



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

MĚŘENÍ A MODELOVÁNÍ SYNCHRONNÍCH RELUKTANČNÍCH MOTORŮ

MEASUREMENT AND SIMULATION OF SYNCHRONOUS RELUCTANCE MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Richard Gábriš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Richard Gábriš

ID: 161784

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření a modelování synchronních reluktančních motorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou synchronních reluktančních motorů (SynRM).
2. Nastudujte manuál dostupného měniče pro napájení SynRM, připravte měřicí pracoviště.
3. Provedte měření na zadaných vzorcích SynRM a výsledky vyhodnoťte.
4. Vytvořte model zadaného SynRM v prostředí ANSYS Maxwell, vypočtené parametry motoru srovnajte se změřenými.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] BOLDEA, Ion. Reluctance Synchronous Machines and Drives. Clarendon Press, 1996 . 240 p. ISBN 978-0198593911.

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

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

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

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Táto bakalárska práca v úvode popisuje princíp fungovania a využitie synchronných reluktančných motorov. Jadro práce je rozdelené na dve časti. V prvej je popísané merania na vzorkách motorov a vyhodnotenie merania. Obsahom druhej časti je tvorba modelu motora v programe ANSYS Maxwell, analýza výsledkov a ich porovnanie s výsledkami získanými meraním.

Kľúčové slová

SynRM, reluktancia, synchronný reluktančný motor, ANSYS Maxwell, frekvenčný menič, analýza, RMxpvt

Abstract

This semester thesis describes the principle of operation and a usage of synchronous reluctance motors. The core of the thesis is divided into two parts. The first one is a description of a measurement of motor samples and evaluation of the measurement. Subject matter of the second one is designing of motor models in application ANSYS Maxwell, analysis of the results and their comparison with the results obtained by the measurement.

Keywords

SynRM, reluctance, synchronous reluctance motor, ANSYS Maxwell, AC/AC converter, analysis, RMxpvt

Bibliografická citácia

GÁBRIŠ, R. *Měření a modelování synchronních reluktančních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 51 s. Vedúci bakalárskej práce: doc. Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Měření a modelování synchronních reluktančních motorů“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálnej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce. Ako autor uvedenej semestrálnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto semestrálnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia §11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa

Podpis autora.....

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Ondřejovi Vítkovi, Ph.D za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce

V Brne dňa

Podpis autora.....

Obsah

Úvod	10
1 Synchronne reluktančné motory.....	1
1.1 Princíp vzniku momentu.....	1
1.2 Konštrukcia motora	2
1.2.1 Rotor	2
1.2.2 Stator.....	4
1.2.3 Napájanie a riadenie motora	4
1.3 Vlastnosti a použitie SynRM	5
1.3.1 Výhody	5
1.3.2 Nevýhody	6
1.3.3 Možnosti použitia.....	6
1.4 Popis vlastností SynRM pomocou kruhového diagramu.....	6
1.4.1 Kruhový diagram motora B.....	7
2 meranie zadaných vzorkov motorov	11
2.1 Príprava pracoviska a zapojenie.....	11
2.2 Nastavenie meniča	12
2.2.1 Hardware	12
2.2.2 Software.....	13
2.3 Parametre motorov.....	13
2.4 Meranie.....	14
2.4.1 Postup merania.....	14
2.4.2 Podmienky a použité prístroje.....	14
2.4.3 Meranie odporu a teploty vinutia	15
2.4.4 Výpočet účinností, strát a ich rozloženie	18
2.4.5 Obsah normy.....	20
2.4.6 Zhodnotenie merania	20
3 Model SynRM v programe ANSYS maxwell	22
3.1 Popis programu	22
3.1.1 ANSYS a ANSYS Maxwell.....	22
3.1.2 RMxprt.....	22
3.2 Tvorba modelu motora B.....	22
3.3 Príprava modelu.....	23
3.4 Výsledky analýzy.....	25
3.5 Možnosti zlepšenia parametrov motora.....	34
4 Záver	36
Literatúra	37

Zoznam symbolov, veličín a skratiek.....	39
Zoznam príloh.....	41

Zoznam obrázkov

Obr. 1.1 Dvojpólový rotor: a) počiatkový stav; b) stav po priechode prúdu [2].....	1
Obr. 1.2 Rozloženie bariér magnetického toku v rotore [17]	2
Obr. 1.3 Rotor: a) s vyjadrenými pólmi b) axiálne laminovaný	3
Obr. 1.4 Charakteristika $M = f(s)$ SynRM s rotorom s kliečkou [7]	4
Obr. 1.5 Kruhový diagram SynRM [9]	6
Obr. 1.6 BH krivka.....	8
Obr. 1.7 Polohy rotora v programe FEMM	8
Obr. 1.8 Kruhový diagram motora B.....	10
Obr. 2.1 Zjednodušená schéma	12
Obr. 2.2 Zapojený motor (stroj vľavo) na pracovisku.....	12
Obr. 2.3 Graf závislostí odporov vinutia motora A na čase od vypnutia.....	16
Obr. 2.4 Graf závislostí odporov vinutia motora B na čase od vypnutia.....	16
Obr. 2.5 Graf závislosti účinnosti na momente	19
Obr. 3.1 Model motora B vytvorený v ANSYS Maxwell 2D.....	23
Obr. 3.2 Okno zadaných parametrov pohybu	24
Obr. 3.3 Závislosť momentu na natočení	25
Obr. 3.4 Rozloženie magnetickej indukcie B_{ans}	26
Obr. 3.5 Rozloženie intenzity magnetického toku H_{ans}	26
Obr. 3.6 Priebeh magnetického toku v čase	27
Obr. 3.7 Napätie siete a magnetický tok v čase.....	28
Obr. 3.8 Indukované napätia a napätie siete fáze A.....	28
Obr. 3.9 Krútiaci moment a počet otáčok za minútu	29
Obr. 3.10 Údaje pre výpočet koeficientov a ich hodnoty	30
Obr. 3.11 Graf príkonu v porovnaní s výkonom a stratami	30
Obr. 3.12 Rozloženie strát v železe a v odporoch cievok v priereze motora	31
Obr. 3.13 Závislosť výkonu a strát na momente	33
Obr. 3.14 Rozloženie strát v železe a v odporoch cievok v priereze motora	33
Obr. 3.15 Závislosť celkového účinníka na momente	34
Obr. 3.16 Model motora s návrhom novej geometrie rotora	35

Zoznam tabuliek

Tab. 2.1 Štítkové parametre pre motor A a pôvodný asynchrónny motor	14
Tab. 2.2 Použité prístroje	15
Tab. 2.3 Odpor na jednotlivých fázach	17
Tab. 2.4 Zmerané a vypočítané hodnoty z merania motora A.....	18
Tab. 2.5 Zmerané a vypočítané hodnoty z merania motora B.....	18
Tab. 3.1 Rozdelenie strát v železe	31
Tab. 3.2 Výkony, straty a účinnosti, prvá časť	32
Tab. 3.3 Výkony, straty a účinnosti, druhá časť.....	32

ÚVOD

Počiatky vynájdenia synchronného reluktančného stroja siahajú na prelom 19. a 20. storočia, ako snaha zefektívniť nedokonalý asynchrónny motor. Prvé typy používali rotor zhodný s rotorom asynchrónneho stroja, s rozdielom vyrezaných zubov, čo spôsobovalo asymetriu magnetického odporu, resp. vodivosti, nevyhnutnú pre fungovanie reluktančného motora. Toto prevedenie umožňovalo rozbeh stroja bez pomocného roztočenia, pričom rozbeh prebiehal so sklzom až kým nedosiahol synchronne otáčky, preto sa nazýva aj synchronný stroj napájaný zo siete, alebo tiež synchronizovaný asynchrónny stroj.

S nápadom rotoru, v ktorom sú vzduchové bariéry rovnobežné s magnetickými siločiarami statorového pola, prišiel po prvýkrát Kostko v roku 1923, avšak voči pravdepodobnosti širšieho nasadenia v budúcnosti bol skeptický. Hlavnými príčinami nízkeho záujmu a zriedkavého použitia boli chýbajúce možnosti regulácie, nepriaznivá momentová charakteristika a nízka efektivita – obzvlášť v kombinácii s kotvou na krátko, ktorá bola potrebná na rozbeh na synchronne otáčky.

Vznikom polovodičov a následným rozvojom výkonovej elektroniky sa tieto problémy stali riešiteľné. Asynchrónne motory princípom svojho fungovania vytvárajú značné straty a neočakáva sa, že by ich vývoj ešte rapídne pokročil; synchronne stroje s permanentnými magnetmi majú síce vysokú účinnosť, ich magnety sú však vyrobené zo vzácnych zemín, čo výrazne zvyšuje ich cenu a znižuje dostupnosť. Dané fakty vytvárajú miesto na trhu pre synchronne reluktančné motory napájané frekvenčným meničom, ktorých hlavnými výhodami sú vyššia efektivita, menšie rozmery pri zachovaní výkonu, dlhá životnosť a odolnosť [1],[2],[3].

Možnosti prevedenia a návrhy na zlepšenie tohto typu stroja sú témou mnohých prác a výskumov. V nasledujúcom texte budú niektoré z nich zhrnuté a popísané. Jedným z cieľov tejto práce je zmerať parametre dostupných vzoriek SynRM a merania následne vyhodnotiť. V ďalšej časti je popísaný postup tvorby a vyhodnotenie výsledkov zadaného synchronného reluktančného motora v programe ANSYS Maxwell. Následne sú výsledky získané počítačovou analýzou porovnané s výsledkami z merania na reálnom stroji.

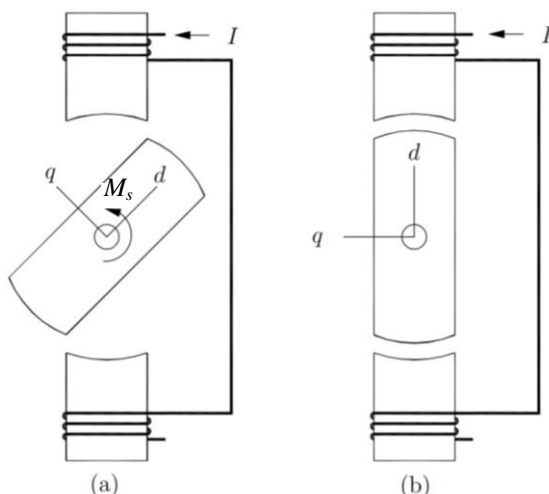
1 SYNCHRÓNNE RELUKTANČNÉ MOTORY

1.1 Princíp vzniku momentu

Ako už z názvu napovedá, SynRM využívajú na premenu elektrickej energie na kinetickú energiu rozdielne hodnoty reluktancií svojich súčastí. Reluktancia - magnetický odpor - je recipročná hodnota magnetickej vodivosti a merná magnetická vodivosť, permeabilita, je danou vlastnosťou materiálu.

Magnetický tok, podobne ako elektrický, sa uzatvára cestou najmenšieho odporu. V prípade, že by do magnetického obvodu boli vložené dve telesá rovnakých rozmerov, s rovnakou vzdialenosťou a natočením voči magnetickým siločiarom obvodu, ale z materiálov s podstatne rozdielnymi hodnotami permeability, väčšinová časť magnetického toku by sa uzatvárala telesom s väčšou permeabilitou, teda najmenším magnetickým odporom.

Na obrázku 1.1a je zobrazený dvojpólový rotor medzi dvoma pólmi statorových elektromagnetov. Po priechode prúdu I stator vytvára magnetický tok, ktorý vedie prevažne rotorom ako dôsledok jeho malého magnetického odporu. Naopak, medzi pólmi rotoru a statoru je vzduchová medzera s niekoľkonásobne väčším odporom. Veľkosť vzduchovej medzery je závislá na natočení rotora, ktorý má preto tendenciu natočiť sa s osou d v smere magnetických siločiar smerujúcich priamo z jedného pólu statora do druhého, čím vytvára moment sily M_s [1],[4].



