpočtu magnetického obvodu stroje.

Během výpočtu byla využita dokumentace permanentních magnetů NdFeB jakosti 40 SH od jiného výrobce, než je výrobce permanentních magnetů v referenčním stroji. Vzhledem ke skutečnosti, že magnety jsou standardizované, by měla být chyba takto zavedená do výpočtu zanedbatelná. Pro zaručení přesnosti výpočtů využívajících demagnetizační B-H křivku permanentního magnetu by bylo nutné použít dokumentaci od výrobce permanentních magnetů v referenčním stroji.

Přetížitelnost stroje s původní výškou permanentních magnetů 2,2 mm byla menší než jedna. Z tohoto důvodu byla převzata výška permanentních magnetů 6 mm z dokumentace referenčního stroje. Přetížitelnost stroje poté vyšla 2,517. Při výšce permanentních magnetů 6 mm a bez úpravy vinutí pracuje stroj v přebuzeném stavu.

Výpočet celkových mechanických ztrát ve stroji nebyl proveden a tyto ztráty byly převzaty z jeho dokumentace. Vypočtené ztráty v permanentních magnetech se neshodují s dokumentací referenčního stroje, přičemž ale neznáme způsob stanovení její hodnoty. Za přesnou hodnotu byla považována hodnota spočtená programem Ansys Maxwell 2D. Po využití jiného postupu výpočtu ztrát v permanentních magnetech byla shoda analytického výpočtu s výpočtem v Ansys Maxwell 2D velmi solidní, uvážíme-li samotnou problematiku analytického výpočtu ztrát v permanentních magnetech. Pro zajištění přesnosti analytického výpočtu ztrát v permanentních magnetech bylo nutné stanovit přesný průběh magnetické indukce na povrchu magnetů, což bylo provedeno programem FEMM.

Zátěžný úhel stroje vychází ve výpočtu v Ansys RMxprt téměř shodně s analytickým výpočtem. Magnetizační indukčnosti vychází v Ansys RMxprt relativně shodně s analytickým výpočtem (odchylka činí 1,67 %). U rozptylových indukčností jsou rozdíly významnější. Rozdíl hodnot rozptylových indukčností v analytickém výpočtu a ve výpočtu v Ansys RMxprt společně s mírným rozdílem v magnetizačních indukčnostech zavádí do synchronní indukčnosti (resp. indukčností v osách d a q) rozdíl zhruba 0,5 mH, tedy odchylka je 8,28 %. Tato odchylka se může zdát významná, ale analytický výpočet používal pro stanovení indukčností ve stroji empiricky stanovené korekční činitele, tedy v zásadě není nepřesný. Hodnoty synchronní a magnetizační indukčnosti získané výpočtem a softwarem Ansys RMxprt se tedy dají považovat za přibližně shodné. Odchylka hodnot indukčností je mírně vyšší mezi analytickým výpočtem a softwarem Ansys Maxwell 2D (odchylka činí 8,91 % v d ose a 10,44 % v q ose).

Měřením bylo zjištěno, že přesnost analytického výpočtu odporu vinutí i výpočtu tohoto odporu v Ansys RMxprt je vysoká. Ansys Maxwell 2D převzal hodnotu odporu vinutí z RMxprtu.

Měřením bylo stanoveno, že se ve výpočtech indukčností nachází významná chyba způsobující jejich nepřesnost, ale nepodařilo se ji identifikovat. Hodnota indukčnosti získaná z měření stroje (8,581 mH) je významně vyšší, než jsou hodnoty získané výpočty (analytický výpočet stanovil 5,711 mH, RMxprt 5,238 mH a Maxwell 5,193 mH v d ose a 5,106 mH v q

ose). Hodnotu získanou z měření nebylo možné podložit měřením pomocí frekvenčního měniče, neboť měnič při každém měření zobrazil jinou hodnotu indukčnosti v osách d a q , a to ve velmi rozsáhlém intervalu – přibližně 1,5 až 7,5 mH. Dokumentace stroje udává indukčnost vinutí 8,5 mH, tedy měření na stroji nebylo nepřesné (hodnota v dokumentaci je zaokrouhlená). Ve všech výpočtech není s největší pravděpodobností uvažován některý z vlivů působících v reálném stroji.

Z důvodů popsaných v podkapitole 6.2 nebylo možné naměřit motor ve jmenovitém pracovním bodě a nemohlo být tedy provedeno komplexní vyhodnocení přesnosti výpočtů. Výpočet byl alespoň částečně vyhodnocen výběrem jiného pracovního bodu ($M = 500 \text{ Nm}$, $n = 300 \text{ min}^{-1}$). Pro tento bod byl sestrojen fázorový diagram a bylo provedeno vyhodnocení vypočítaného odporu vinutí a indukčností. Dále byl stroj přepočítán na zvolený pracovní bod z měření v Ansys RMXprt a Ansys Maxwell 2D a bylo provedeno vyhodnocení přesnosti těchto výpočtů. V podkapitole 6.4 bylo popsáno, že model v Ansys Maxwell 2D dosahuje lepší přesnosti než výpočet v Ansys RMXprt za předpokladu, že k celkovým ztrátám stanoveným v Maxwellu připočteme známé mechanické ztráty (byly přepočítány v RMXprt na otáčky ve zvoleném pracovním bodě). Dodatečným řešením nemožnosti měření jmenovitého pracovního bodu by bylo buďto zjištění přesné příčiny nesprávného chodu motoru, což se během psaní této práce nezdařilo, nebo opětovné provedení výpočtů v kapitole 3 pro zvolený pracovní bod z měření.

Je nutné opět zmínit, že měnič má vlastní algoritmus, který používá pro bezsensorové řízení stroje. Na svorkách stroje bylo při měření vyšší napětí než jmenovité a měnič motor odbuzoval. Z tohoto hlediska nemusí vytvořené modely zachycovat reálné poměry ve stroji. Bylo však vyhodnoceno, že model stroje a jeho výpočet v Ansys Maxwell 2D je i přes zmíněnou skutečnost dostatečně přesný, zejména z hlediska ztrát. Nepřesnosti výpočtu byly identifikovány u statorového proudu a zejména u indukčností, kde je nepřesnost značná. Model v Ansys RMXprt má dostatečnou přesnost pro orientační výpočty, neboť je méně přesný oproti Ansys Maxwell 2D.

LITERATURA A DALŠÍ ZDROJE

- [1] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje*. Elektronická skripta FEKT VUT v Brně. Brno: FEKT VUT v Brně.
- [2] ŠATAVA, Patrik. *Řízení otáček pohonu se synchronním motorem*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119652>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Čestmír Ondrůšek.
- [3] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2nd edition. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 978-1118581575.
- [4] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of Rotating Electrical Machines: Three-phase permanent magnet motor with rotor surface magnets, a two-layer integral slot winding and open-circuit cooling. In: *Wiley Higher Education Supplementary Website* [online]. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2008 [cit. 2020-10-20]. Dostupné z: https://www.wiley.com/legacy/wileychi/pyrhonen_rotating/
- [5] Podklady pro diplomovou práci od firmy EXMONT-Energo a.s.
- [6] Cooling methods for motors. In: *Winkelmann* [online]. Uelzen: Winkelmann Elektromotoren, 2018 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://www.w-winkelmann.com/downloads/>
- [7] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje*. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [8] Typical data for SURA® M400-50A. In: *Cogent Power - Part of the Tata Steel Group* [online]. Surahammar: Surahammars Bruks AB, 2009 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m400-50a.pdf>
- [9] Neodymium Iron Boron Magnet Catalog. In: *Arnold Magnetic Technologies | Global Magnet Manufacturer* [online]. Rochester (NY, USA): Arnold Magnetic Technologies, 2019 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2019/06/Arnold-Neo-Catalog.pdf>

- [10] VÍTEK, Ondřej. *Výpočet magnetického obvodu BLDC motoru s permanentními magnety: Studijní podklady k vyučovanému předmětu Elektrické stroje 2. Příklady: BLDC motor s PM*. Rev. 2014. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2012, 17 s.
- [11] HELLER, Bedřich a Václav HAMATA. *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [12] ANSYS. *Ansys Electronics Desktop*. RMXprt [software]. Canonsburg: Ansys, 2020 [cit. 2020-12-06]. Ed. 2020 R1. Dostupné z: <https://www.ansys.com>
- [13] ANSYS. *Ansys Electronics Desktop*. Maxwell 2D [software]. Canonsburg: Ansys, 2021 [cit. 2021-03-15]. Ed. 2021 R1. Dostupné z: <https://www.ansys.com>
- [14] PYRHÖNEN, Juha, Hanne JUSSILA, Yuliya ALEXANDROVA, Pavol RAFAJDUS a Janne NERG. Harmonic Loss Calculation in Rotor Surface Permanent Magnets—New Analytic Approach. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2012, 48(8), 2358-2366 [cit. 2021-5-7]. ISSN 0018-9464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2012.2190518
- [15] MEEKER, David. *Finite Element Method Magnetics*. FEMM 4.2 [software]. 21. dubna 2019 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.femm.info/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Vysvětlivka
40 SH	jakost permanentních magnetů NdFeB
d	podélná (osa) (<i>direct axis</i>)
M400-50A	jakost ocelových plechů
MKP	metoda konečných prvků
NdFeB	neodym-železo-bor
PMSM	synchronní motor s permanentními magnety (<i>permanent magnet synchronous motor</i>)
q	příčná (osa) (<i>quadrature axis</i>)
PZK 40 SH	označení (výrobce a jakost) permanentních magnetů NdFeB
SmCo	samarium-kobalt

Symbol	Vysvětlivka	Jednotka
$2p$	počet pólů	(-)
A	lineární proudová hustota	(A/m)
a	počet paralelních větví	(-)
a_{1k}	činitel daný rovnicí (7.2)	(-)
B	magnetická indukce	(T)
B_0	polovina rozdílu maximální a minimální hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře	(T)
B_1	velikost první harmonické magnetické indukce	(T)
B_{1max}	maximální hodnota magnetické indukce sinusového průběhu	(T)
B_2	velikost druhé harmonické magnetické indukce	(T)
B_{av}	střední hodnota magnetické indukce	(T)
B_d	magnetická indukce v zubu statoru	(T)
B_{dk}	magnetická indukce v konci zubu statoru	(T)
B_{dapp}	zdánlivá magnetická indukce v zubu statoru	(T)

B_{jR}	magnetická indukce ve jhu rotoru	(T)
B_{jS}	magnetická indukce ve jhu statoru	(T)
B_k	velikost k-té harmonické magnetické indukce	(T)
B_{max}	maximální hodnota magnetické indukce obdélníkového průběhu, magnetická indukce ve vzduchové mezeře	(T)
B_{min}	minimální přípustná magnetická indukce	(T)
B_{PM}	magnetická indukce permanentního magnetu	(T)
$B_{PM,min}$	minimální přípustná magnetická indukce permanentního magnetu	(T)
B_r	remanentní magnetická indukce permanentního magnetu	(T)
$B_{\delta,min}$	minimální přípustná magnetická indukce ve vzduchové mezeře	(T)
\widehat{B}_{δ}	maximální hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře	(T)
b'_1	fiktivní rozměr daný rovnicí (7.3)	(m)
b_1	šířka otevření statorové drážky	(m)
b_4	šířka statorové drážky dle Obr. 3-4	(m)
b_{4c}	rozměr statorové drážky dle Obr. 3-4	(m)
b_5	šířka statorové drážky dle Obr. 3-4	(m)
b_{5c}	rozměr statorové drážky dle Obr. 3-4	(m)
b_d	šířka zubu statoru	(m)
b_v	šířka ventilačních kanálů	(m)
c_R	přepočítávací koeficient respektující nelinearitu intenzity magnetického pole v závislosti na magnetické indukci pro výpočet magnetického napětí ve jhu rotoru	(-)
c_S	přepočítávací koeficient respektující nelinearitu intenzity magnetického pole v závislosti na magnetické indukci pro výpočet magnetického napětí ve jhu statoru	(-)
D_{jR}	střední průměr jha rotoru	(m)
D_{jS}	střední průměr jha statoru	(m)

D_r	vnější průměr rotoru	(m)
D_{RI}	vnitřní průměr rotoru	(m)
D_S	vnitřní průměr statoru	(m)
D_{SO}	vnější průměr statoru	(m)
f	napájecí frekvence	(Hz)
f_1	(synchronní) napájecí frekvence	(Hz)
$f_{PM,1}$	frekvence první harmonické magnetické indukce vznikající v permanentním magnetu	(Hz)
$f_{PM,2}$	frekvence druhé harmonické magnetické indukce vznikající v permanentním magnetu	(Hz)
$f_{PM,k}$	frekvence harmonické magnetické indukce k-tého řádu vznikající v permanentním magnetu	(Hz)
H	intenzita magnetického pole	(A/m)
H_d	intenzita magnetického pole v zubu statoru	(A/m)
H_{jR}	intenzita magnetického pole ve jhu rotoru	(A/m)
H_{jS}	intenzita magnetického pole ve jhu statoru	(A/m)
H_{PM}	intenzita magnetického pole v permanentním magnetu	(A/m)
H'_C	fiktivní koercitivní síla permanentního magnetu	(A/m)
h'	tloušťka mezifázové izolace statorové drážky	(m)
h_1	výška otevření statorové drážky	(m)
h_2	výška závěru statorové drážky	(m)
h_3	rozměr statorové drážky dle Obr. 3-4	(m)
h_4	rozměr statorové drážky dle Obr. 3-4	(m)
h_5	rozměr statorové drážky dle Obr. 3-4	(m)
h_6	tloušťka drážkové izolace statorové drážky	(m)
h_{jR}	výška jha statoru	(m)
h_{jS}	výška jha statoru	(m)
h_{PM}	výška permanentních magnetů	(m)
I_d	proud v ose d	(A)
I_{ef}	efektivní hodnota proudu fáze vinutí	(A)