Obr. 1.1 Dvojpólový rotor: a) počiatkový stav; b) stav po priechode prúdu [2]

1.2 Konštrukcia motora

Reálne reluktančné stroje majú po rokoch vývoja, za účelom dosiahnutia vysokej efektivity a výkonov, komplikovanejšiu konštrukciu. Pri návrhu SynRM je dôležité, aby boli správne navrhnuté parametre vzájomne interagujúceho celku. Na prevedenie jednotlivých častí, ako napríklad stator alebo rotor, je na výber z viacerých možností.

1.2.1 Rotor

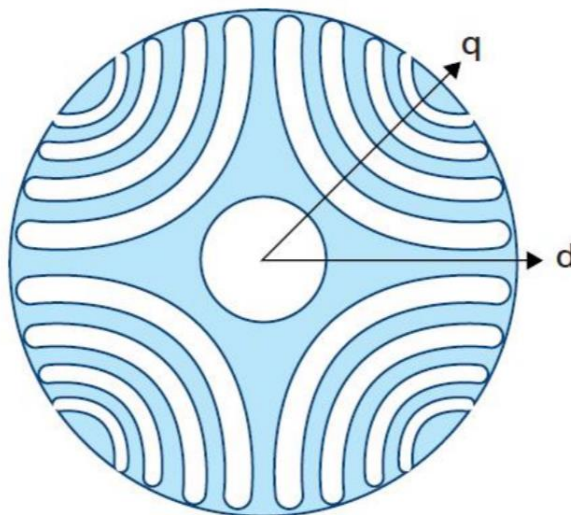
Hlavné parametre určujúce vlastnosti SynRM vychádzajú z pomeru indukčností v pozdĺžnom a priečnom smere – t.j. v ose d a q (vzorec (1.1), obrázok 1.2). Pre dosiahnutie najlepších vlastností je snaha vytvoriť rotor, v ktorom je tento pomer čo najväčší [5].

$$\xi = \frac{L_d}{L_q} \quad (1.1)$$

a maximálny účinník motoru je

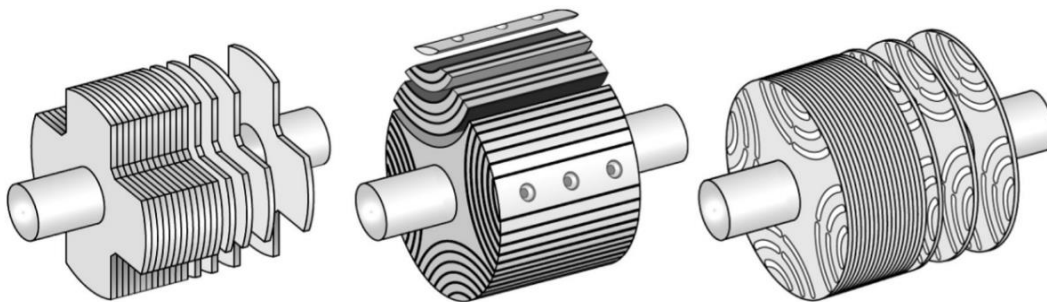
$$(\cos \varphi_1)_{\max} = \frac{\xi - 1}{\xi + 1} \quad (1.2)$$

[21]. Bariéry magnetického toku by mali byť preto čo najhrubšie, ich rozširovanie je však v rozpore s požiadavkou maximálneho toku v smere d osi, pretože by sa danou úpravou tiež zúžila vodivá časť v smere danej osi. Vyrobené sú z ocele, zvyčajne štvorpólové [5].



Obr. 1.2 Rozloženie bariér magnetického toku v rotore [17]

Pri navrhovaní rotora je na výber viacerých známych možností, z ktorých základné sú – rotor s vyjadrenými pólmi, axiálne laminovaný rotor, transverzálne laminovaný rotor (obr. 1.3).



**Obr. 1.3 Rotor: a) s vyjadrenými pólmi b) axiálne laminovaný
c) transverzálne laminovaný [8]**

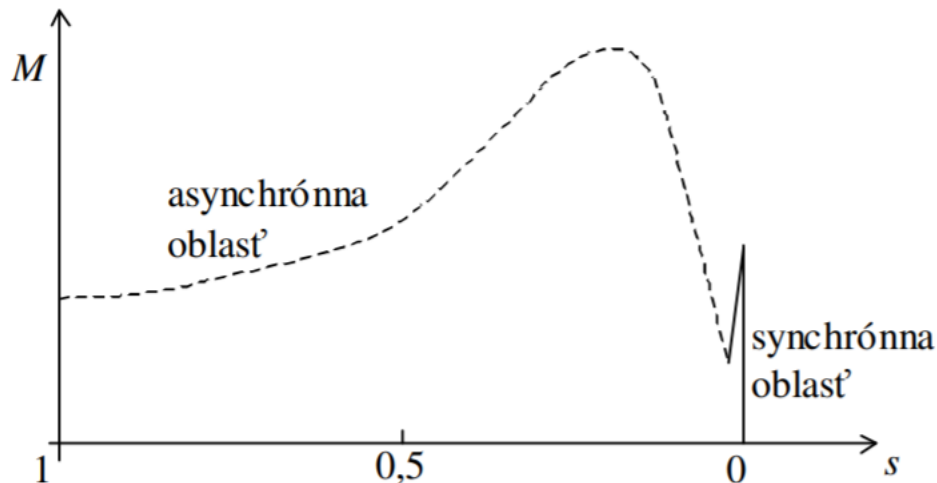
Prvý zo spomínaných je najstarší typ, ktorého prednosťami sú jednoduchý návrh aj výroba. Nevýhodou, a zároveň hlavným dôvodom, prečo sa v dnešnej dobe nepoužíva, je malý pomer reluktancií, a z toho vyplývajúca nízka efektivita [5],[1].

Axiálne laminovaný rotor je zostrojený prekladaním oddelených ocelových plátov vhodným izolačným materiálom, napríklad hliníkovými plechmi, do tvaru písmen U alebo V. Tie sú upevnené na vnútornú časť rotora. Takáto konštrukcia má výrazne lepšie vlastnosti oproti prvému typu a po obnove záujmu o reluktančné motory rozvojom elektroniky, bol výskum venovaný prevažne tomuto prevedeniu. Jeho výroba je však technicky problematická a podobné hodnoty pomeru ξ sú dosiahnuteľné aj priečne laminovaným rotorom, a ekonomicky výhodnejšie [2],[1].

Asymetria reluktancií je v transverzálne laminovanom rotore dosiahnutá vyrazením bariér do plechov, ktoré sú na seba naukladané a upevnené v radiálnom smere, a následne zapuzdrené v hliníkovom obale [2]. Tieto plechy tiež môžu byť jednoducho skosené, za účelom zníženia zvlnenia točivého momentu, čo by v predošlom type bolo len zložito dosiahnuteľné [5],[1]. Toto prevedenie sa nachádza vo väčšine v súčasnosti dostupných modelov.

Prevedenie rotora sa delí tiež na základe prítomnosti, či neprítomnosti kľetkového vinutia. V prípade, keď sa vinutie v rotore nachádza, funguje na rovnakom princípe ako v asynchrónnom motore, kedy sa pôsobením točivého magnetického poľa statora indukuje v rotore prúd. Ten sa v kotve uzatvára a vytvára magnetické pole reagujúce s magnetickým polom statora – na rotore vzniká moment. Motor sa rozbieha so sklzom, až sa jeho otáčky zvýšia na hodnotu blízku synchronným otáčkam. Následne sa otáčky zrovnajú na synchronne – tento jav sa nazýva vpád do synchronizmu – alebo nastane neúspešná synchronizácia a motor sa bude točiť s malým premenlivým sklzom. Podrobnejšie je daná problematika rozobratá v [7].

Hlavnou výhodou a dôvodom použitia tohto typu rotora je možnosť rozbehu priamo zo siete. Rozbeh je sprevádzaný chvením a zvukovými prejavmi, obzvlášť pokiaľ rozbeh prebieha so záťažou. Pomer ξ však dosahuje menších hodnôt ako u bezkietkových prevedení [7]. Charakteristika závislosti momentu na sklze je zobrazená na obrázku 1.4. V charakteristike nie je zohľadnený vplyv rotorovej asymetrie. Ďalej bude v tomto texte opisovaný a rozoberaný iba SynRM s bezkietkovým rotorom.



Obr. 1.4 Charakteristika $M = f(s)$ SynRM s rotorom s kietkou [7]

1.2.2 Stator

Konštrukcia statora je podobná ako u asynchrónneho motora alebo bežných synchronných motorov. Pre obmedzenie strát vírivými prúdmi je zložený z plechov. V nich sú vyrazené drážky, v ktorých je navinuté statorové vinutie, najčastejšie z medi. Začiatky vinutia sú vyvedené na svorky a konce sú spojené do hviezdy alebo do trojuholníka.

Identická štruktúra statora s konvenčnými 3-fázovými motormi uľahčuje vývoj SynRM, jeho implementáciu do používaných systémov a systémov riadenia a v konečnom dôsledku znižuje jeho cenu.

1.2.3 Napájanie a riadenie motora

Aby sa synchronný reluktančný motor mohol pripojiť priamo na sieť, musí byť najprv roztočený na synchronne otáčky. Tento problém sa dá vyriešiť podobne ako u ostatných typov synchronných strojov mechanickým roztočením stroja do synchronných otáčok, napríklad asynchrónnym motorom, avšak tento spôsob je pre väčšinu aplikácií nepraktický a neekonomický, obzvlášť pre malé a stredné

výkony. Ďalším spôsobom je asynchrónny rozbeh pomocou klieťky prítomnej na rotore motora [12].

Praktickým a v dnešnej dobe často používaným riešením je napájať SynRM z frekvenčného meniča. Takýto systém umožňuje plynulý rozbeh aj so záťažou a taktiež pokročilé riadenie a reguláciu otáčok motora. Protiváhou za tieto vlastnosti je cena za samotný menič a teoreticky zvýšená spotreba elektrickej energie na pokrytie strát meniča, a tým pádom nižšia efektívnosť celého systému. Menič tiež zaberá určitý priestor a jeho životnosť je zvyčajne nižšia ako životnosť motora.

Motor môžeme riadiť rôznymi spôsobmi. Jedným z najbežnejších a najjednoduchších je skalárny. Využíva sa predovšetkým v dynamicky menej náročných aplikáciách, v tzv. otvorenej slučke bez spätnej väzby. Toto riadenie je odvodené z rovníc motora v ustálenom stave. Typické použitie je v pumpách, kompresoroch alebo ventilátoroch [10].

Za účelom dosiahnutia najlepších výsledkov sa môže použiť vektorové riadenie motora. To však vyžaduje použitie senzorov natočenia rotora pre zabezpečenie spätnej väzby. Sensory znižujú odolnosť a spoľahlivosť a zároveň zvyšujú cenu. SynRM má však jedinečné vlastnosti, ktoré oproti asynchrónnym alebo spínaným reluktančným motorom významne uľahčujú vyžadované snímanie. Vektorové riadenie sa vyznačuje výrazne lepšími dynamickými vlastnosťami [11].

Princíp fungovania priameho riadenia momentu (DTC – direct torque control) je výpočet odhadu momentu motora a magnetického toku na základe údajov z merania napätia a prúdu v motore. Odhad je následne porovnaný s referenčnými hodnotami. Pri rozdieloch odhadovaných a referenčných hodnôt nachádzajúcich sa mimo dovolené tolerancie je meničom tento rozdiel vyregulovaný. K využitiu DTC metódy nie sú potrebné senzory polohy a napriek tomu sa vyznačuje vysokou presnosťou riadenia rýchlosti otáčok aj momentu [13]. Detailnejší popis princípu fungovania a vlastností je popísaný napríklad v [14].

1.3 Vlastnosti a použitie SynRM

1.3.1 Výhody

Relatívne vysoká efektívnosť, robustnosť, odolnosť a jednoduchosť napájania sú hlavnými prednosťami synchronných reluktančných motorov [17][8].

Absencia elektrického obvodu v rotore znamená, že v rotore nevzniká Joulovo teplo ani straty. Maximálny moment SynRM je však menší v porovnaní s momentom asynchrónneho motora pri napájaní rovnakým prúdom, takže pre splnenie rovnakých požiadaviek je v SynRM potrebný väčší prúd. Väčší prúd vytvára aj väčšie straty, avšak teplo vzniká na statore, ktorého chladenie je

jednoduchšie [15]. Tieto dodatočné straty sú ale stále menšie, ako straty vznikajúce na rotore asynchrónneho stroja. Aj preto pri zachovaní rovnakej veľkosti rámu dosahuje SynRM väčších momentov, ako asynchrónny motor [16].

1.3.2 Nevýhody

Okrem už spomínaných obmedzených možností riadenia je jedným z hlavných nedostatkov technológie malý účinník [8]. Zvlnenie točivého momentu a jeho dôsledky, najmä straty v železe rotora, vibrácie a hluk sú nezanedbateľnými sprievodnými javmi prevádzky motora [6].

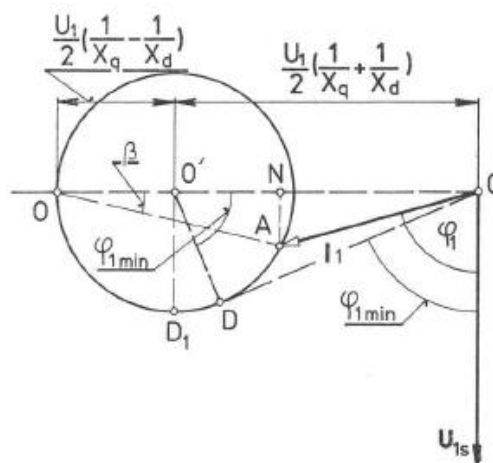
1.3.3 Možnosti použitia

SynRM je vhodné zvoliť najmä v prípadoch, kde pohony napájané z frekvenčného meniča podstatne šetria spotrebu energie, napríklad v aplikáciách s ventilátorovou alebo čerpadlovou zaťažovacou charakteristikou, či v pohonoch výťahov a zdvižných zariadení [20].

Na tému využitia SynRM, ako alternatívu ku konvenčným pohonom v rôznych odvetviach, je zameraných viacero prác a výskumov. Spomedzi mnohých – možnosti použitia pre pohon elektromobilov a hybridných motorových vozidiel sú rozobrané v [18][8], elektricky poháňané lokomotívy v [15], o možnosti použitia v letectve a kozmonautike v [19].

1.4 Popis vlastností SynRM pomocou kruhového diagramu

Kruhový diagram znázorňuje niektoré prevádzkové vlastnosti stroja. Na obrázku 1.5 je zobrazený kruhový diagram so zanedbanými odpormi vinutia.



Obr. 1.5 Kruhový diagram SynRM [9]

Z kruhového diagramu vyplýva:

$$P_1 \approx U_1 \cdot \overline{AN} = U_1 \overline{OA} \sin \beta \quad (1.3)$$

$$\overline{OA} = U_1 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos \beta \quad (1.4)$$

takže maximálny výkon motoru je vyjadrený ako

$$P_{1\max} = m_1 U_1 \overline{D_1 O'} = \frac{m_1 U_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (1.5)$$

a jeho veľkosť vyplýva z polomeru kružnice. Pre každý iný ako maximálny výkon platí:

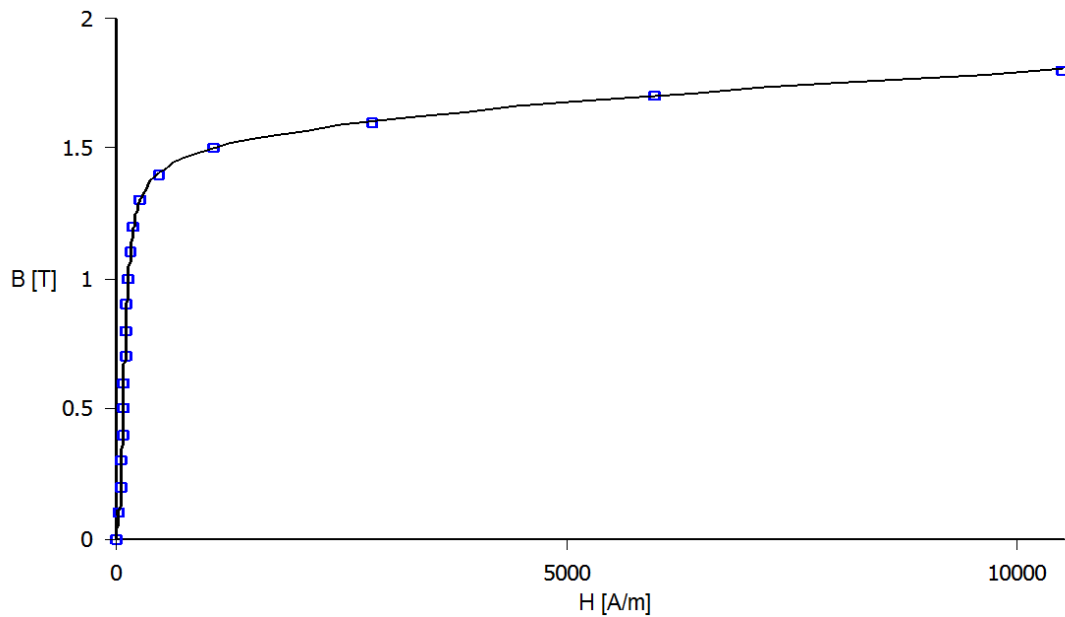
$$P_1 = \frac{m_1 U_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\beta \quad (1.6)$$

Viac k danej téme možno nájsť v [9], odkiaľ sú aj čerpané informácie k tejto podkapitole.

1.4.1 Kruhový diagram motora B

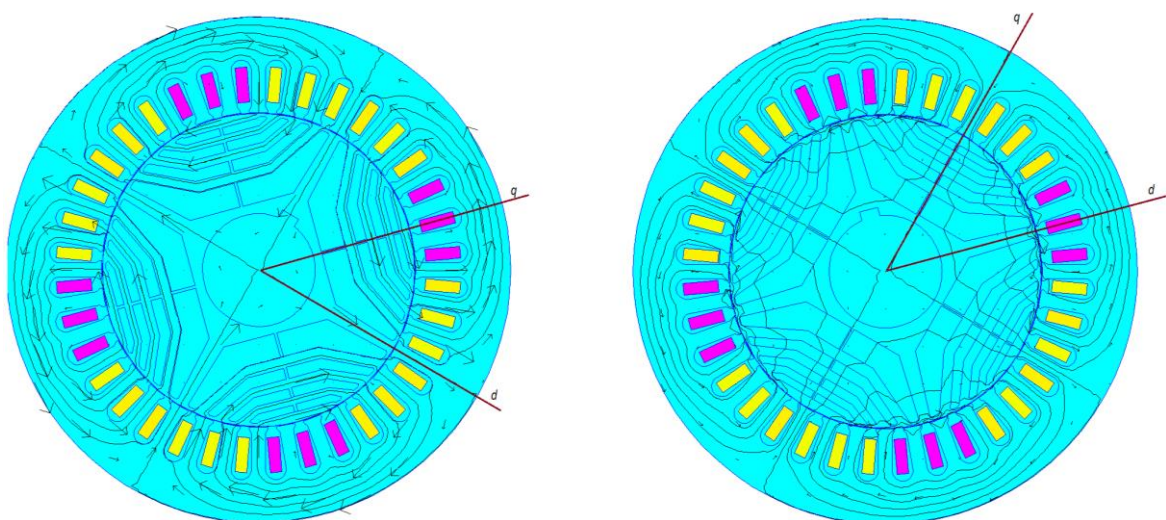
Pri tvorbe kruhového diagramu bol zanedbaný odpor vinutia. Potrebné údaje pre vytvorenie diagramu sú napätie siete a indukčnosť, poprípade reaktancie v smere δ s d a q . Napätie siete je stanovené ako štítková hodnota na motore. Jednotlivé indukčnosti by bolo možné získať zmeraním reaktancií na reálnom motore v dvoch polohách, pri ktorých by bola reaktancia v jednom prípade najväčšia a v tom druhom najmenšia. Ďalšia možnosť, vhodná v prípade, keď nie je k dispozícii zhotovený motor, je vytvorenie virtuálneho modelu daného stroja v jednom z programov vhodných pre túto simuláciu.

Hodnoty indukčností pre tvorbu diagramu motora B boli získané druhou spomínanou metódou, konkrétne v programe FEMM 4.2. Tento program počíta metódou konečných prvkov magnetické a elektrostatické úlohy, alebo tok tepla a prúdov. Pre zistenie indukčností bola vytvorená magnetická úloha, do ktorej boli importované kontúry z dát vo formáte DXF, exportované z modelu motoru vytvoreného v programe ANSYS. Po náprave chybných ohraničení a spojov vzniknutých pri importovaní boli jednotlivým častiam priradené materiály a hustota siete. Bol zadefinovaný materiál pre statorové a rotorové jarmo a vonkajšiemu ohraničeniu statora bola priradená okrajová podmienka. Údaje o použitých plechoch motora s označením M470-50a boli čerpané z „datasheetu“ plechov firmy Cogent z roku 2003. BH krivka tohto materiálu je zobrazená na obrázku 1.6.



Obr. 1.6 BH krivka

Pre zistenie minimálnej a maximálnej indukčnosti bol vykonaný výpočet pre dva rôzne uhly natočenia rotora voči statoru. V prvom prípade os q prechádzala drážkou, ktorou spoločne s jednou jej susednou drážkou z každej strany prechádzal maximálny prúd. Ostatnými tiekol prúd polovičnej veľkosti opačnej polarity. Druhý výpočet prebiehal pri rotore pootočenom o 45° voči prvému prípadu, t. j. drážka s maximálnym prúdom sa nachádzala na osi d . Tieto polohy sú znázornené na obrázku 1.6, spolu s vyznačenými osami. Drážky statora, ktorými tečú amplitúdy prúdov, sú vykreslené ružovou, v obrázku sú tiež znázornené vektory magnetickej indukcie a čiary magnetického toku.



Obr. 1.7 Polohy rotora v programe FEMM

Reálny motor je napájaný sínusovým napätím s približne konštantnou hodnotou amplitúdy. Zo zákona elektromagnetickej indukcie sa pre harmonické napätia dá odvodiť rovnica pre výpočet spriahnutého magnetického toku

$$\psi_{kr\max} = \frac{U_{fk\max}}{\omega_{kr}} \quad (1.7)$$

a pre fázové napätie 230 V a frekvenciu 50 Hz je jeho hodnota

$$\psi_{kr\max} = \frac{230 \cdot \sqrt{2}}{2\pi \cdot 50} \cong 1,035 \text{ Wb} \quad (1.8)$$

Vzhľadom k faktu, že vinutie modelu vo FEMM-e je napájané zdrojom striedavého prúdu, a nie napäťovým zdrojom, ktoré by udržovalo konštantný tok, je potrebné veľkosť zadávaného prúdu upraviť hodnotu, pri ktorej je v obvode daný tok 1,035 Wb.