I_k	statorový proud při přetížení	(A)
I_n	jmenovitý statorový proud	(A)
$I_{PM,1}$	efektivní hodnota vířivého proudu permanentním magnetem indukovaného první harmonickou magnetické indukce	(A)
$I_{PM,2}$	efektivní hodnota vířivého proudu permanentním magnetem indukovaného druhou harmonickou magnetické indukce	(A)
$I_{PM,k}$	efektivní hodnota vířivého proudu permanentním magnetem indukovaného k-tou harmonickou magnetické indukce	(A)
I_q	proud v ose q	(A)
I_S	statorový proud	(A)
$I_{S,0}$	statorový proud naprázdno	(A)
\bar{I}_1	fázor proudu kotvy	(A)
i_U	okamžitý proud fáze U	(A)
i_V	okamžitý proud fáze V	(A)
i_W	okamžitý proud fáze W	(A)
J_S	proudová hustota ve vodiči ve statorové drážce	(A/m ²)
j	imaginární jednotka	
k	řád harmonické	(-)
k_1	koeficient daný rovnicí (3.231)	(-)
k_2	koeficient daný rovnicí (3.232)	(-)
k_C	Carterův činitel	(-)
$k_{Fe,d}$	korekční součinitel pro zuby statoru	(-)
$k_{Fe,jS}$	korekční součinitel pro jho statoru	(-)
k_{pCu}	činitel plnění mědi	(-)
k_{pFe}	činitel plnění železa	(-)
k_r	činitel rozlohy	(-)
k_{v1}	činitel vinutí pro první harmonickou	(-)
k_{vv}	činitel vinutí pro v-tou harmonickou	(-)
k_y	činitel zkrácení kroku	(-)

k_p	experimentální činitel	(-)
L_d	indukčnost v ose d	(H)
L_{md}	magnetizační indukčnost v ose d	(H)
L_{mq}	magnetizační indukčnost v ose q	(H)
L_q	indukčnost v ose q	(H)
$L_{S\sigma}$	celková rozptylová indukčnost	(H)
$L_{\sigma d}$	rozptylová indukčnost cípu statorového zubu (část zubu v blízkosti krčku drážky)	(H)
$L_{\sigma u}$	rozptylová indukčnost statorové drážky	(H)
$L_{\sigma w}$	rozptylová indukčnost vodičů čela cívky	(H)
$L_{\sigma\delta}$	rozptylová indukčnost vzduchové mezery	(H)
l	fyzická délka rotorového svazku	(m)
l'	ekvivalentní délka rotorového svazku	(m)
l_{PM}	délka jednoho segmentu magnetů	(m)
l_{av}	průměrná délka vodiče statorového vinutí	(m)
l_{ew}	axiální délka vodiče čela cívky vinutí	(m)
l_w	průměrná délka vodiče čela cívky vinutí	(m)
M	moment	(Nm)
M_{max}	maximální moment stroje	(Nm)
m	počet fází	(-)
m_1	počet fází	(-)
m_A	počet současně aktivních fází	(-)
m_{celk}	celková hmotnost železa, mědi a permanentních magnetů ve stroji	(kg)
m_{Cu}	hmotnost mědi statorového vinutí	(kg)
m_d	hmotnost zubů statoru	(kg)
m_{dk}	hmotnost konců zubů statoru	(kg)
m_{jR}	hmotnost jha rotoru	(kg)
m_{jS}	hmotnost jha statoru	(kg)
m_{PM}	hmotnost permanentních magnetů	(kg)
m_S	hmotnost statorového svazku	(kg)

m'_d	redukována hmotnost statorových zubů pro výpočet ztrát	(kg)
N	počet závitů fáze v sérii	(-)
N_{ax}	počet řad magnetů v axiálním směru	(-)
N_{ds}	počet vodičů ve statorové drážce	(-)
N_{lam}	počet segmentů magnetů podél jednoho pólu stroje	(-)
N_{vrstva}	počet vodičů v jedné vrstvě statorové drážky	(-)
n_1	synchronní otáčky	(min ⁻¹)
n_n	jmenovité otáčky	(min ⁻¹)
n_v	počet ventilačních kanálů	(-)
P	výkon	(W)
$P'_{PM,1}$	ztráty v jednom segmentu permanentních magnetů způsobené první harmonickou magnetické indukce	(W)
$P'_{PM,2}$	ztráty v jednom segmentu permanentních magnetů způsobené druhou harmonickou magnetické indukce	(W)
$P'_{PM,k}$	ztráty v jednom segmentu permanentních magnetů způsobené k-tou harmonickou magnetické indukce	(W)
P_1	příkon stroje	(W)
P_1	příkon stroje naprázdno	(W)
$P_{PM,1}$	ztráty v permanentních magnetech způsobené první harmonickou magnetické indukce	(W)
$P_{PM,2}$	ztráty v permanentních magnetech způsobené druhou harmonickou magnetické indukce	(W)
$P_{PM,k}$	ztráty v permanentních magnetech způsobené k-tou harmonickou magnetické indukce	(W)
P_{max}	maximální výstupní výkon	(W)
P_n	jmenovitý výkon	(W)
p	počet pólových dvojic	(-)
Q_s	počet statorových drážek	(-)
q	počet drážek na pól a fázi	(-)
R	odpor jedné fáze statorového vinutí	(Ω)

R_1	odpor jedné fáze vinutí	(Ω)
$R_{PM,1}$	ekvivalentní odpor permanentního magnetu pro vířivý proud indukovaný první harmonickou magnetické indukce	(Ω)
$R_{PM,2}$	ekvivalentní odpor permanentního magnetu pro vířivý proud indukovaný druhou harmonickou magnetické indukce	(Ω)
$R_{PM,k}$	ekvivalentní odpor permanentního magnetu pro vířivý proud indukovaný k-tou harmonickou magnetické indukce	(Ω)
S_{Cu}	celkový průřez čisté mědi ve statorové drážce	(m^2)
$S_{PM,ax,1}$	plocha magnetů v axiálním směru, přes kterou protéká vířivý proud indukovaný první harmonickou magnetické indukce	(m^2)
$S_{PM,ax,2}$	plocha magnetů v axiálním směru, přes kterou protéká vířivý proud indukovaný druhou harmonickou magnetické indukce	(m^2)
$S_{PM,ax,k}$	plocha magnetů v axiálním směru, přes kterou protéká vířivý proud indukovaný k-tou harmonickou magnetické indukce	(m^2)
$S_{PM,tan,1}$	plocha magnetů v tangenciálním směru, přes kterou protéká vířivý proud indukovaný první harmonickou magnetické indukce	(m^2)
$S_{PM,tan,2}$	plocha magnetů v tangenciálním směru, přes kterou protéká vířivý proud indukovaný druhou harmonickou magnetické indukce	(m^2)
$S_{PM,tan,k}$	plocha magnetů v tangenciálním směru, přes kterou protéká vířivý proud indukovaný k-tou harmonickou magnetické indukce	(m^2)
S_d	průřez statorového zubu	(m^2)
S_{dS}	průřez statorové drážky	(m^2)
S_{js}	průřez jha statoru	(m^2)
S_u	plocha, přes kterou proudí část zdánlivého magnetického toku zubu statoru, která prochází vně zubu	(m^2)

S_v	průřez čisté mědi jednoho vodiče ve statorové drážce	(m ²)
S_{vi}	průřez jednoho vodiče ve statorové drážce včetně izolace	(m ²)
U_1	velikost napětí na svorkách stroje	(V)
U_{1f}	velikost fázového napětí na vinutí	(V)
U_C	velikost indukovaného napětí v cívce	(V)
U_{C1}	velikost indukovaného napětí v první cívce	(V)
U_{C2}	velikost indukovaného napětí ve druhé cívce	(V)
U_{C3}	velikost indukovaného napětí ve třetí cívce	(V)
$U_{m,celk}$	celkové magnetické napětí	(A)
$U_{m,d}$	magnetické napětí na zubu statoru	(A)
$U_{m,jR}$	magnetické napětí na jhu rotoru	(A)
$U_{m,jS}$	magnetické napětí na jhu statoru	(A)
$U_{m,PM}$	úbytek magnetického napětí na permanentním magnetu	(A)
$U_{m,reakce}$	reakce kotvy	(A)
$U_{m,\delta e}$	magnetické napětí na vzduchové mezeře	(A)
$U_{max,PM,1}$	amplituda napětí indukovaného v permanentním magnetu první harmonickou magnetické indukce	(V)
$U_{max,PM,2}$	amplituda napětí indukovaného v permanentním magnetu druhou harmonickou magnetické indukce	(V)
$U_{max,PM,k}$	amplituda napětí indukovaného v permanentním magnetu k-tou harmonickou magnetické indukce	(V)
U_n	jmenovité napětí	(V)
$U_{n,f}$	jmenovité napětí fázové	(V)
U_{PM}	napětí indukované permanentním magnetem	(V)
$U_{PM,1}$	efektivní hodnota napětí indukovaného v permanentním magnetu první harmonickou magnetické indukce	(V)
$U_{PM,2}$	efektivní hodnota napětí indukovaného v permanentním magnetu druhou harmonickou magnetické indukce	(V)

$U_{PM,k}$	efektivní hodnota napětí indukovaného v permanentním magnetu k-tou harmonickou magnetické indukce	(V)
$U_{PM,max,S}$	maximální napětí indukované permanentním magnetem (sdružená hodnota)	(V)
\overline{U}_0	fázor vnitřního indukovaného napětí naprázdno	(V)
\overline{U}_1	fázor napětí na svorkách stroje	(V)
\overline{U}_{1f}	fázor efektivního napětí na svorkách stroje	(V)
\overline{U}_{C1}	fázor indukovaného napětí v první cívce	(V)
\overline{U}_{C2}	fázor indukovaného napětí ve druhé cívce	(V)
\overline{U}_{C3}	fázor indukovaného napětí ve třetí cívce	(V)
\hat{U}_l	fázor vnitřního indukovaného napětí	(V)
u	veličina daná rovnicí (3.320)	(-)
V_d	objem statorových zubů	(m ³)
V_{dS}	objem statorových drážek	(m ³)
V_{jR}	objem jha rotoru	(m ³)
V_{jS}	objem jha statoru	(m ³)
V_S	objem statorového svazku	(m ³)
v_r	obvodová rychlost rotoru	(m/s)
W_{ew}	rozteč vodiče cívky	(m)
w_{PM}	šířka permanentních magnetů	(m)
X_d	reaktance v ose d	(Ω)
X_h	hlavní reaktance	(Ω)
X_q	reaktance v ose q	(Ω)
X_r	rozptylová reaktance	(Ω)
X_S	synchronní reaktance	(Ω)
$X_{\sigma d}$	rozptylová reaktance cípu statorového zubu (část zubu v blízkosti krčku drážky)	(Ω)
$X_{\sigma u}$	rozptylová reaktance statorové drážky	(Ω)
$X_{\sigma w}$	rozptylová reaktance vodičů čela cívky vinutí	(Ω)

$X_{\sigma\delta}$	rozptylová reaktance vzduchové mezery	(Ω)
y	krok cívk	(-)
α	elektrický úhel polohy ve vzduchové mezeře; úhel polohy pod zubem (dle Obr. 7-1)	(rad), ($^\circ$)
α'	převrácená hodnota hloubky vniku elektromagnetického pole	(m^{-1})
α_{Cu}	teplotní součinitel odporu mědi	(K^{-1})
α_{PM}	pólové krytí	(-)
β	zátěžný úhel; poměr poloviny rozdílu maximální a minimální hodnoty magnetické indukce ku maximální hodnotě	(rad), ($^\circ$) (-)
$\beta_{cívky,el}$	elektrický úhel mezi cívkami statoru	(rad), ($^\circ$)
$\beta_{ds,el}$	elektrický úhel mezi drážkami statoru	(rad), ($^\circ$)
$\beta_{ds,mech}$	mechanický úhel mezi drážkami statoru	(rad), ($^\circ$)
β_u	koeficient daný rovnicí (3.319)	(-)
ΔP	celkové ztráty ve stroji	(W)
ΔP_{Cu}	ztráty v mědi statorového vinutí	(W)
ΔP_d	dodatečné ztráty	(W)
ΔP_{Fe}	celkové ztráty v železe	(W)
$\Delta P_{Fe,d1}$	ztráty v zubech statoru (mimo jejich konců)	(W)
$\Delta P_{Fe,d2}$	ztráty v koncích zubů statoru	(W)
$\Delta P_{Fe,jS}$	ztráty ve jhu statoru	(W)
ΔP_{mech}	celkové mechanické ztráty	(W)
$\Delta P_{mech,vent}$	ventilační ztráty	(W)
ΔP_{PM}	ztráty v permanentních magnetech	(W)
$\Delta p_{Fe,08}$	měrné ztráty v železe při magnetické indukci 0,8 T a frekvenci 50 Hz	(W/kg)
$\Delta p_{Fe,14}$	měrné ztráty v železe při magnetické indukci 1,4 T a frekvenci 50 Hz	(W/kg)
$\Delta p_{Fe,16}$	měrné ztráty v železe při magnetické indukci 1,6 T a frekvenci 50 Hz	(W/kg)
δ	délka vzduchové mezery	(m)

δ_e	ekvivalentní délka vzduchové mezery	(m)
δ_{ef}	efektivní délka vzduchové mezery	(m)
$\delta_{PM,1}$	hloubka vniku elektromagnetického pole první harmonické magnetické indukce do permanentního magnetu	(m)
$\delta_{PM,2}$	hloubka vniku elektromagnetického pole druhé harmonické magnetické indukce do permanentního magnetu	(m)
$\delta_{PM,k}$	hloubka vniku elektromagnetického pole k-té harmonické magnetické indukce do permanentního magnetu	(m)
δ_{PMe}	ekvivalentní délka vzduchové mezery s uvažováním permanentního magnetu	(m)
δ_v	hloubka vniku elektromagnetického pole	(m)
ε	činitel zkrácení kroku	(-)
ε_{sp}	rozdíl mezi pólovou roztečí a krokem cívký	(-)
ζ	fázový posun mezi pracovními harmonickými lineární proudové hustoty a magnetické indukce	(rad), (°)
η	účinnost	(-), (%)
η_n	jmenovitá účinnost	(-), (%)
ϑ	provozní teplota stroje	(°C)
κ	činitel pro redukci otevření drážky	(-)
λ	účinník	(-)
λ_{ew}	činitel propustnosti axiální části vodiče čela cívký	(-)
λ_d	činitel propustnosti cípu statorového zubu (část zubu v blízkosti krčku drážky)	(-)
λ_u	činitel propustnosti statorové drážky	(-)
λ_w	činitel propustnosti čela vodiče cívký	(-)
λ_{wew}	činitel propustnosti vodiče rozteče čela cívký	(-)
μ_0	permeabilita vakua	(H/m)
$\mu_{r,PM}$	relativní permeabilita permanentního magnetu	(H/m)
ν	řád harmonické	(-)

$\rho_{Cu,100^{\circ}C}$	rezistivita mědi při teplotě 100 °C	(Ωm)
$\rho_{Cu,20^{\circ}C}$	rezistivita mědi při teplotě 20 °C	(Ωm)
$\rho_{Cu,\vartheta}$	rezistivita mědi při teplotě ϑ	(Ωm)
ρ_{Fe}	hustota železa	(kg/m^3)
ρ_{PM}	hustota permanentního magnetu; rezistivita permanentního magnetu	(kg/m^3) (Ωm)
σ_{Ftan}	tangenciální napětí ve vzduchové mezeře	(Pa)
σ_{PM}	elektrická konduktivita permanentního magnetu	(S/m)
σ_{δ}	činitel rozptylu	(-)
τ_1	pólová rozteč první harmonické magnetické indukce	(m)
τ_2	pólová rozteč druhé harmonické magnetické indukce	(m)
τ_{jR}	pólová rozteč ve středu jha rotoru	(-), (m)
τ_{jS}	pólová rozteč ve středu jha statoru	(-), (m)
τ_k	pólová rozteč k-té harmonické magnetické indukce	(m)
τ_p	pólová rozteč	(-), (m)
$\tau_{p,m}$	pólová rozteč vyjádřená v metrech	(m)
τ_u	drážková rozteč	(-), (m)
$\phi_{PM,1}$	magnetický tok od první harmonické magnetické indukce, vnikající do části magnetu, kterou protéká vířivý proud	(Wb)
$\phi_{PM,2}$	magnetický tok od druhé harmonické magnetické indukce, vnikající do části magnetu, kterou protéká vířivý proud	(Wb)
$\phi_{PM,k}$	magnetický tok od k-té harmonické magnetické indukce, vnikající do části magnetu, kterou protéká vířivý proud	(Wb)
ϕ_m	magnetický tok procházející vzduchovou mezerou	(Wb)
φ	fázový posun mezi svorkovým napětím a proudem	(rad), ($^{\circ}$)
φ_F	okamžitý elektrický úhel fáze V	(rad), ($^{\circ}$)
φ_n	jmenovitý fázový posun mezi svorkovým napětím a proudem	(rad), ($^{\circ}$)

χ	štíhlostní poměr	(-)
ω	úhlová rychlost	(rad/s), (s ⁻¹)
ω_1	synchronní úhlová rychlost	(rad/s), (s ⁻¹)
ω_n	jmenovitá synchronní úhlová rychlost	(rad/s), (s ⁻¹)

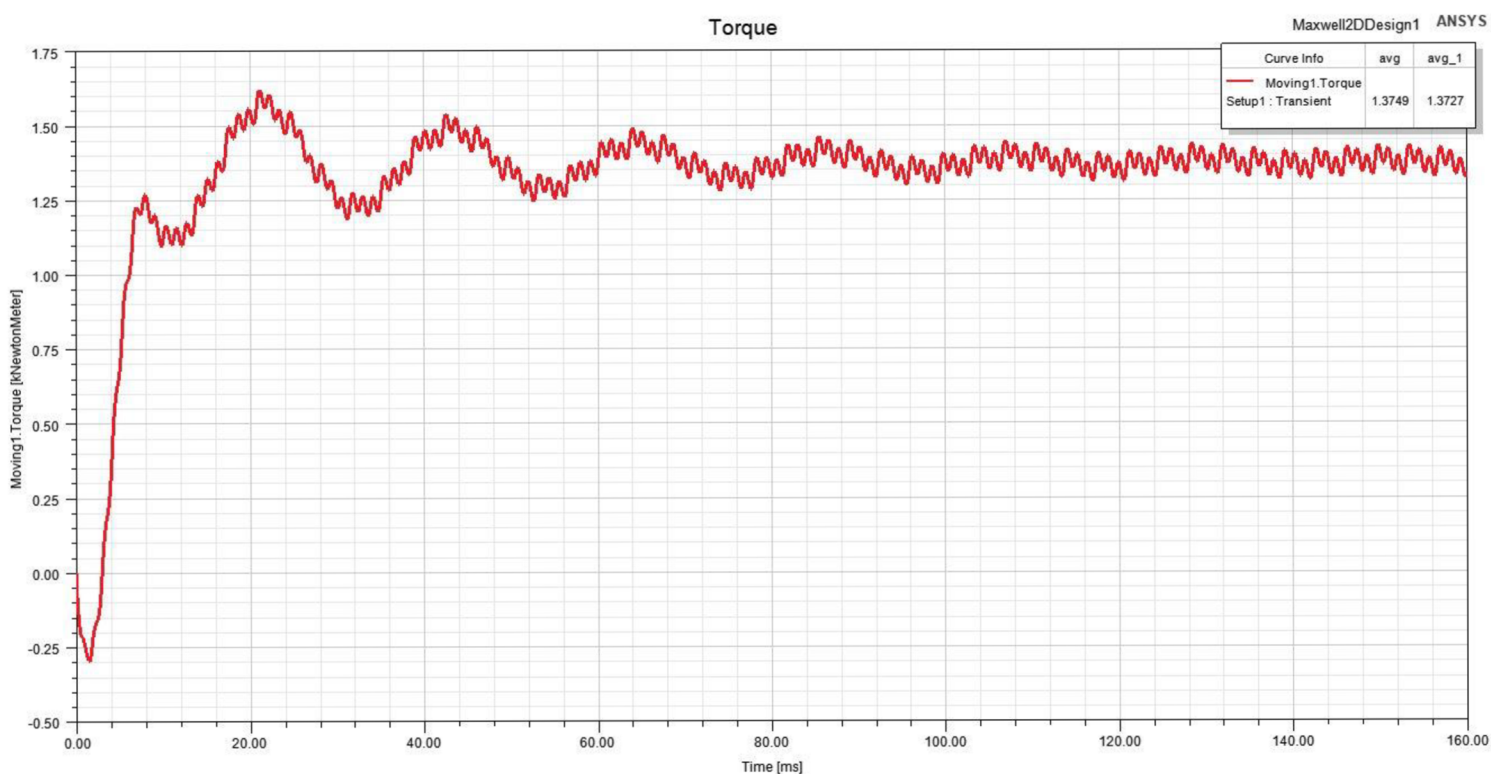
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Grafy časových průběhů veličin z Ansys Maxwell 2D (jmenovitý pracovní bod)	131
Příloha B – Průběhy indukovaných napětí naměřené osciloskopem	135
Příloha C – Přehled vypočtených parametrů stroje	139
Příloha D – Grafy časových průběhů veličin z Ansys Maxwell 2D (pracovní bod $M = 500 \text{ Nm}$, $n = 300 \text{ min}^{-1}$)	145

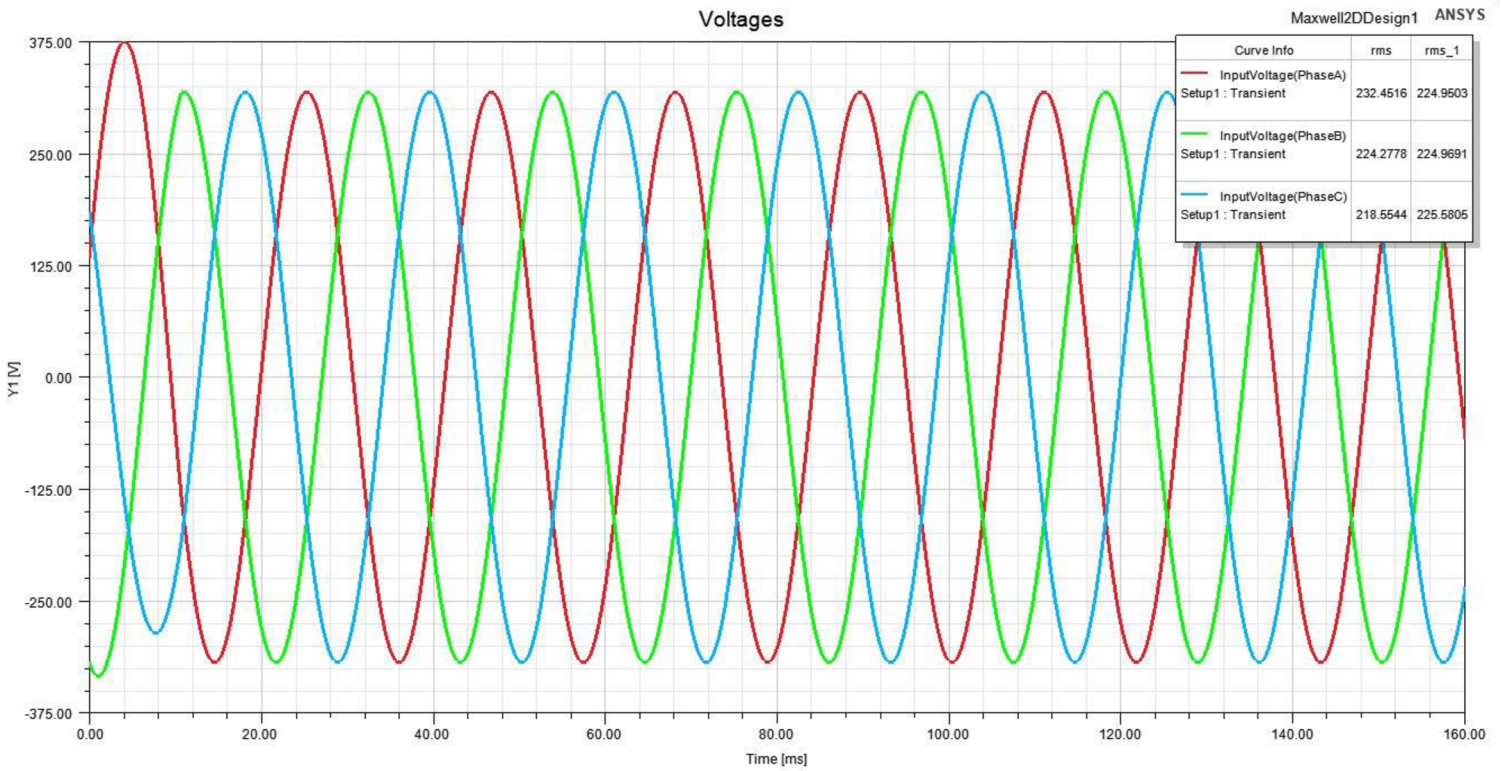
Příloha A – Grafy časových průběhů veličin z Ansys Maxwell 2D (jmenovitý pracovní bod)

Tato příloha je doplněním kapitoly 5. Jsou zde vyobrazeny všechny časové průběhy jednotlivých veličin, které byly vypočítány programem Ansys Maxwell 2D.