Po skončení analýzy úlohy boli odčítané výsledky pre jednotlivé polohy: $L_{dkr} = 0,43412$ H a $L_{qkr} = 0,05243$ H. Pomer týchto indukčností je podľa vzorca 1.1

$$\xi_{kr} = \frac{0,43412}{0,05243} = 8,28 \quad (1.9)$$

z čoho sa vypočíta maximálny účinník podľa 1.2 ako

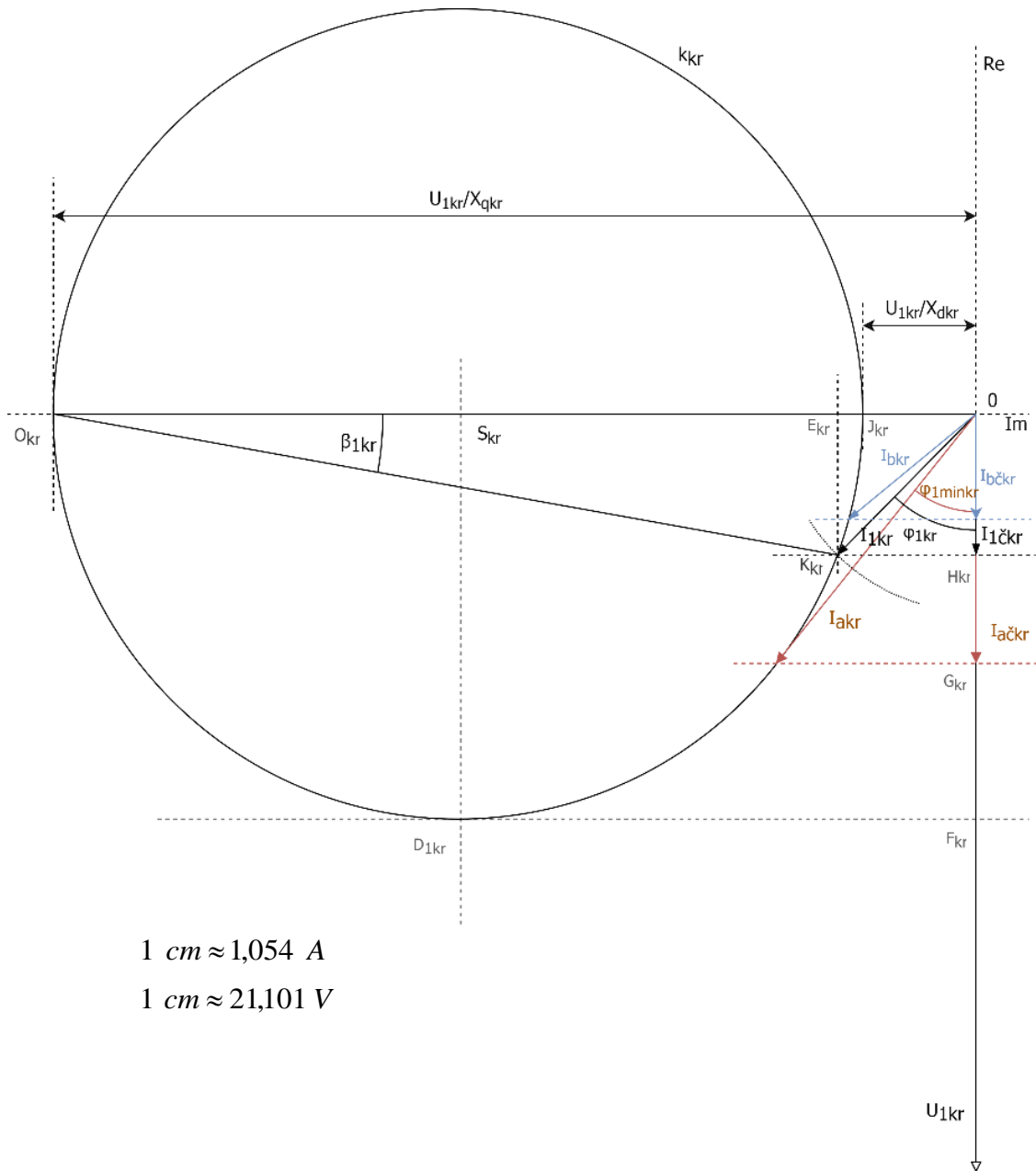
$$(\cos\varphi_{lkr})_{\max} = \frac{8,28 - 1}{8,28 + 1} = 0,784 \quad (1.10)$$

Zo známych indukčností a frekvencie siete 50 Hz sa vypočítajú reaktancie:

$$X_{dkr} = \omega_{kr} \cdot L_{dkr} = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,43412 = 136,383 \Omega \quad (1.11)$$

$$X_{qkr} = \omega_{kr} \cdot L_{qkr} = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,05243 = 16,471 \Omega. \quad (1.12)$$

Polomer a vzdialenosť kružnice k_{kr} od počiatku komplexnej roviny je daný podielom fázového napätia U_{lkr} o veľkosti 230 V a reaktancií v smeroch osí d a q . Toto napätie je vynesené do zápornej reálnej osi. Kruhový diagram motora B so zanedbaním odporu vinutia je vykreslený na obr. 1.7. Mierka diagramu sa pre rôzne veličiny líši. Jednému centimetru fázoru napätia odpovedá 21,101 V a pre prúdové veličiny 1 cm predstavuje 1,054 A.



Obr. 1.8 Kruhový diagram motora B

Dotyčnica kružnice v zápornom reálnom kvadrante prechádzajúca nulou zvierá s napätím uhol φ_{1minkr} , ktorého veľkosť je odčítaním z výkresu približne 39° , pričom z výpočtu účinníka sa dá určiť jeho presná veľkosť – $38^\circ 22'$.

Podľa rovnice 1.5 je

$$P_{1maxkr} = \frac{3 \cdot 230^2}{2} \cdot \left(\left| \frac{1}{136,383} - \frac{1}{16,471} \right| \right) = 4235,74 \text{ W} \quad (1.13)$$

Nezahŕňajúc straty motora, na dosiahnutie výkonu 1100 W by bol potrebný činný prúd

$$I_{bckr} = \frac{1100}{m_{kr} \cdot U_{1kr}} = \frac{1100}{3 \cdot 230} = 1,594 \text{ A}, \quad (1.14)$$

a po vynesení na reálnu os je bod vzniknutý v prieniku priamky prechádzajúcej vrcholom $I_{bčkr}$, kolmej na túto os, a kružnice k_{kr} vrcholom novovzniknutého fázoru I_{bkr} . Jeho veľkosť odčítaná z diagramu je 2,515 A.

Pri očakávanom nominálnom prúde 3 A by činná zložka tohto prúdu, $I_{1čkr}$, tvorila 2,14 A a veľkosť účinníka je

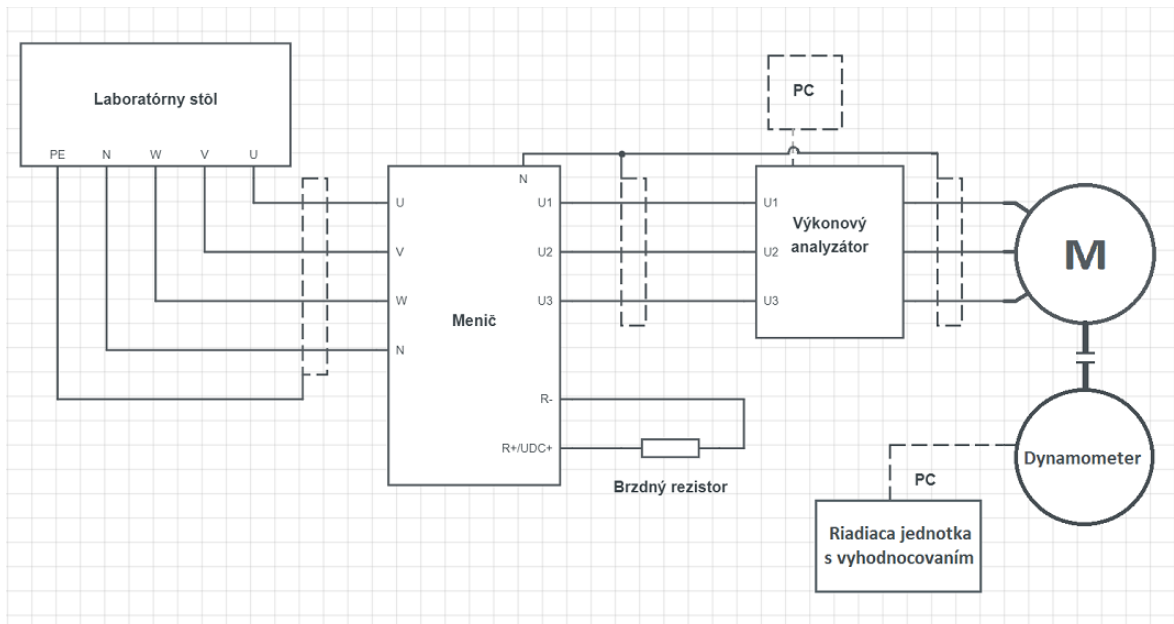
$$\cos\varphi_{1kr} = \frac{I_{1čkr}}{I_{1kr}} = \frac{2,14}{3} = 0,713. \quad (1.15)$$

Veľkosť záťažný uhla β_{1kr} bola odčítaním z diagramu určená približne ako 10° . Je zjavné, že hodnoty zistené touto metódou sú okrem chýb metódy (chýb spôsobených zjednodušením problému) zaťažené tiež chybou spôsobenou nepresnosťami pri rýsovaní a následnom odčítavaní parametrov z diagramu. S prihliadnutím na tieto fakty nemožno výsledky metódy považovať presné, a ich charakter je skôr informatívny.

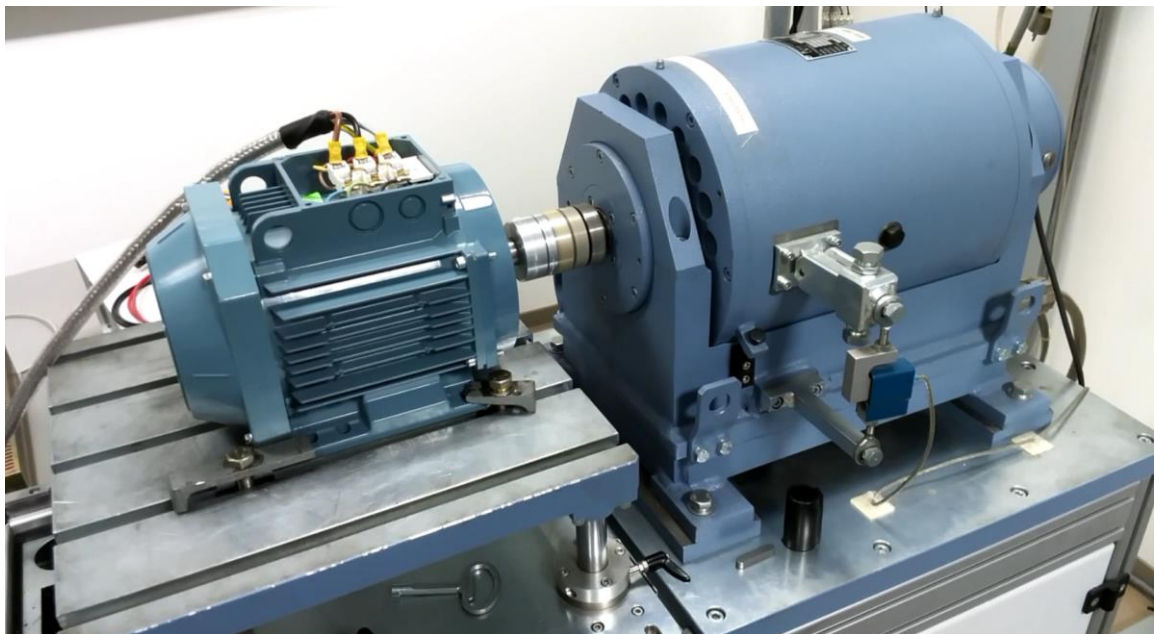
2 MERANIE ZADANÝCH VZORKOV MOTOROV

2.1 Príprava pracoviska a zapojenie

Meranie prebiehalo v laboratóriu na UVEE FEKT VUT na Technickej 12 v Brne. Motor bolo treba mechanicky spojiť s hriadel'ov dynama, čo bolo vykonané zamestnancom VUT. Medzi menič a motor bol zapojený výkonový analyzátor, z ktorého boli údaje prenášané do osobného počítača. Prepojenia boli prevedené tienenými káblami, ktorých konce boli pred pripojením upravené, za účelom ich správneho a bezpečného pripojenia na svorky jednotlivých zariadení. Menič bol napájaný z laboratórneho stola, t.j. bol pripojený na 5-pólovú zásuvku s napätím 400 V. Zjednodušená schéma zapojenia je znázornená na obrázku 2.1. Fotografia inštalovaného motora A na pracovisku je na obrázku 2.2.



Obr. 2.1 Zjednodušená schéma



Obr. 2.2 Zapojený motor (stroj vľavo) na pracovisku

2.2 Nastavenie meniča

2.2.1 Hardware

Vzorky motorov boli napájané frekvenčným meničom ACS880-01-017-A-3 vyrobeným vo fínsku spoločnosťou ABB. Okrem napájania na vstupných, a analyzátoru na výstupných svorkách, sa k meniču pripojil aj brzdňý rezistor

s brzdným výkonom 1 kW. Výstupy na meniči 3 (IN1) a 4 (IN2) sú spojené s výstupom 1 (OUT1) na svorkovnici XSTO, inak by sa motor nerozbehol. Prepojené sú taktiež výstupy 1 (DIIL) a 2 (+24VD) na svorkovnici XD24, podľa manuálu meniča k rýchlej inštalácii.

2.2.2 Software

Menič je ovládateľný priamo na panely alebo pomocou počítača na diaľku. Bol zvolený prvý spôsob. V rozhraní ovládania bola nastavená možnosť typu motora SynRM. Možnosti riadenia sú na výber dve – priame riadenie momentu a skalárne riadenie. Pri identifikačnom chode motora v DTC móde dochádzalo k chybe a v tomto režime motor nevytváral takmer žiadny moment (v rozbehnutom stave pri polovičných otáčkach). Bol zvolený režim skalárneho riadenia motora, pre oba motory. Parametre samotného motora sa nastavili pred meraním jednotlivých motorov, zvlášť pre každý jeden.

2.3 Parametre motorov

K dispozícii boli dve vzorky motorov, jeden od komerčného výrobcu, bežne dostupný na trhu (v texte bude ďalej označovaný „motor A“). V prípade druhej vzorky sa jedná o motor navrhnutý na VUT pre výskumné účely – produkt nie je vyrobený, za účelom reálneho používania v praxi („motor B“). Bol zostrojený z navrhnutého a vyrobeného rotora pre reluktančné motory, ktorý je vložený v statore, pôvodne asynchrónneho motora s vyňatým rotorom.

Oba motory majú rotory s tranzverzálne laminovanými plechmi a boli zapojené do hviezdy, pričom motor B umožňoval aj zapojenie do trojuholníka. Konkrétne parametre a menovité hodnoty sú v tabuľke 2.1, avšak parametre pre motor B nie sú parametre meraného reluktančného motora, ale pôvodného asynchrónneho motora, z ktorého je z časti zložený. Tieto hodnoty boli nastavené v meniči ako nominálne, s výnimkou otáčok, ktoré boli nahradené hodnotou 1500, a taktiež nominálny prúd, ktorého hodnota bola zadaná väčšia. Zmena bola vykonaná z dôvodu rozdielnej konštrukcie asynchrónneho a reluktančného motoru, kedy na vytvorenie rovnakého momentu pri zachovaní ostatných vlastností je potrebné, aby v druhom spomínanom tiekol v statorovom vinutí väčší prúd.

Tab. 2.1 Štítkové parametre pre motor A a pôvodný asynchrónny motor

motor A		motor B	
Typ zapojenia:	3~f, Y	Typ zapojenia:	3~f, Y/D
Menovité napätie:	380 V	Menovité napätie:	400/230 V
Menovitá frekvencia:	100 Hz	Menovitá frekvencia:	50 Hz
Menovitý výkon:	2,2 kW	Menovitý výkon:	1,1 kW
Menovitý prúd:	5,6 A	Menovitý prúd:	2,6/4,5 A
Menovité otáčky:	3000 ot/min	Menovité otáčky:	1430 ot/min
Menovitá účinnosť:	85,9%	Menovitá účinnosť:	81,4%
Trieda izolácie:	F	Trieda izolácie:	F
Typ ochrany:	IP 55	Typ ochrany:	IP 55
Typ prevádzky:	S9	Typ prevádzky:	S1
Maximálne otáčky:	3600 ot/min	Účinník:	0,75
Hmotnosť:	13 kg		

2.4 Meranie

2.4.1 Postup merania

Po zabezpečení správneho a bezpečného chodu bolo uskutočnené meranie. Výkonovým analyzátorom boli merané elektrické veličiny vystupujúce z meniča a na riadiacej jednotke dynamometra sa odčítavali otáčky a točivý moment na hriadelí. Hodnoty sa zaznamenávali do tabuľky v počítači, pričom hodnoty z analyzátora boli prenášané elektronicky a hodnoty na dynamometri boli zaznamenávané ručne.

Pre každý bod merania sa urobilo 10 (± 1) záznamov, z ktorých bol pre každú veličinu vypočítaný priemer. Spriemerované hodnoty niektorých zo zmeraných veličín sú v tabuľkách 2.2 a 2.3. Priemer bol vypočítaný podľa vzorca:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} X_i}{n_c} \quad (2.1)$$

Pred samotným meraním sa motor spustil a bežal na nominálnych otáčkach zaťažený nominálnym momentom, kým nedosiahol stav ustáleného oteplenia. Následne prebehlo meranie, pričom na meniči sa nastavovali otáčky a dynamometrom sa nastavoval záťažový moment.

2.4.2 Podmienky a použité prístroje

Meranie bolo rozdelené a prebehlo v dvoch rôznych časoch. Podmienky počas merania motora A boli nasledovné: teplota okolia 23,2 °C; relatívna vlhkosť 19 %. V druhej časti, počas merania motoru B, bola teplota rovná 22 °C a relatívna

vlhkosť bola na úrovni 19,3 %. Zoznam použitých prístrojov a niektorých ich údajov je v tabuľke 2.2.

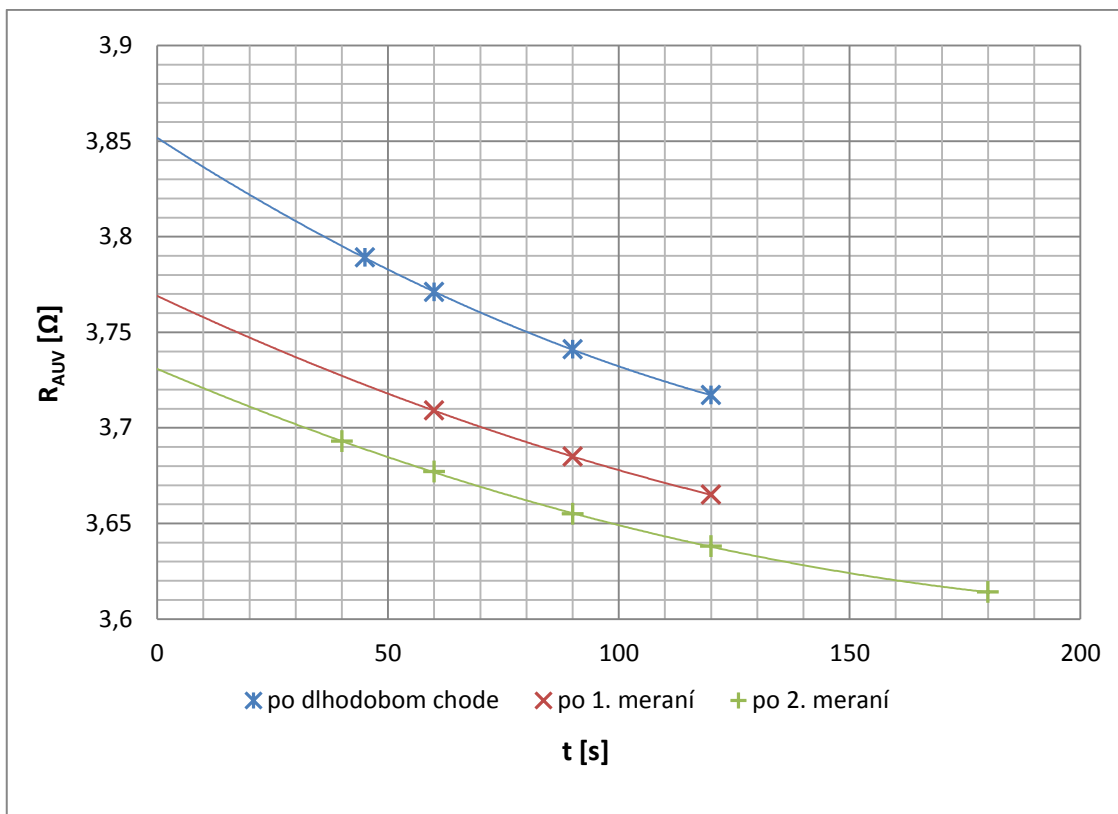
Tab. 2.2 Použité prístroje

typ prístroja	Výrobca	model	vybrané vlastnosti	výrobné č.	evidenčné č.
Teplomer s vlhkomerom	FLUKE	971			162572
PC	IBM	ThinkPad T41	nainštalovaný program WTVIEWER		122440
Brzdny rezistor	CONTROL TECHNIQUES		$P_n = 1 \text{ kW}$, $U_n = 500 \text{ V}$, $R = 2 \times 61 \ \Omega$		
Mikroohmmeter	CROPICO	DO5001			318188
Stopky	RUTLAND	Sport			
Výkonový analyzátor	YOKOGAWA	WT1800		91N511405	
Dynamometer	Veus	ASD 6, 3K-4	výkon 6,3 kW	130819	316632
Riadiaca jednotka s meraním	Veus	M350		036054	
Laboratórny stôl	DIAMETRAL	Variolab 686		1600077	
Stojan na meranie					260701
Multimeter	KEITHLEY	2000-20		754890	