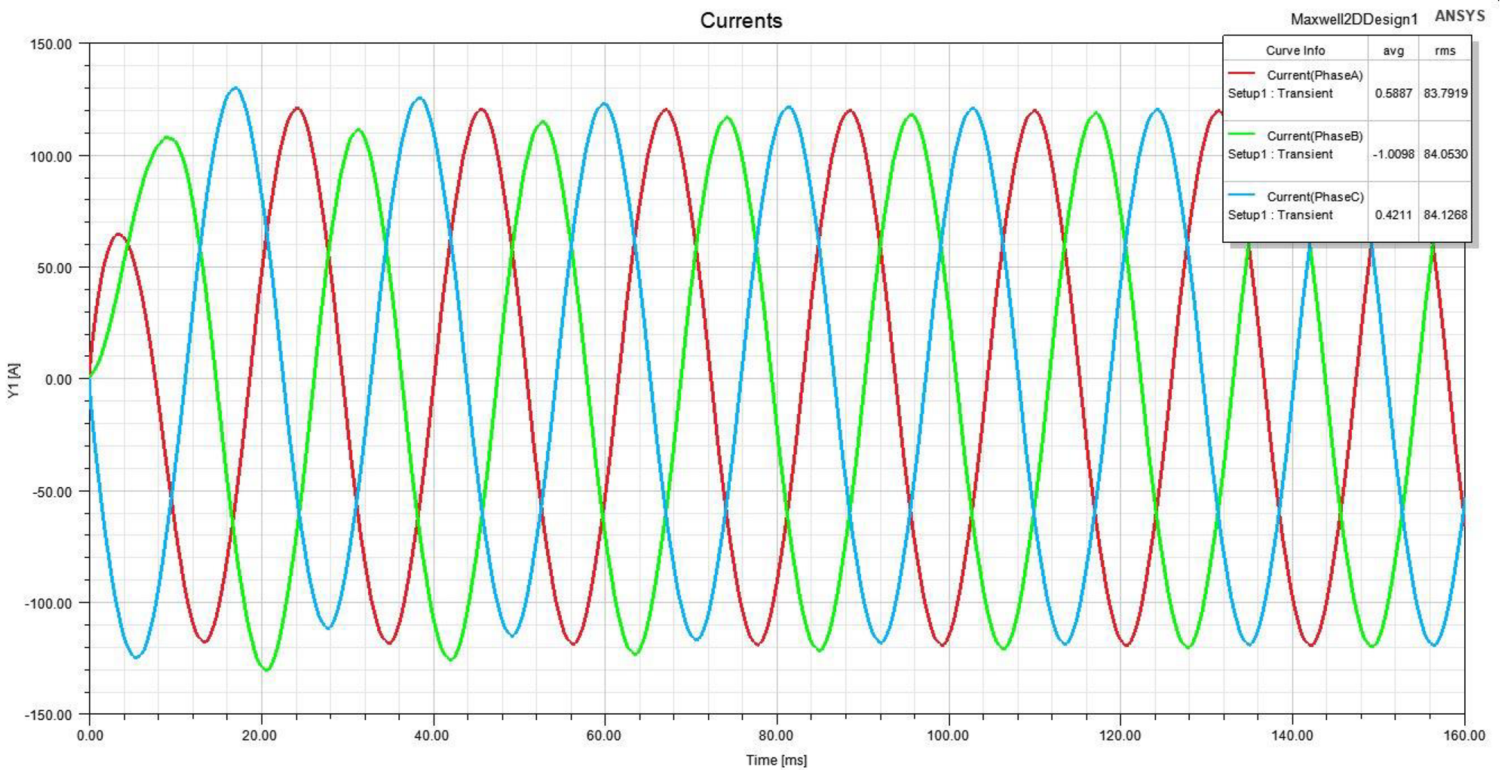
Průběh momentu



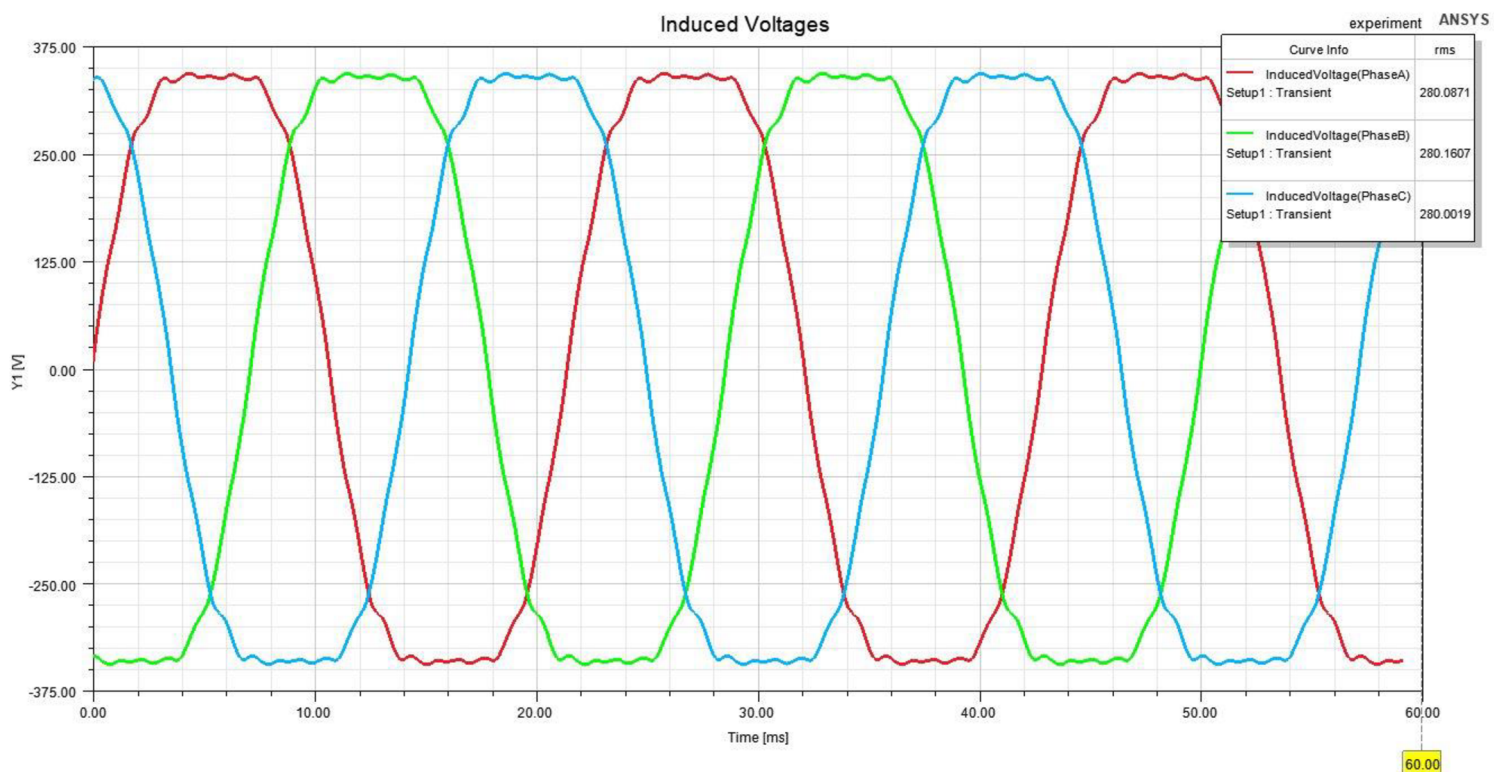
Průběh napájecích napětí



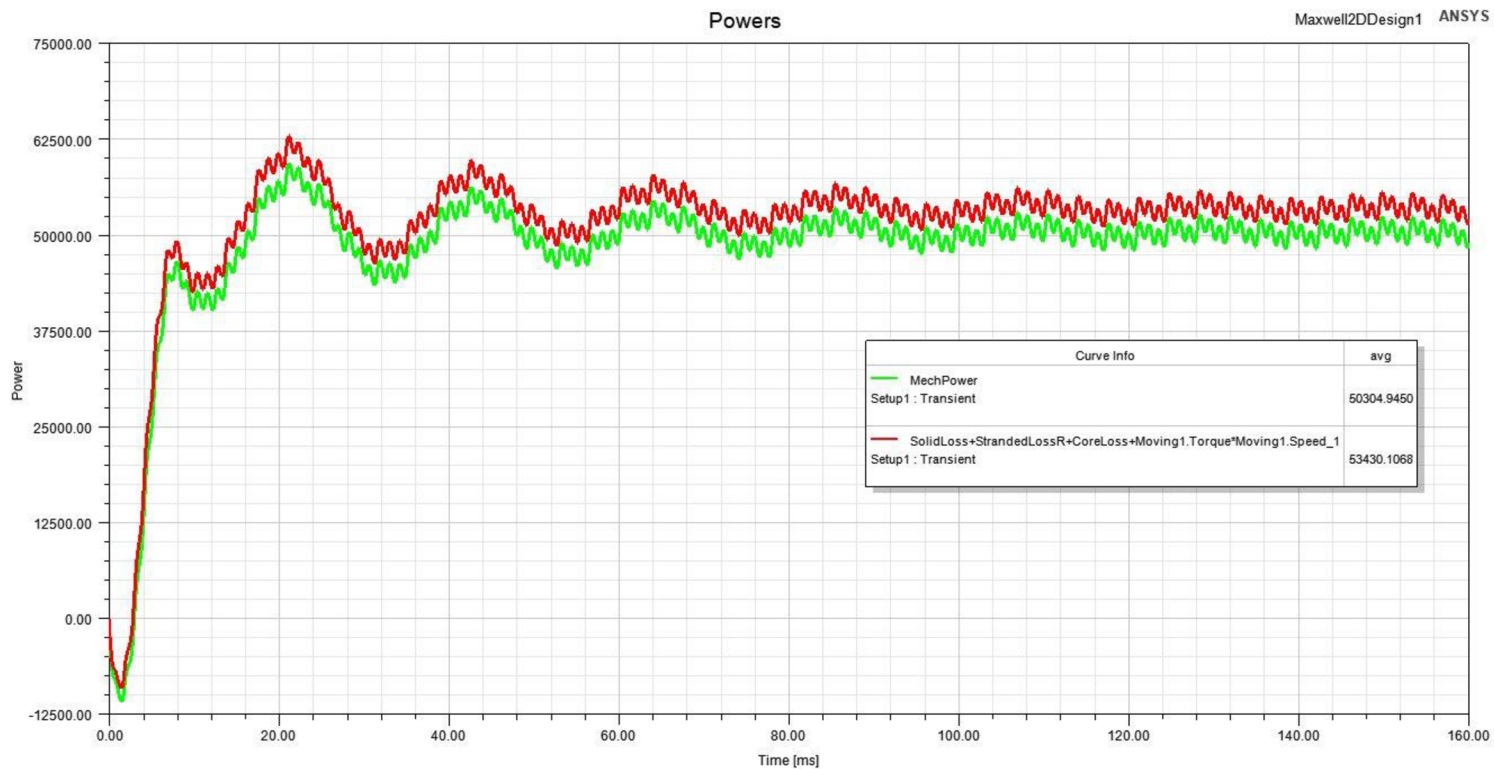
Průběh fázových proudů



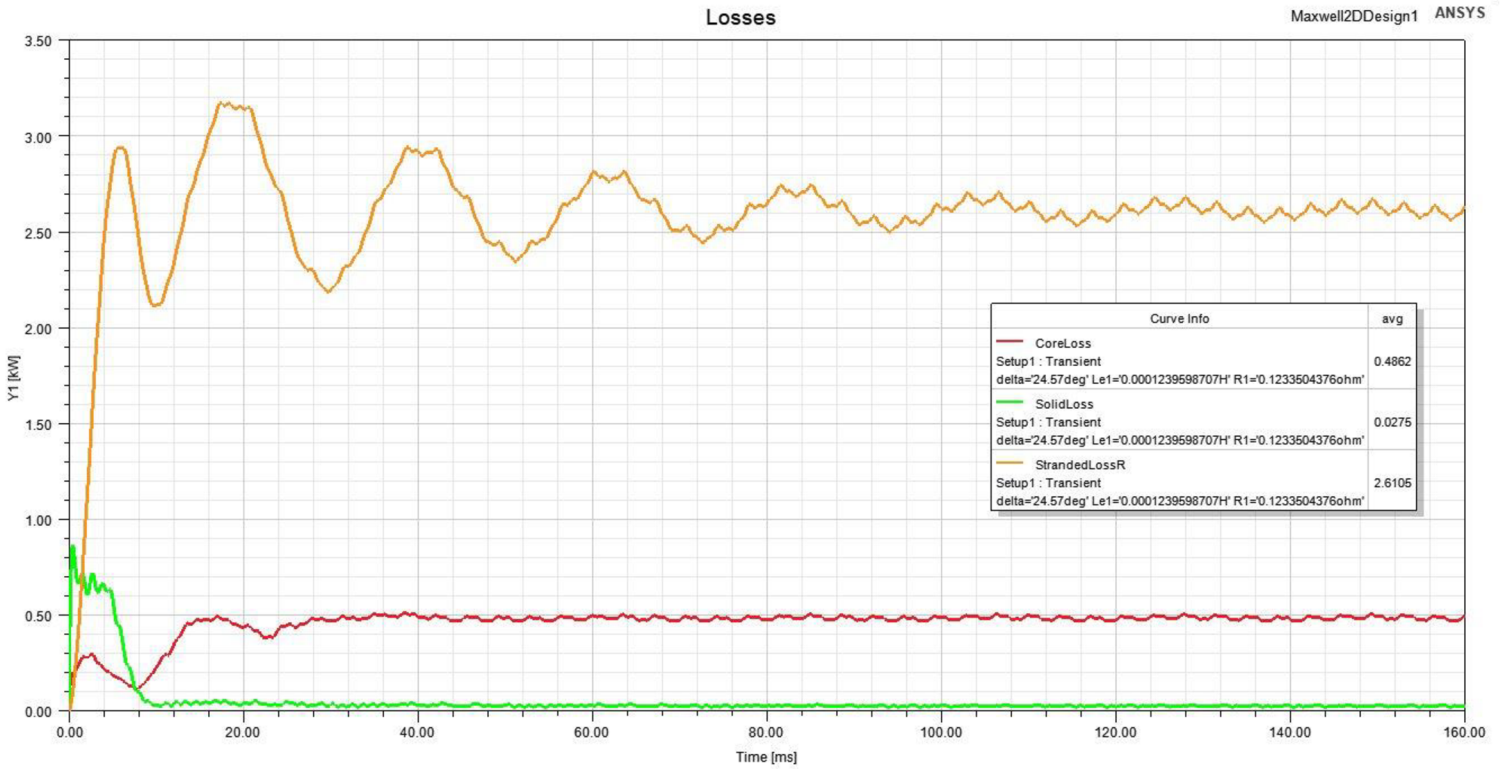
Průběh indukovaných napětí



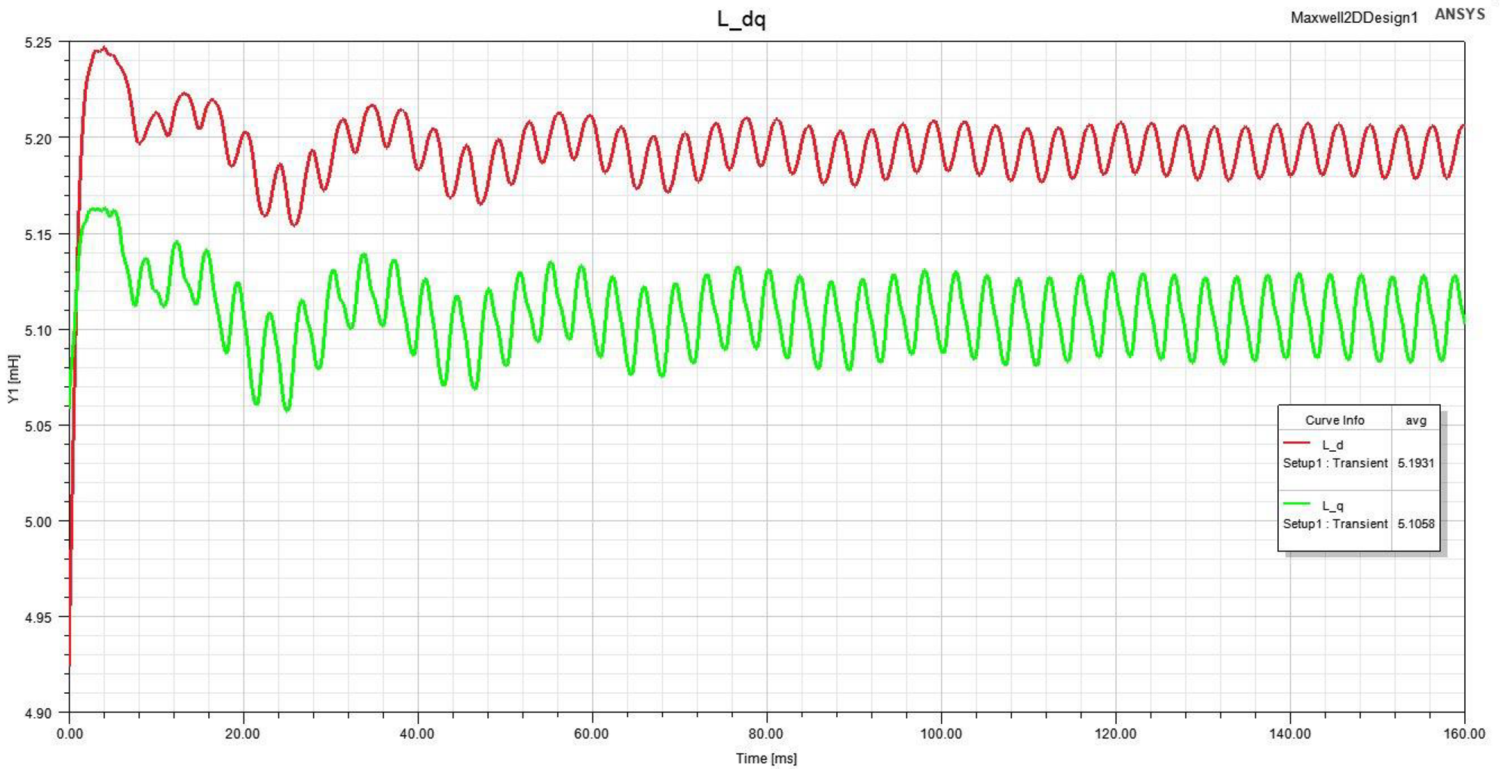
Průběh mechanického výkonu a elektrického příkonu



Průběh ztrát ve vinutí, ztrát v železe a ztrát v permanentních magnetech



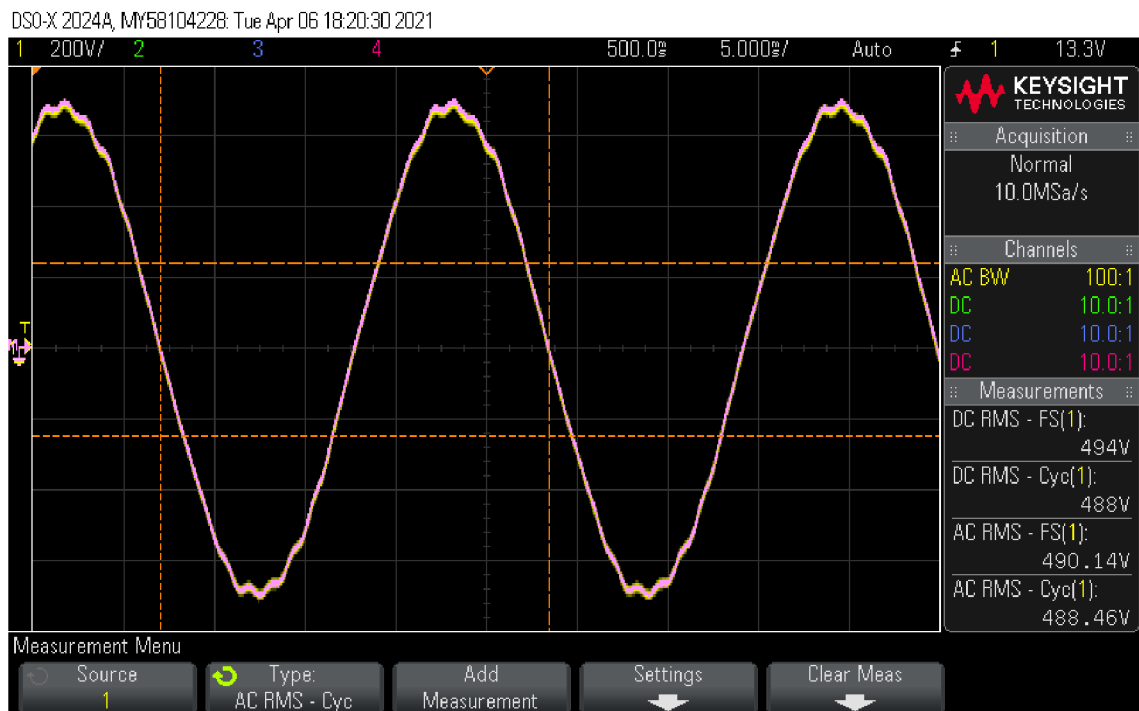
Průběh indukčnosti v d ose a indukčnosti v q ose



Příloha B – Průběhy indukovaných napětí naměřené osciloskopem

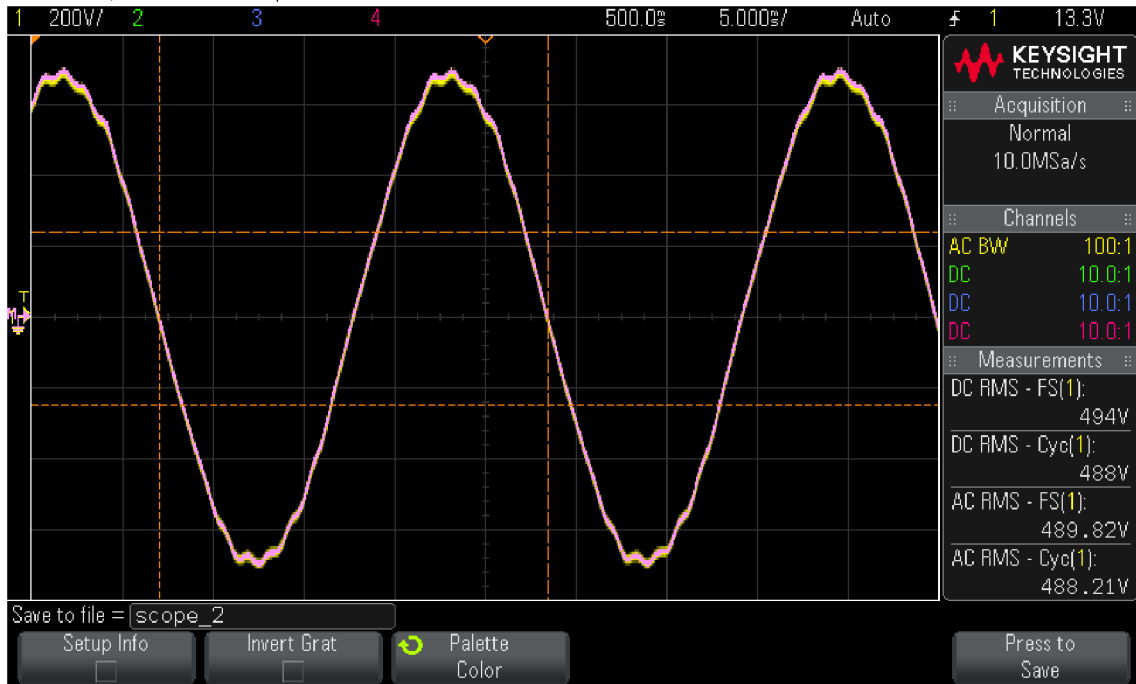
Následující naměřené průběhy indukovaného napětí byly naměřeny po roztočení motoru na jmenovité otáčky 350 min^{-1} pomocí dynamometru. Měření bylo provedeno pomocí osciloskopu. Nejprve byly připojeny měřicí sondy mezi jednotlivé fáze. Poté bylo měření provedeno při připojení sond mezi jednu z fází a střed hvězdy.