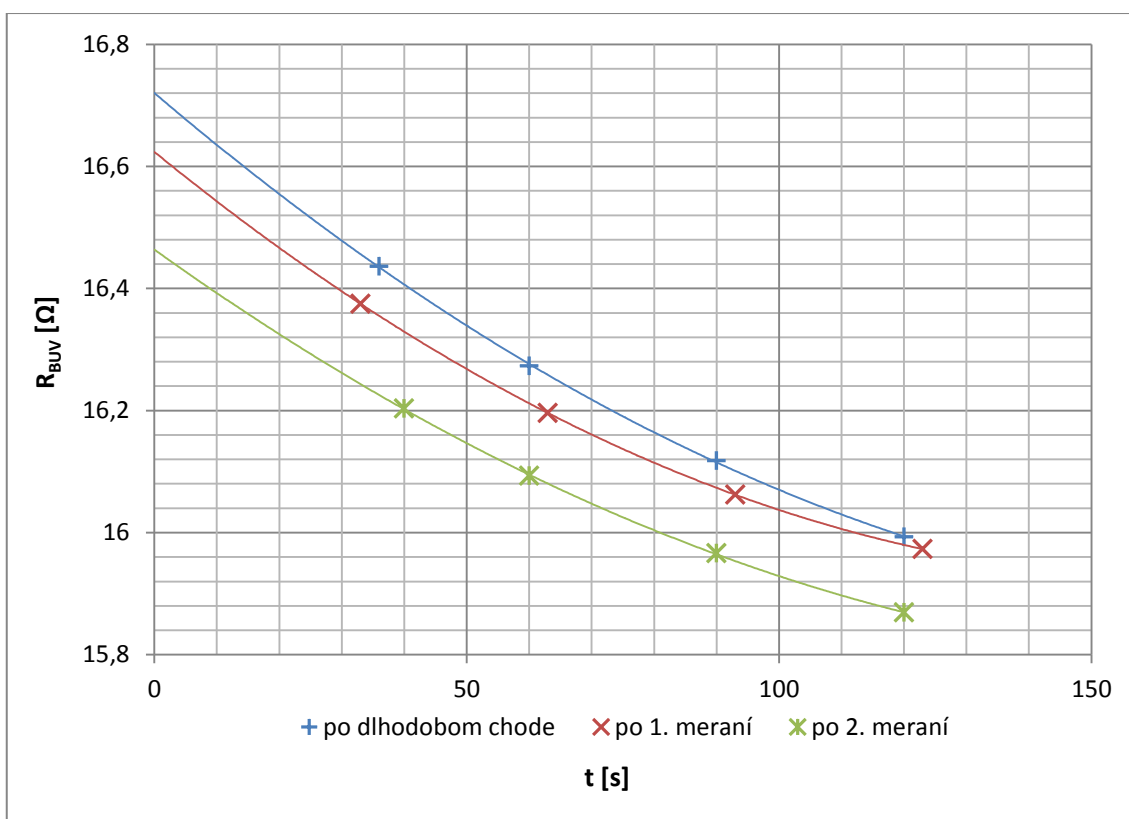
2.4.3 Meranie odporu a teploty vinutia

Po každom premeraní motora (A alebo B), v bodoch určených obidvoma normami, bol motor odpojený od meniča a bol zmeraný odpor jeho vinutia. Odpor sa meral medzi svorkami U a W, pričom sa meral čas od vypnutia motora a meranie prebehlo niekoľko krát v rôznom čase. Odpor bol taktiež zmeraný za studena a po ustálenom oteplení, pred prvým meraním.

Do grafu bola vynesená závislosť veľkosti odporu od času, ktorý uplynul od vypnutia motora. Závislosť bola preložená polynómom a extrapolovaná do nuly. Z troch vypočítaných hodnôt pre každý motor, sa za odpor v ustálenom prevádzkovom stave, považuje ten, ktorý bol zmeraný a vypočítaný po dlhodobom neprerušovanom chode.



Obr. 2.3 Graf závislosti odporov vinutia motora A na čase od vypnutia



Obr. 2.4 Graf závislosti odporov vinutia motora B na čase od vypnutia

Vzhľadom k tomu, že motory sú zapojené do hviezdy, zmerané odpory sú súčtom odporov dvoch vinutí. Veľkosti odporov medzi každou svorkou motora boli zmerané, keď mali vinutia teplotu okolia. Z troch rovníc o troch neznámych boli vypočítané odpory jednotlivých fáz za studena a prepočítané na hodnotu pri ustálenom chode, vid' tabuľka 2.2.

Tab. 2.3 Odpory na jednotlivých fázach

	teplota	R_U	R_V	R_W	R_{priem}
		[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
motor A	okolia	1,591	1,594	1,594	1,593
	v ustálenom chode	1,924	1,928	1,928	1,926
motor B	okolia	6,885	6,956	6,925	6,922
	v ustálenom chode	8,318	8,403	8,366	8,362

Motor B je vybavený senzorom teploty KTY-84 130, ktorý sa pripojil na multimeter. V každom bode merania bola zmeraná hodnota odporu tohto senzora. Z údajov z 2. merania je zrejmé, že vinutie dosahovalo väčšie teploty pri polovičných otáčkach v porovnaní s behom zaťaženým polovičným momentom pri zachovaní rovnakej hodnoty výkonu. Je to jednak dané väčším prúdom, ktorý prechádza vinutím pri väčšom momente, a tiež je to spôsobené tým, že rýchlosť otáčania vetracích lopatiek, a tým aj účinnosť chladenia, je priamo úmerná otáčkam motora. Toto tvrdenie podporujú aj údaje merania elektrických veličín výkonovým analyzátorom.

Najvyššia zmeraná teplota bola 81 °C, avšak v dôsledku nepresnosti senzora a merania sa táto hodnota blíži k reálnej len približne. Ustálená teplota v nominálnom chode zmeraná senzorom bola o 2,5 °C menšia.

Teplota sa tiež vypočíta podľa vzorca:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta\vartheta), \quad (2.2)$$

pričom

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0, \quad (2.3)$$

kde α je teplotný súčiniteľ elektrického odporu a jeho hodnota pre meď je rovná $3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Po úprave vzorca a dosadení údajov z merania odporu motora B je teplota vinutia v ustálenom stave vypočítaná:

$$\vartheta = \frac{R_{priemu} - R_{priem0}}{R_{priem0} \cdot \alpha} + \vartheta_0 = \frac{8,362 - 6,922}{6,922 \cdot 3,92 \cdot 10^{-3}} + 22 = 75,07 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.4)$$

Pre motor A je rovnakým spôsobom zistená teplota $\vartheta = 76,53 \text{ } ^\circ\text{C}$. Tieto teploty sú nižšie ako maximálne dovolené teploty počas prevádzky.

2.4.4 Výpočet účinností, strát a ich rozloženie

V tabuľkách 2.4 a 2.5 sú zobrazené vypočítané hodnoty (označené bielym pozadím) účinností a strát z nameraných údajov (šedé pozadie).

Tab. 2.4 Zmerané a vypočítané hodnoty z merania motora A

	U_{RMS}	I_{RMS}	P_1	S_1	λ	f	n	M_{dyn}	M_{real}	P_2	η	ΔP_{celk}	ΔP_{j1}	ΔP_{ine}
	[V]	[A]	[W]	[VA]	[-]	[Hz]	[ot/min]	[Nm]	[Nm]	[W]	[%]	[W]	[W]	[W]
1. meranie														
1.	436,49	5,53	2536,2	4184,0	0,61	100	3000	7,00	6,90	2166,4	85,42	98,5	177,0	192,8
2.	435,01	6,70	3181,1	5049,1	0,63	100	3000	8,75	8,65	2717,5	85,43	123,6	259,5	204,1
3.	434,82	6,19	2909,4	4665,0	0,62	100	3000	8,06	7,96	2499,5	85,91	113,7	221,7	188,3
4.	438,26	4,50	1888,3	3412,8	0,55	100	3000	5,25	5,15	1616,7	85,62	73,5	116,8	154,8
5.	439,84	3,67	1283,1	2792,8	0,46	100	3000	3,51	3,41	1070,0	83,40	48,7	77,7	135,3
6.	441,03	3,05	699,0	2327,5	0,30	100	3000	1,76	1,66	520,2	74,43	23,7	53,7	125,1
2. meranie														
1.	436,60	5,53	2530,3	4178,1	0,61	100	3000	7,00	6,90	2166,4	85,62	363,8	176,4	187,4
2.	439,14	3,68	1294,4	2799,3	0,46	100	3000	3,52	3,41	1071,6	82,79	222,8	78,3	144,5
3.	310,39	5,57	1346,4	2993,3	0,45	50	1500	7,00	6,90	1083,2	80,45	263,1	179,1	84,0
4.	312,07	3,60	674,7	1943,9	0,35	50	1500	3,51	3,41	535,0	79,29	139,7	74,8	65,0
5.	313,30	2,98	369,9	1619,1	0,23	50	1500	1,76	1,66	260,1	70,32	109,8	51,5	58,3

Tab. 2.5 Zmerané a vypočítané hodnoty z merania motora B

	U_{RMS}	I_{RMS}	P_1	S_1	λ	f	n	M_{dyn}	M_{real}	P_2	η	ΔP_{celk}	ΔP_{j1}	ΔP_{ine}
	[V]	[A]	[W]	[VA]	[-]	[Hz]	[ot/min]	[Nm]	[Nm]	[W]	[%]	[W]	[W]	[W]
1. meranie														
1.	452,03	2,96	1376,7	2317,4	0,59	50	1500	7,00	6,92	1087,0	78,96	289,7	219,8	69,9
2.	451,37	3,46	1735,2	2703,8	0,64	50	1500	8,75	8,67	1361,9	78,49	373,3	300,1	73,3
3.	451,20	3,24	1586,3	2534,1	0,63	50	1500	8,06	7,98	1253,5	79,02	332,8	263,8	69,0
4.	453,47	2,55	1037,0	1999,8	0,52	50	1500	5,27	5,19	815,2	78,62	221,8	162,6	59,1
5.	454,33	2,23	716,7	1755,3	0,41	50	1500	3,51	3,43	538,8	75,18	177,9	124,8	53,1
6.	455,31	2,02	411,3	1594,9	0,26	50	1500	1,76	1,68	263,9	64,17	147,4	102,6	44,8
2. meranie														
1.	451,89	2,97	1382,4	2322,9	0,60	50	1500	7,03	6,96	1093,3	79,08	289,1	221,0	68,2
2.	454,14	2,24	724,0	1759,5	0,41	50	1500	3,53	3,46	543,5	75,07	180,5	125,5	55,0
3.	320,71	2,98	797,3	1657,6	0,48	25	750	7,01	6,94	545,1	68,36	252,2	223,4	28,8
4.	321,96	2,10	401,8	1172,4	0,34	25	750	3,51	3,44	270,2	67,23	131,7	110,9	20,8
5.	322,21	1,92	244,5	1072,3	0,23	25	750	1,76	1,69	132,7	54,29	111,8	92,6	19,2

Nasledujúce výpočty reprezentujú výpočet 1. riadku tabuľky 2.4:
Zmeraný moment na dynamometri vyžadoval korekciu.

$$M_{REAL} = M_{dyn} - M_{off} = 7 - 0,104 = 6,896 \text{ Nm} \quad (2.5)$$

Z tohto momentu sa vypočíta výkon na hriadelí:

$$P_2 = M_{REAL} \cdot \omega = M_{REAL} \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60} = 6,896 \cdot 2\pi \cdot \frac{3000}{60} = 2166,442 \text{ W} \quad (2.6)$$

$$\eta_{\%} = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{2166,442}{2536,245} \cdot 100 = 85,42 \text{ \%} \quad (2.7)$$

Vypočítaná účinnosť je účinnosťou iba samotného motora, nezahŕňa v sebe účinnosť meniča. Celkové straty sa vypočítajú ako:

$$\Delta P_{celk} = P_1 - P_2 = 2536,245 - 2166,442 = 369,803 \text{ W} \quad (2.8)$$

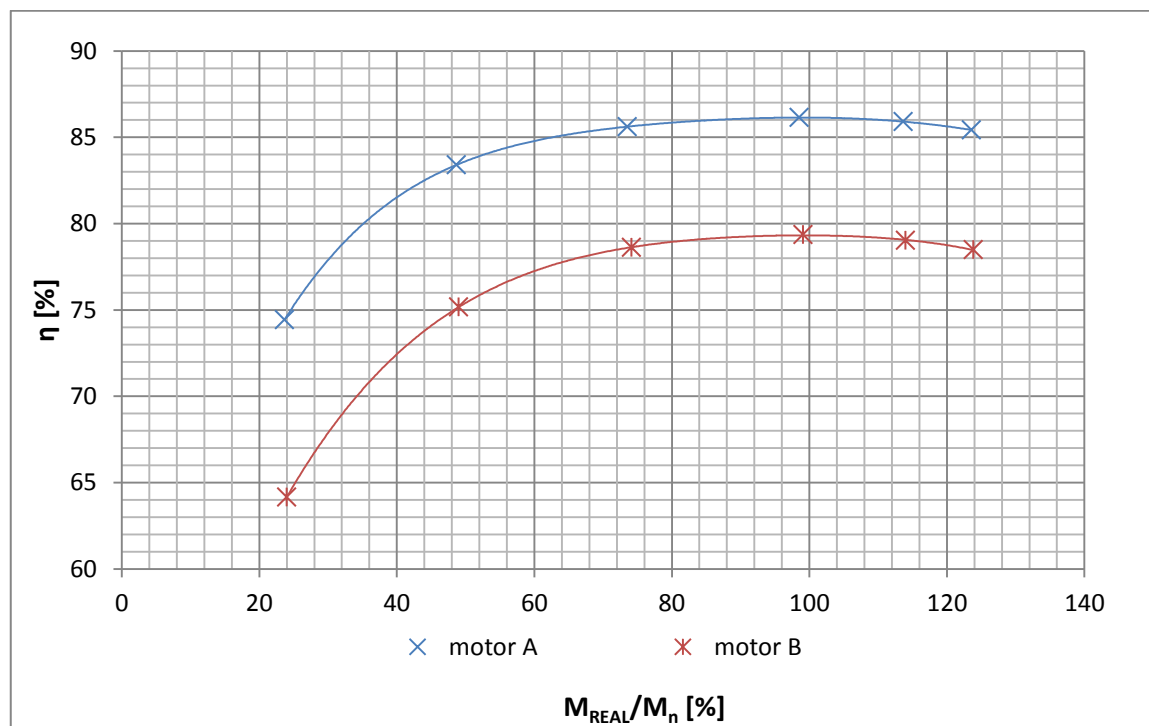
Z toho straty vo vinutí statora sú:

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_{priemu} \cdot I_{RMS}^2 = 3 \cdot 1,926 \cdot 5,534^2 = 176,952 \text{ W} \quad (2.9)$$

Súčet strát v železe, mechanických a dodatočných, ΔP_{ine} je potom:

$$\Delta P_{ine} = \Delta P_{celk} - \Delta P_{j1} = 369,803 - 176,952 = 192,851 \text{ W} \quad (2.10)$$

Hodnoty strát, v tabuľke písané šedou farbou, sú takto označené z dôvodu ich výraznej nepresnosti. Tá je spôsobená neznalosťou presnej teploty a odporu vinutia pri danom zaťažení. Údaje slúžia iba na znázornenie približného rozloženia strát. Závislosť účinnosti na percentuálne vyjadrenom pomere momentu a nominálneho momentu pre motor A aj B je vynesená v grafe na obrázku 2.5.



Obr. 2.5 Graf závislosti účinnosti na momente

Z grafu je zrejmé, že oba motory majú najvyššiu účinnosť v oblasti okolo nominálnych momentov.

2.4.5 Obsah normy

Body, v ktorých prebiehalo meranie, sú rovnaké pre obidva motory a sú určené podľa normy ČSN EN 60034-30-1: „Třídy účinnosti střídavých motorů provozovaných ze sítě“; a návrhom normy: Triedy účinností asynchronných motorov s premennými otáčkami („Efficiency classes of variable speed AC motors“) IEC 60034-30-2 TS Ed.1. Tento návrh je určený pre asynchrónne motory, avšak je možné ho využiť aj pre iné typy motorov s premennými otáčkami. Prvá spomínaná norma zase neplatí okrem iného pre:

- motory s typom prevádzky S2, S3<80%, S4 až S9,
- motory vyrobené výhradne pre napájanie z meničov podľa IEC 60034-25.

Keďže merané vzorky spadajú do týchto kategórií, nemôžu niesť označenie zaraďujúce ich do jednej z tried, ktoré norma definuje. Meranie sa preto riadi normou iba informatívne.

Normy rozdeľujú motory do tried podľa účinnosti, pričom sú rozdielne v závislosti od nominálneho výkonu pri nominálnom točivom momente a otáčkach, a od nominálnych otáčok. Triedy účinností sú nasledovné:

- IE1 – štandardná účinnosť (Standard)
- IE2 - zvýšená účinnosť (High)
- IE3 - vysoká účinnosť (Premium)
- IE4 - veľmi vysoká účinnosť (Super-Premium),

resp. triedy IE1V, IE2V, IE3V, IE4V pre motory s premennými otáčkami. Do budúcnosti sa tiež predpokladá existencia triedy IE5, ktorá sa bude vyznačovať ešte vyššou účinnosťou ako IE4.

2.4.6 Zhodnotenie merania

Motor A dosahoval pri chode v nominálnych hodnotách účinnosť 85,42 %. Podľa návrhu normy IEC 60034-30-2 TS Ed.1. by pre svoju kategóriu výkonu a otáčok spadal do triedy IE2V.

Motor B mal v porovnaní s prvým nižšiu účinnosť, čo je z časti dané jeho menším nominálnym výkonom, keďže menšie a výkonovo slabšie motory dosahujú nižšiu účinnosť. Tento motor však ani vo svojej kategórii nespĺňal požiadavky na zaradenie do jednej z tried – teda jeho kombinovaná účinnosť podľa návrhu normy IEC 60034-30-2 TS Ed.1. je nižšia ako minimálna požadovaná pre IE1V.

V prevádzke s nastavenými nominálnymi hodnotami však dosahoval účinnosť 78,96 % a podľa ČSN EN 60034-30-1 by spadol do triedy IE1. Je zrejmé, že motor nie je vhodný na použitie ako pohon s premenlivou rýchlosťou otáčania a záťažou. Keďže od 1. januára 2017 je stanovená minimálna trieda účinnosti IE3 pre motory s výkonom od 0,75 kW do 375 kW , resp. IE2V pre motory napájané frekvenčným meničom, tento motor by nemohol byť uvedený na trh v štátoch Európskeho hospodárskeho priestoru.

Nízka účinnosť môže byť spôsobená viacerými faktormi. Jeden z dôvodov môže byť, že motor nebol optimalizovaný a jeho vývoju nebolo venované také množstvo času, aké je bežné u sériovo vyrábaných strojov. Samotný bod merania, v ktorom sa moment považuje za nominálny, môže byť posunutý a meraním pri väčšom alebo menšom výkone by sa mohli dosiahnuť lepšie výsledky. Taktiež vzhľadom k tomu, že stator nebol navrhnutý na takýto druh prevádzky a tiekol ním väčší prúd ako na ktorý bol konštruovaný, vznikajú na odporoch vinutí výrazné Joulove straty. Napríklad je to 124,2 % veľkosti strát vo vinutí motora A, pričom ten má dvojnásobný výkon.

Celé meranie mohlo byť zaťažené chybou spôsobenou nepresnosťou prístrojov, zaokrúhľovaním a bolo ovplyvnené okolitými podmienkami v danom čase.

3 MODEL SYNRM V PROGRAME ANSYS MAXWELL

3.1 Popis programu

3.1.1 ANSYS a ANSYS Maxwell

ANSYS je viacúčelový software používaný na simuláciu interakcií objektov, polí a ich vlastností z rôznych disciplín fyziky – štruktúra a konštrukcia, vibrácie, tekutiny, prenos tepla a elektromagnetizmus a iné.

Program ANSYS Maxwell dokáže okrem iného počítať metódou konečných prvkov elektrické, magnetické, mechanické a tepelné veličiny a ich rozloženie vo vytvorenom modeli a tiež v čase. Hlavnou výhodou simulácie je možnosť virtuálneho testovania, ktoré je ekonomicky výhodnejšie ako produkcia prototypu. Taktiež detekcia a vylepšenie rizikových miest a predikcia možných problémov je realizovateľná v 2D a 3D prostredí programu [22].

3.1.2 RMXprt

RMXprt slúži na tvorbu modelov elektrických motorov a generátorov na základe dostupných alebo požadovaných parametrov daných strojov. Použitím klasickej analytickej teórie motorov a metódy ekvivalentných magnetických obvodov vie program RMXprt počítať výkon stroja, rozhodnúť o počiatočných rozmeroch a vykonať viaceré analýzy potrebné k zaisteniu funkčnosti a voľbe čo najideálnejších parametrov.

Jednou z hlavných výhod tejto súčasti je možnosť automatického vytvorenia a nastavenia projektu programu Maxwell 3D/2D. Toto zahŕňa ako geometriu strojov, tak aj materiály, z ktorých sú jednotlivé časti zhotovené, okrajové podmienky a iné vlastnosti [A].

3.2 Tvorba modelu motora B

Prvotný model bol vytvorený v súčasti RMXprt, na základe údajov z technickej dokumentácie k danému motoru. Nakoľko verzia programu 16 nemá implementovanú funkciu pre návrh SynRM, bol pre počiatočný návrh zvolený návrh asynchrónneho motora. To bolo možné vykonať z dôvodu rovnakého princípu fungovania statoru SynRM a asynchrónneho motora (v praxi sa reálne konštrukcie líšia).

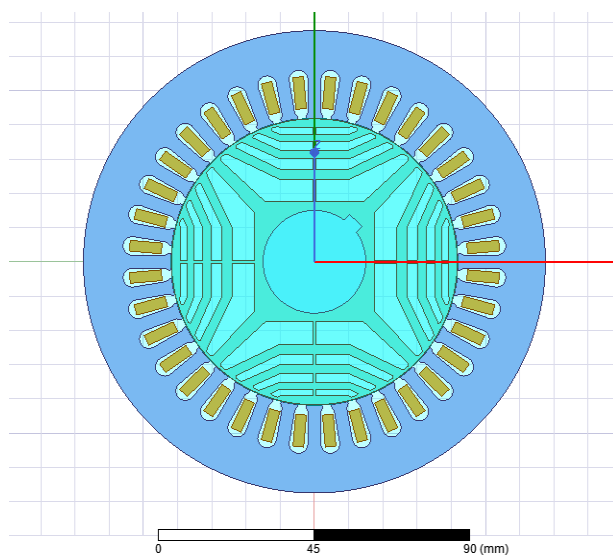
Okrem samotných rozmerov statora, rotora a ich drážok boli z dokumentácie zadané vlastnosti vinutia ako počet závitov a priemer vodiča

vinutia, avšak dĺžka vodiča bola zadaná ako priemerná dĺžka polzávitu z jednotlivých rozmerov závitov cievok. Nakoľko dokumentácia obsahovala veľkosti odporov iba v stave za studena, boli dosadené hodnoty zistené z merania v ustálenom nominálnom chode. Pre objem statoru a rotoru bol nadefinovaný materiál plechu s označením M470-50a, ktorého vlastnosti boli zadefinované z údajov o tomto plechu z katalógu firmy Cogent z roku 2003.

Využitím funkcie „create 2D Maxwell model“ bol vytvorený model v prostredí Maxwell 2D. Z tohto modelu bol odstránený rotor – kotva nakrátko. Z dostupného výkresu rotora motora B vo formáte DWG boli po úprave nekompletných a nadbytočných kontúr (spôsobených pravdepodobne exportovaním a importovaním medzi rôznymi programami a ich verziami) vytvorené importovaním do projektu prostredia Maxwell 2D kontúry rotora, ktorému bola následne pridelená plocha a materiál. Okrem materiálu plechu boli využité materiály knižnice: meď, vákuum a oceľ 1010 použitá ako materiál hriadeľa. Pred samotným výpočtom analýzy modelu bolo vykonaných viacero úprav a nastavení.