Indukované napětí mezi fázemi U a V



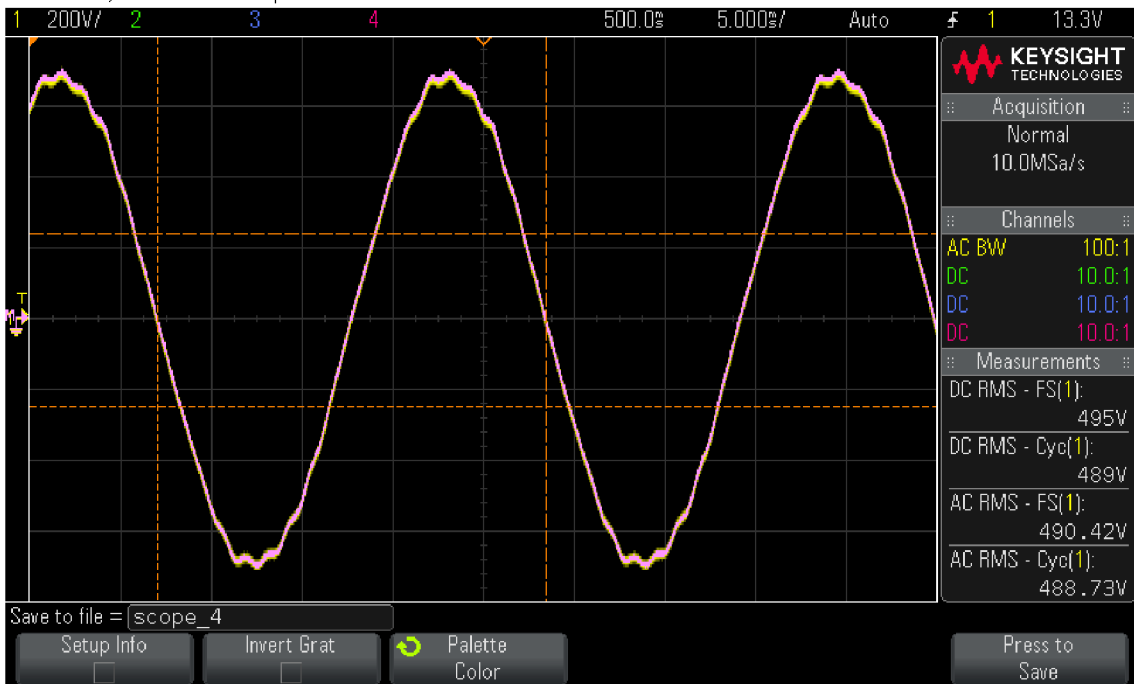
Indukované napětí mezi fázemi V a W

DSO-X 2024A, MY58104228, Tue Apr 06 18:22:30 2021

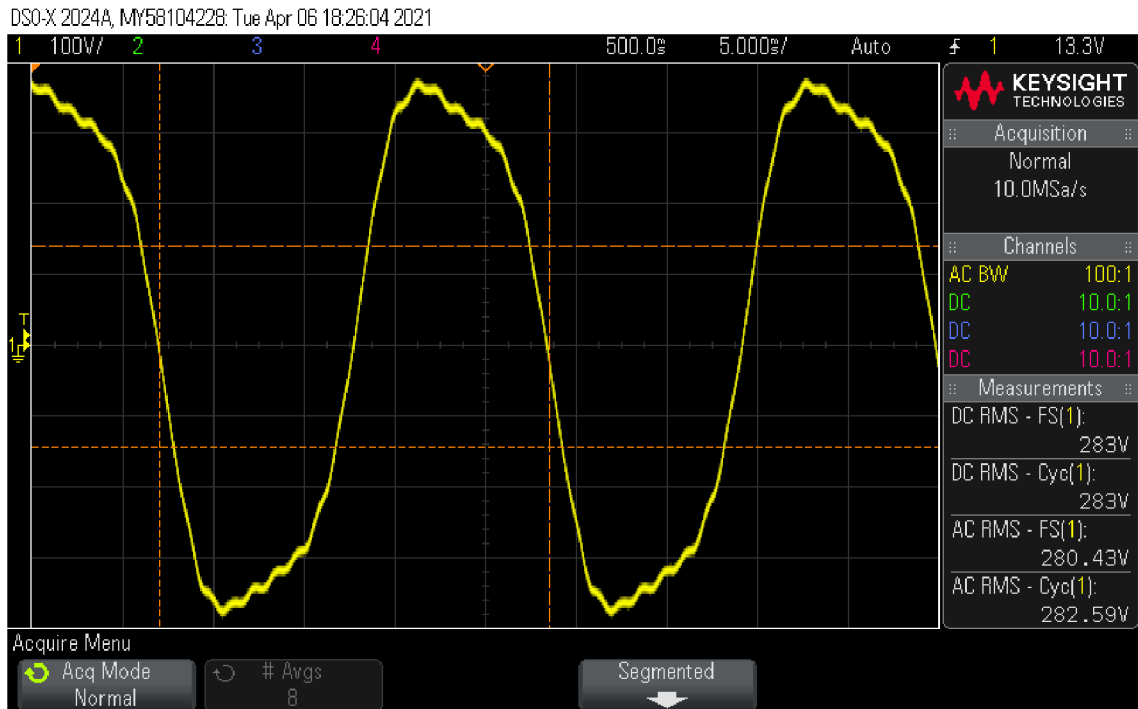


Indukované napětí mezi fázemi W a U

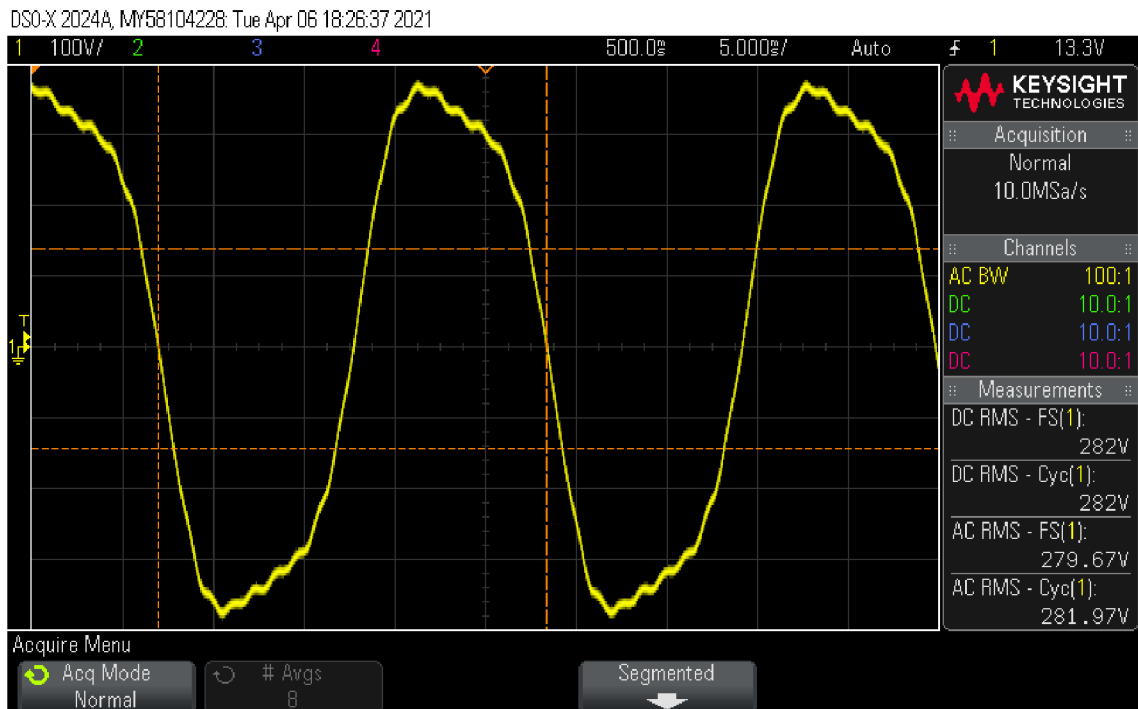
DSO-X 2024A, MY58104228, Tue Apr 06 18:23:33 2021



Indukované napětí fáze U (mezi svorkou U a středem hvězdy)

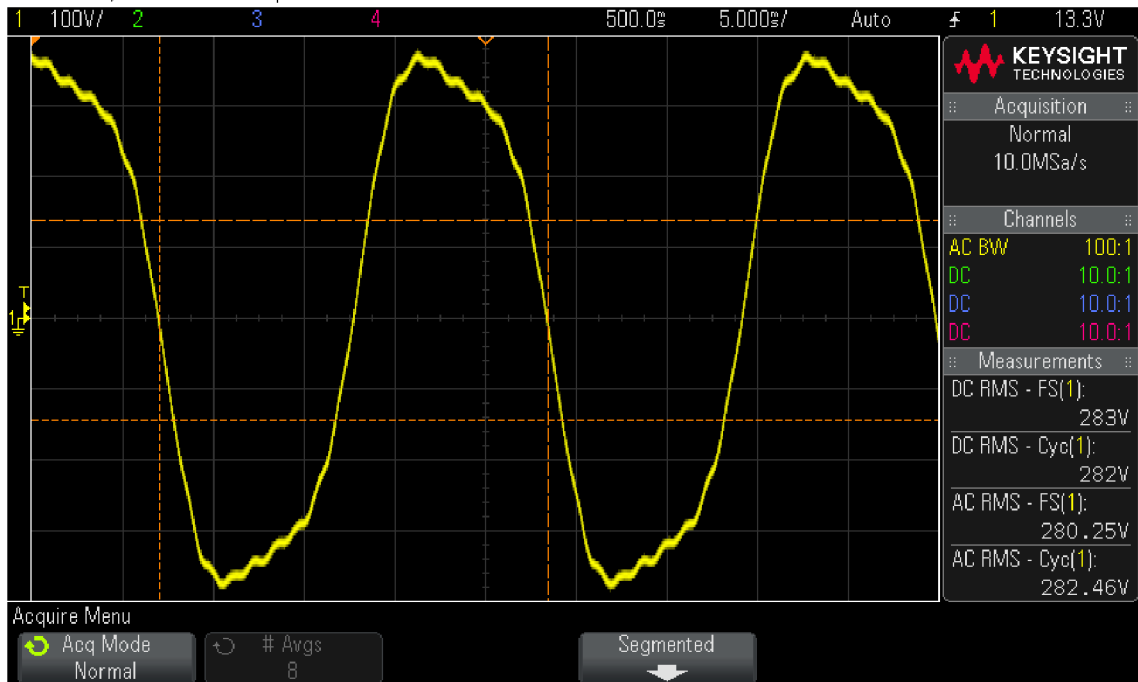


Indukované napětí fáze V (mezi svorkou V a středem hvězdy)



Indukované napětí fáze W (mezi svorkou W a středem hvězdy)

DSO-X 2024A, MY5810422B, Tue Apr 06 18:27:05 2021



Příloha C – Přehled vypočtených parametrů stroje

Veličina	Značení	Analytický výpočet	Ansys RMxprt	Ansys Maxwell 2D
Návrhové parametry				
Režim provozu	Frekvenční měnič			
Jmenovitý výkon	P_n	50 kW		
Jmenovité otáčky	n_n	350 min		
Jmenovité napětí (zapojení vinutí)	U_n	390 V (Y)		
Počet fází	m	3		
Počet pólů	$2p$	16		
Jmenovitý účinník	$\cos \varphi_n$	0,95		
Jmenovitá účinnost	η_n	92,4 %		
Výpočet				
Napájecí frekvence	f	46,67 Hz		
Napájecí úhlová frekvence	ω	293,22 s ⁻¹	---	---
Tangenciální napětí ve vzduchové mezeře	σ_{Ftan}	26,93 kPa	---	---
Moment na hřídeli stroje	M	1364,2 Nm	1364,8 Nm	1372,7 Nm
Štíhlostní poměr	χ	0,7087	---	---
Ekvivalentní délka rotoru	l'	253 mm	---	---
Délka vzduchové mezery	δ	1,5 mm		
Vnější průměr statoru	D_{SO}	480 mm		
Vnitřní průměr statoru	D_S	360 mm		
Vnější průměr rotoru	D_r	357 mm		
Vnitřní průměr rotoru	D_{RI}	320,3 mm		
Fyzická délka rotoru	l	250 mm		

Veličina	Značení	Analytický výpočet	Ansyz RMxpřt	Ansyz Maxwell 2D
Pólové krytí	α_{PM}	0,80		
Počet závitů fáze v sérii statorového vinutí	N	126		
Počet statorových drážek	Q_S	72		
Pólová rozteč	τ_p	4,5	---	4,5
Pólová rozteč (v mm)	τ_p	70,39 mm	---	70,39 mm
Počet drážek na pól a fázi	q	1,5	---	1,5
Krok cívký	y	4		
Počet paralelních větví	a	4		
Činitel vinutí	k_{v1}	0,945		---
Činitel zkrácení kroku	k_y	0,984808	---	---
Činitel rozlohy	k_r	0,959795	---	---
Počet vodičů ve statorové drážce	N_{ds}	42		
Počet vodičů v jedné vrstvě statorové drážky	N_{vrstva}	21	---	---
Drážková rozteč	τ_u	15,71 mm	---	15,71 mm
Činitel plnění železa	k_{pFe}	0,95		---
Statorový proud	I_S	84,3 A	80,4 A	83,99 A
Průřez jednoho vodiče ve statorové drážce	S_v	4,44724 mm ²	4,44820 mm ²	---
Proudová hustota ve vinutí statoru	J_S	4,739 A/mm ²	4,516 A/mm ²	---
Celkový průřez mědi v drážce	S_{Cu}	186,78 mm ²	186,82 mm ²	---
Činitel plnění mědi	k_{pCu}	0,488	0,488	---
Výška otevření drážky	h_1	0,5 mm		
Výška závěru drážky	h_2	1,5 mm		
Rozměr drážky dle Obr. 3-4	h_3	1 mm		
Rozměr drážky dle Obr. 3-4	h_4	38,6 mm	---	38,6 mm

Veličina	Značení	Analytický výpočet	Ansyz RMxprt	Ansyz Maxwell 2D
Rozměr drážky dle Obr. 3-4	h_5	33,5 mm		
Drážková izolace	h_6	0,4 mm	---	---
Mezifázová izolace drážky	h'	0,4 mm	---	---
Otevření drážky	b_1	3 mm		
Šířka drážky (dle Obr. 3-4)	b_4	8 mm		
Rozměr drážky dle Obr. 3-4	b_{4c}	7,2 mm	---	7,2 mm
Šířka drážky (dle Obr. 3-4)	b_5	11 mm		
Rozměr drážky dle Obr. 3-4	b_{5c}	10,2 mm	---	10,2 mm
Plocha drážky	S_{dS}	383 mm ²	385 mm ²	---
Šířka statorového zubu	b_d	9,27 mm	7,89 mm	7,89 mm
Materiál – statorový svazek	---	M400-50A		
Materiál – rotorový svazek	---	M400-50A		
Permanentní magnet	---	NdFeB 40 SH		
Remanentní magnetická indukce permanentního magnetu	B_r	1,16 T		
Fiktivní koerzivní síla permanentního magnetu	H'_C	875 kA/m		
Relativní permeabilita permanentního magnetu	μ_{rPM}	1,055		
Výška permanentních magnetů	h_{PM}	6 mm		
Výška jha statoru	h_{jS}	18 mm	18 mm	18 mm
Výška jha rotoru	h_{jR}	19 mm	19 mm	19 mm
Carterův činitel	k_C	1,056	---	---
Ekvivalentní délka vzduchové mezery	δ_e	1,584 mm	---	---
Magnetická indukce v zubu statoru	B_d	1,597 T	1,777 T	---
Magnetická indukce ve jhu statoru	B_{jS}	1,476 T	1,209 T	---
Magnetická indukce ve jhu rotoru	B_{jR}	1,4 T	1,942 T	---

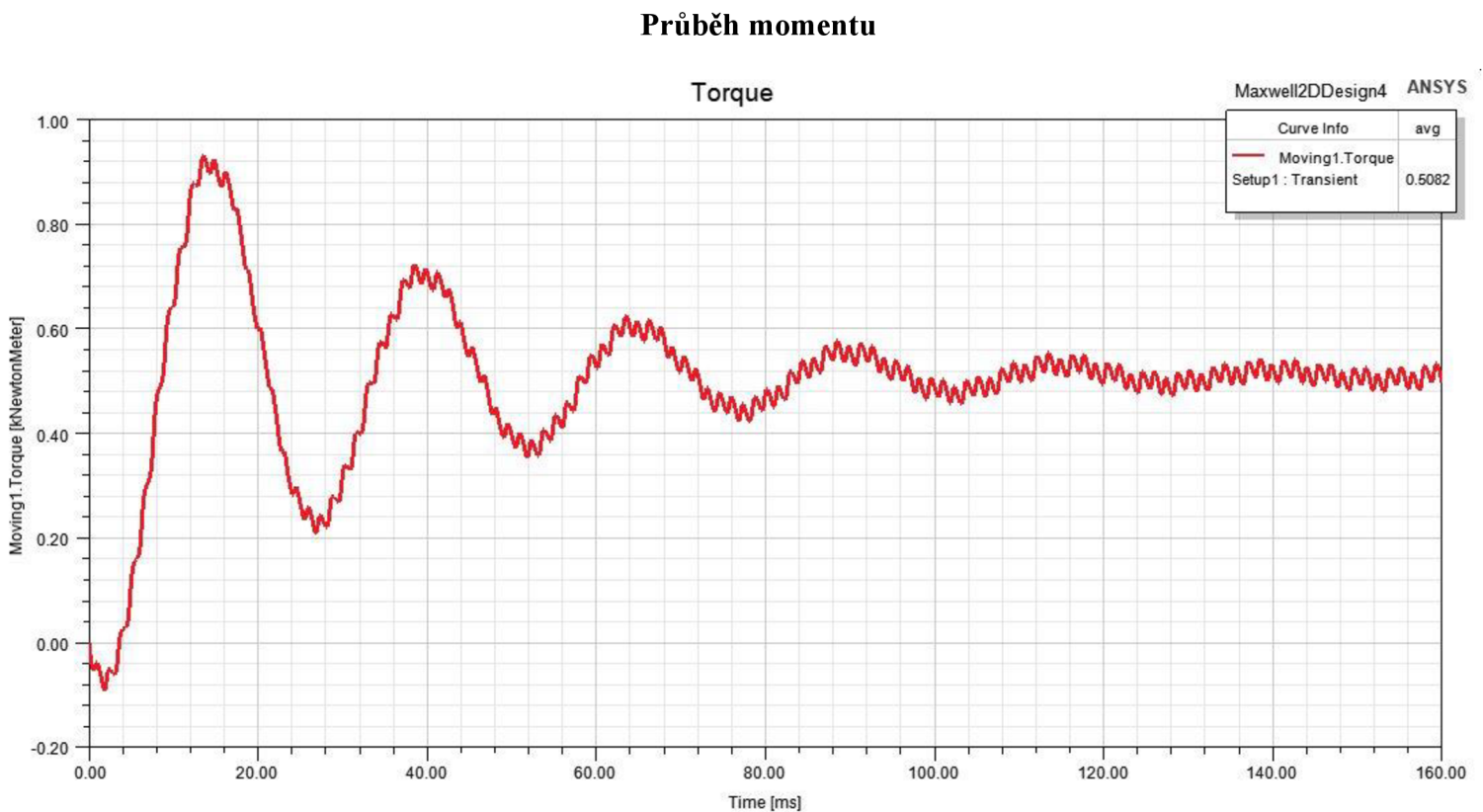
Veličina	Značení	Analytický výpočet	Ansys RMxpřt	Ansys Maxwell 2D
Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	B_{max}	0,886 T	0,798 T	---
Magnetická indukce permanentního magnetu	B_{PM}	0,886 T	0,828 T	---
Intenzita magnetického pole v zubu statoru	H_d	3095,4 A/m	---	---
Intenzita magnetického pole ve jhu statoru	H_{jS}	1037 A/m	---	---
Intenzita magnetického pole ve jhu rotoru	H_{jR}	508 A/m	---	---
Magnetické napětí na zubu statoru	$U_{m,d}$	106,8 A	346,9 A	---
Magnetické napětí na jhu statoru	$U_{m,jS}$	19,8 A	4,8 A	---
Magnetické napětí na jhu rotoru	$U_{m,jR}$	8,5 A	120,8 A	---
Magnetické napětí na vzduchové mezeře	$U_{m,\delta e}$	1116,8 A	1028,4 A	---
Magnetické napětí na permanentním magnetu	$U_{m,PM}$	4009,8 A	---	---
Celkové magnetické napětí ve stroji	$U_{m,celk}$	5247,6 A	---	---
Maximální reakce kotvy	$U_{m,reakce}$	---	4956,8 A	---
Přetížitelnost stroje	I_k/I_n	2,517	---	---
Provozní teplota stroje	ϑ	100 °C		
Napětí indukované permanentním magnetem	U_{PM}	311,6 V	---	280,08 V
Maximální napětí indukované permanentním magnetem (sdružená hodnota)	$U_{PM,max,S}$	---	667 V	---
Průměrná délka vodiče statorového vinutí	l_{av}	0,7502 m	---	---
Odpor fáze statorového vinutí	R	0,1213 Ω	0,1234 Ω	0,1234 Ω
Efektivní délka vzduchové mezery	δ_{ef}	7,443 mm	---	---
Magnetizační indukčnost v ose d	L_{md}	3,239 mH	3,185 mH	---
Magnetizační indukčnost v ose q	L_{mq}	3,239 mH	3,185 mH	---
Rozptylová indukčnost vzduchové mezery	$L_{\sigma\delta}$	241,3 μ H	83,65 μ H	---
Rozptylová indukčnost statorové drážky	$L_{\sigma u}$	1,718 mH	1,846 mH	---

Veličina	Značení	Analytický výpočet	Ansys RMxprt	Ansys Maxwell 2D
Rozptylová indukčnost cípu statorového zubu	$L_{\sigma d}$	275,4 μH	---	---
Rozptylová indukčnost čela cívky vinutí	$L_{\sigma w}$	237,6 μH	124 μH	---
Indukčnost v ose d	L_d	5,711 mH	5,238 mH	5,193 mH
Indukčnost v ose q	L_q	5,711 mH	5,238 mH	5,106 mH
Reaktance v ose d	X_d	1,675 Ω	---	---
Reaktance v ose q	X_q	1,675 Ω	---	---
Synchronní reaktance	X_S	1,675 Ω	---	---
Objem zubu statoru	V_d	$6,367 \cdot 10^{-3}$ m^3	---	---
Objem jha statoru	V_{jS}	$6,531 \cdot 10^{-3}$ m^3	---	---
Objem statorové drážky	V_{dS}	$6,894 \cdot 10^{-3}$ m^3	---	---
Celkový objem statoru	V_S	$19,792 \cdot 10^{-3}$ m^3	---	---
Hmotnost zubů statoru	m_d	44,16 kg	---	---
Hmotnost jha statoru	m_{jS}	45,31 kg	---	---
Hmotnost statorového svazku	m_S	89,47 kg	89,20 kg	---
Hmotnost permanentních magnetů	m_{PM}	9,41 kg	9,92 kg	---
Hmotnost mědi statorového vinutí	m_{Cu}	60,27 kg	44,46 kg	---
Hmotnost jha rotoru	m_{jR}	24,58 kg	22,38 kg	---
Celková hmotnost železa, mědi a permanentních magnetů	m_{celk}	183,73 kg	165,96 kg	---
Činitel opracování jha statoru	$k_{Fe,jS}$	1,6	---	---
Činitel opracování zubů statoru	$k_{Fe,d}$	2,0	---	---
Ztráty ve jhu statoru	$\Delta P_{Fe,jS}$	215 W	---	---
Ztráty v zubech statoru	$P_{Fe,d}$	315 W	---	---
Ztráty ve statoru	$\Delta P_{Fe,S}$	530 W	---	---
Ztráty v železe	ΔP_{Fe}	---	511 W	486,2 W

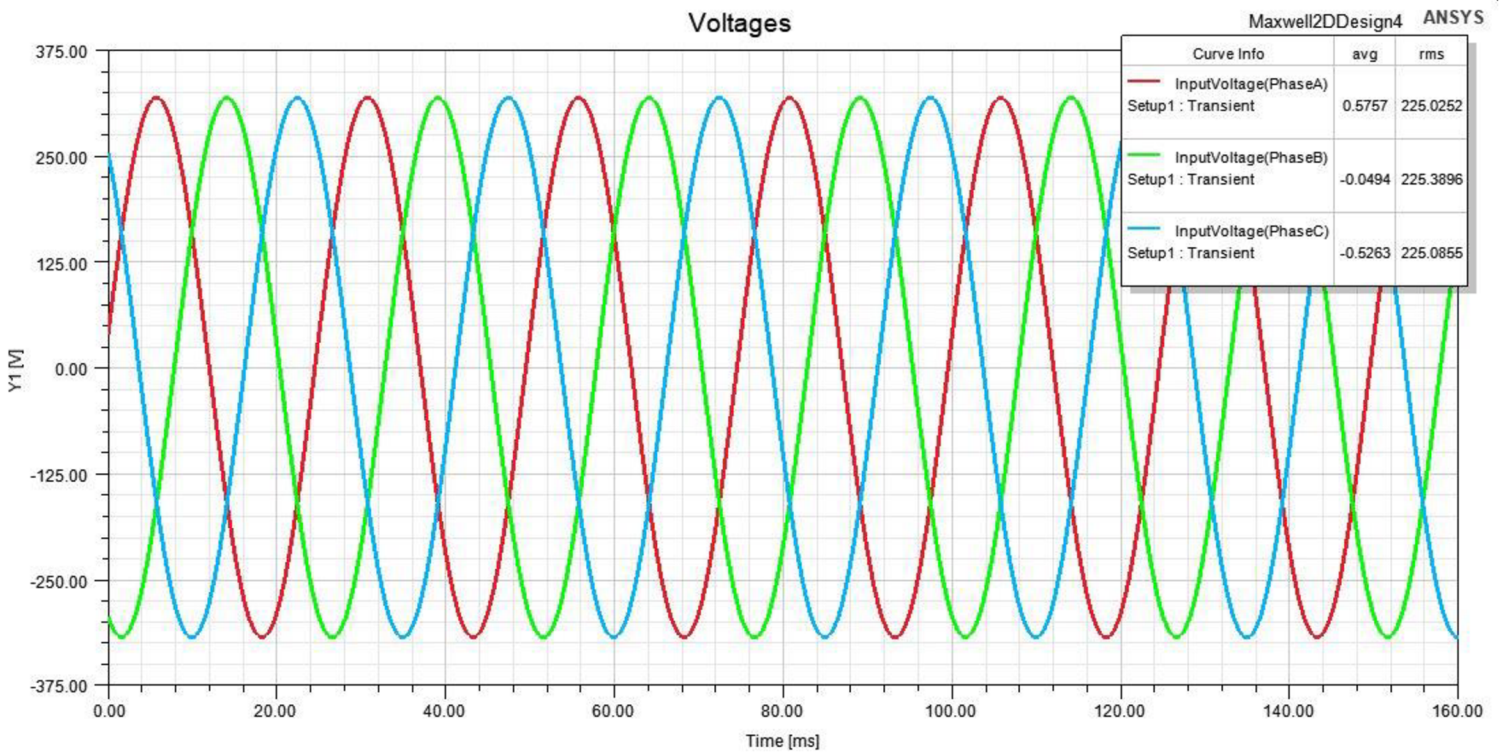
Veličina	Značení	Analytický výpočet	Ansys RMxprt	Ansys Maxwell 2D
Ventilační ztráty	$\Delta P_{mech,vent}$	45 W	---	---
Celkové mechanické ztráty	ΔP_{mech}	300 W		
Ztráty v permanentních magnetech	ΔP_{PM}	23 W	---	27,5 W
Dodatečné ztráty	ΔP_d	250 W	---	---
Ztráty ve statorovém vinutí	ΔP_{Cu}	2586 W	2389 W	2610,5 W
Celkové ztráty ve stroji	ΔP	3761 W	3200 W	3424,2 W
Příkon stroje	P_1	53,761 kW	53,222 kW	53,430 kW
Zátěžný úhel	β	25,33°	25,64°	24,57°
Proud v ose d	I_d	- 68,3 A	---	---
Proud v ose q	I_q	52,6 A	---	---
Statorový proud naprázdno	$I_{S,0}$	---	29,5 A	---
Vstupní výkon naprázdno	$P_{1,0}$	---	1139 W	---
Účinnost	η	93,0 %	94,0 %	93,6 %
Účinník	$\cos \varphi$	0,944	---	---
Maximální moment stroje	M_{max}	3428,7 Nm	---	---
Maximální výkon na hřídeli	P_{max}	---	108,791 kW	---

Příloha D – Grafy časových průběhů veličin z Ansys Maxwell 2D (pracovní bod $M = 500 \text{ Nm}$, $n = 300 \text{ min}^{-1}$)

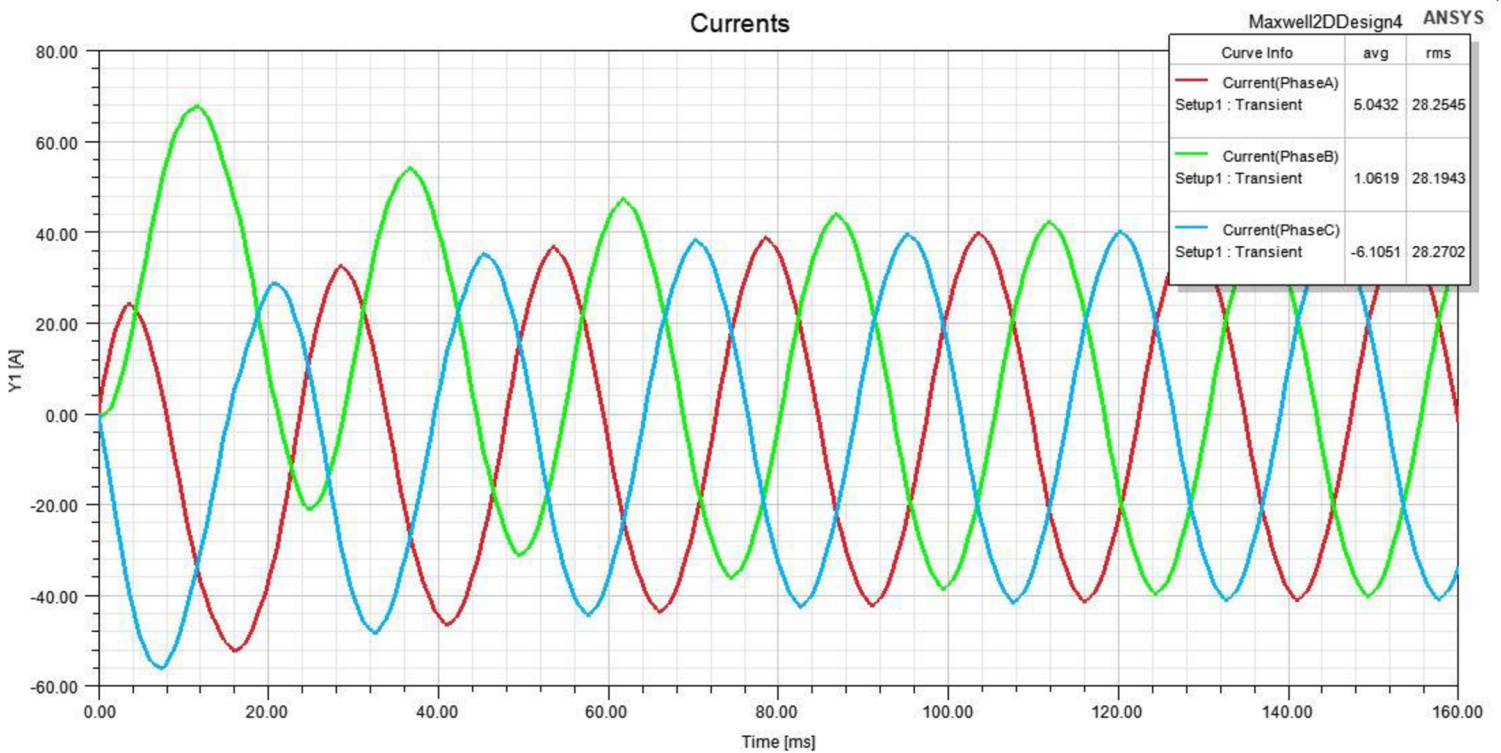
Tato příloha je doplněním podkapitoly 6.4. Jsou zde vyobrazeny všechny časové průběhy jednotlivých veličin, které byly vypočítány programem Ansys Maxwell 2D s užitím upraveného modelu stroje dle vybraného pracovního bodu z měření ($M = 500 \text{ Nm}$, $n = 300 \text{ min}^{-1}$).



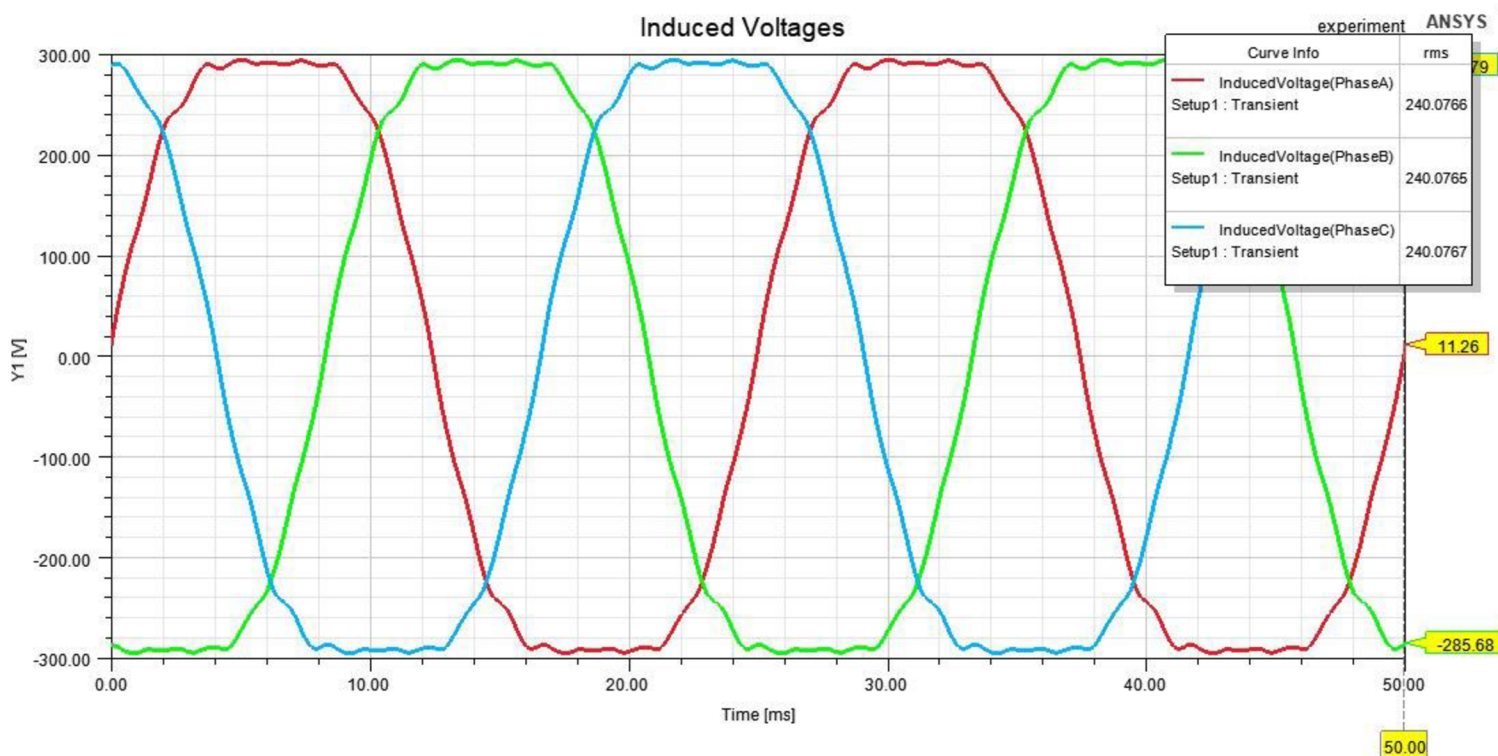
Průběh napájecích napětí



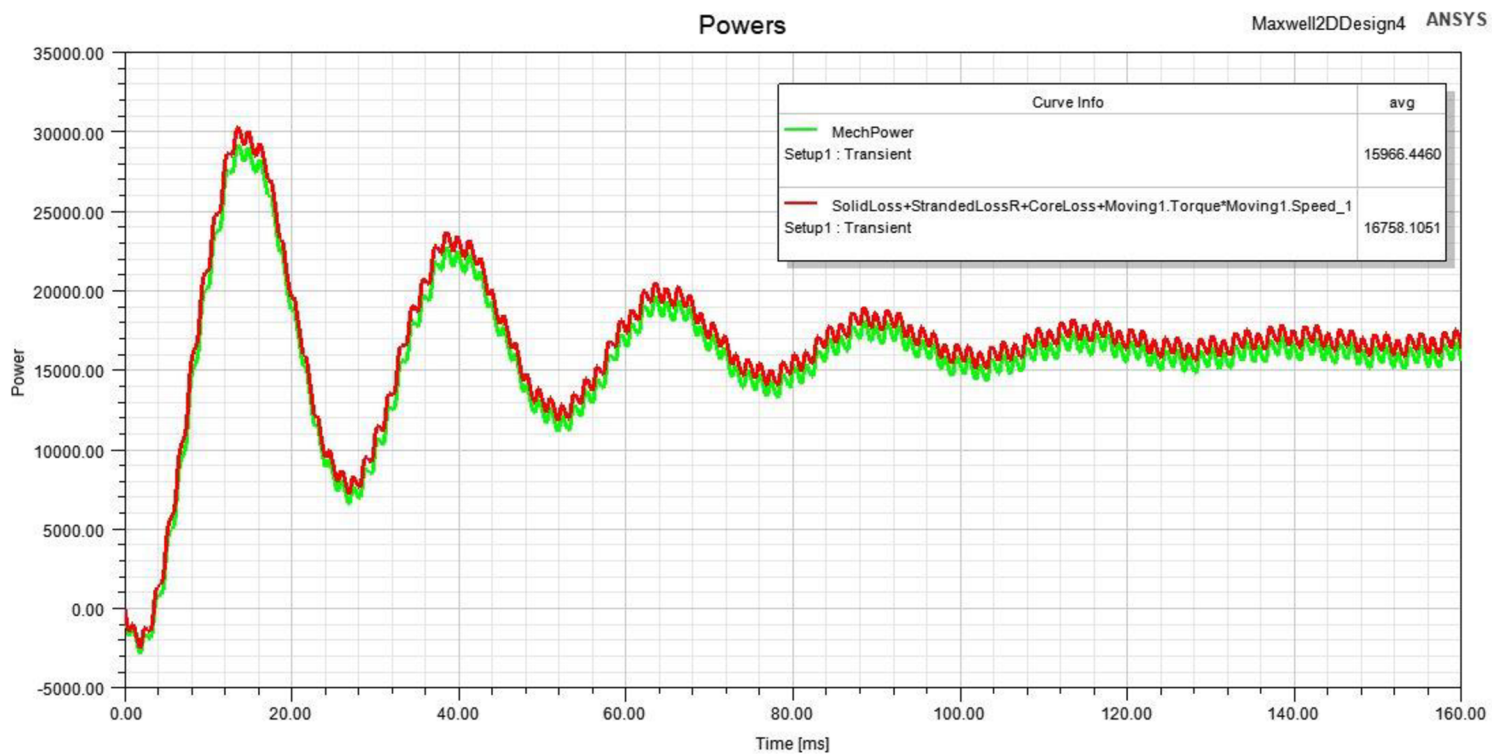
Průběh fázových proudů



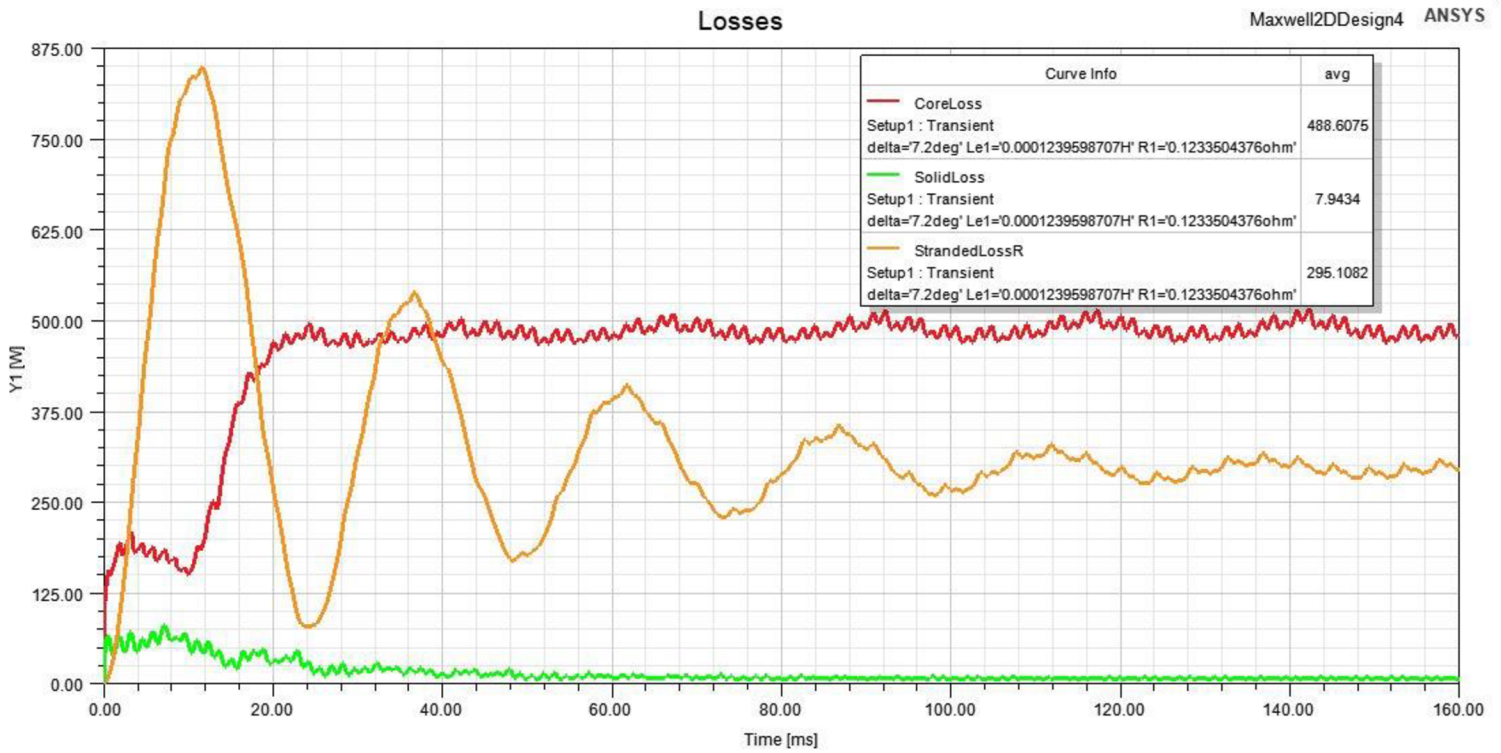
Průběh indukovaných napětí



Průběh mechanického výkonu a elektrického příkonu



Průběh ztrát ve vinutí, ztrát v železe a ztrát v permanentních magnetech



Průběh indukčnosti v d ose a indukčnosti v q ose