3.3 Príprava modelu

Na vonkajšom obvode statora bola nastavená okrajová podmienka, za ktorou je magnetický indukčný tok nulový. Jednotlivým cievkam bolo upravené priradenie drážok a polarita vinutia. Rotorové časti boli priradené do zložky, ktorá obsahuje súčasti konajúce rotačný pohyb. Jednotlivým častiam bola určená hustota siete, pričom pre dosiahnutie požadovanej presnosti sa kládol dôraz na vzduchovú medzeru, v ktorej veľkosti elementov dosahovali najmenšie rozmery – maximálna veľkosť bola nastavená na 0,07 mm. Výsledný model je zobrazený na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Model motora B vytvorený v ANSYS Maxwell 2D

Následne boli nastavené parametre pohybu ako orientácia rotácie, počiatočné natočenie rotora, počet otáčok za minútu, moment zotrvačnosti a záťažový moment. Niektoré z parametrov sú v prostredí programu zobrazené na obrázku 3.2.

The image shows a software dialog box titled 'Mechanical' with a 'Type' tab selected. It contains the following parameters:

- Consider Mechanical Transient
- Initial Angular Velocity: 1500 rpm
- Moment of Inertia: 0.0015 kg m²
- Damping: 0 N-m-sec/rad
- Load Torque: `if(time<7e-4, -0)`

A 'Calculate' button is located to the right of the Moment of Inertia field.

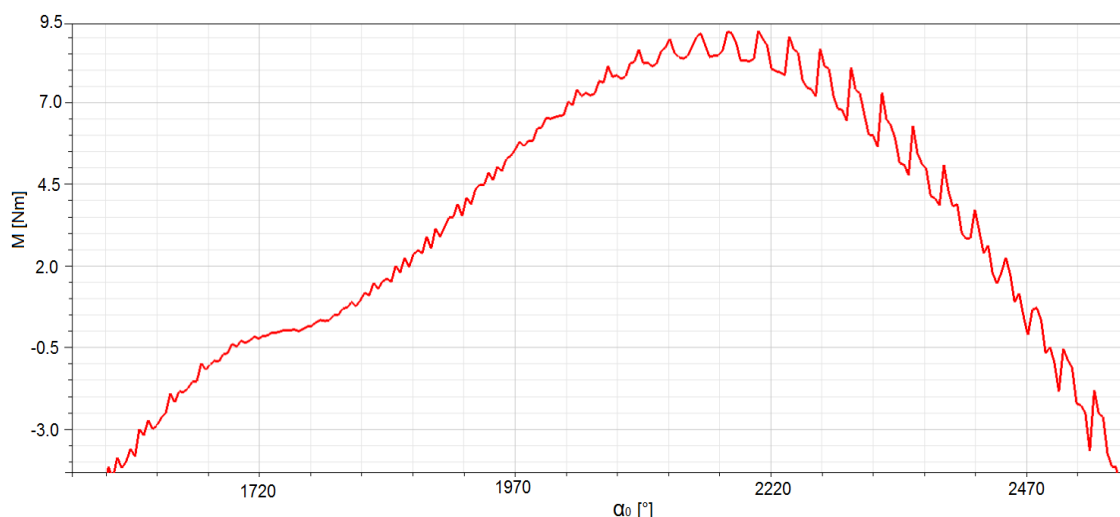
Obr. 3.2 Okno zadaných parametrov pohybu

Záťažový moment bol zadaný vo forme podmienky „if“, ktorej celý kód je:

```
if(time<7e-4, -0.98, if(time<40e-4, -1350*time, if(time<60e-3, if(speed<157.0796327, (-1.9858951e-4)*speed*speed, (-3.6880909e-4)*speed*speed), -7)))
```

Ide o podmienku s rozložením „if(konkrétna podmienka, hodnota v prípade splnenia podmienky, hodnota v prípade nesplnenia podmienky)“. Jednotlivé parametre a hodnoty podmienky boli vytvorené empiricky na základe predošlých pokusov, v ktorých dochádzalo ku kývaniu rotora a nestabilite uhlovej rýchlosti rotora. Z princípu tvorby podmienky týmto spôsobom je zjavné, že parametre nie sú ideálne a postupnou optimalizáciou by bolo možné navrhnuť podmienku, ktorá by urýchlila ustálenie efektívnejšie a v kratšom časovom úseku, avšak k výslednému ustálenému chodu je postačujúca i daná podmienka a čas potrebný na dosiahnutie tohto stavu je relatívne malý.

Za účelom zistenia uhlu natočenia rotora voči statoru bola zvlášť vykonaná analýza s konštantnými otáčkami zníženými na 1440 a výpočet prechodných mechanických dejov bol vypnutý. Bola vynesená závislosť na polohe rotora v stupňoch voči počiatočnému stavu (obrázok 3.3), z ktorej bol odčítaný uhol pre moment 7 Nm.



Obr. 3.3 Závislosť momentu na natočení

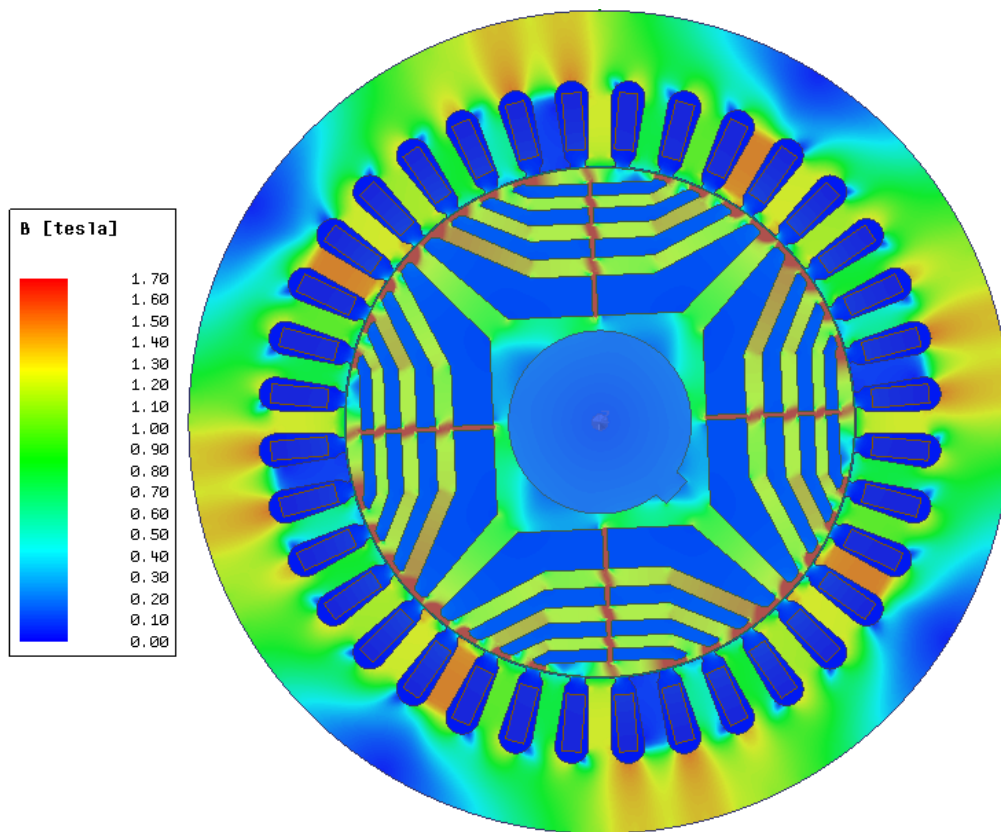
Keďže motor B je štvorpólový stroj a veľkosť momentu je závislá iba na natočení a nie na počte predošlých plných rotácií (360°), je možné odčítaný uhol zredukovať a vyjadriť v rozmedzí uhlov $0^\circ - 90^\circ$. Tento uhol bol stanovený na 45° a zadaný do programu, takisto zmenené nastavenia, ktorých zmena bola vykonaná za účelom tohto výpočtu, boli navrátené do pôvodných hodnôt.

Pre časti motora zostrojené z plechov bolo z materiálových údajov zvolené počítanie strát v železe; výpočet strát vírivými prúdmi pre ostatné časti stroja bol zanedbaný.

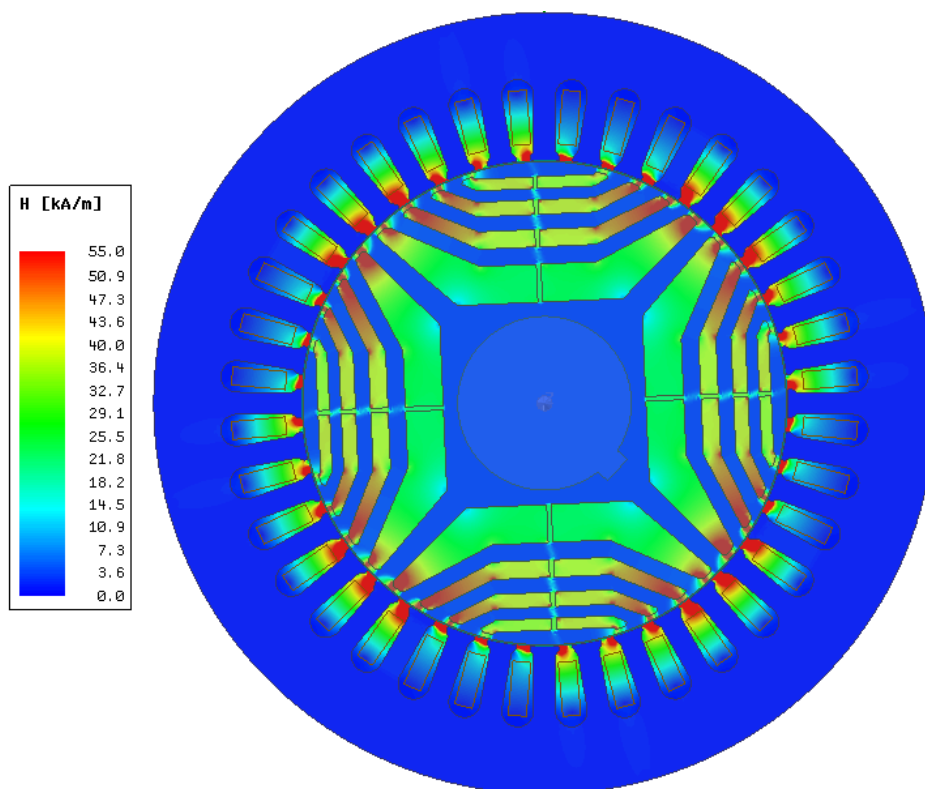
V nastavení parametrov analýzy bol zvolený začiatok a koniec analýzy, krok výpočtu bol zvolený pre dosiahnutie dostatočnej presnosti a zároveň primeranej dobe výpočtu 0,0001 s. Pre oblasť ustáleného chodu bolo zvolených niekoľko časových bodov, v ktorých boli zozbierané údaje pre následnú analýzu statických veličín. Pre urýchlenie riešenia bola začiarknutá možnosť „Fast Reach Steady State“, ktorej dôsledkom je prídavné napätie o zvolenej frekvencii v prvej polperióde.

3.4 Výsledky analýzy

Zo zozbieraných údajov z rôznych časových úsekov boli vytvorené rozloženia veličín v motore. Veľkosť a rozloženie magnetickej indukcie je zobrazené na obrázku 3.4 a intenzita magnetickeho poľa na obrázku 3.5.

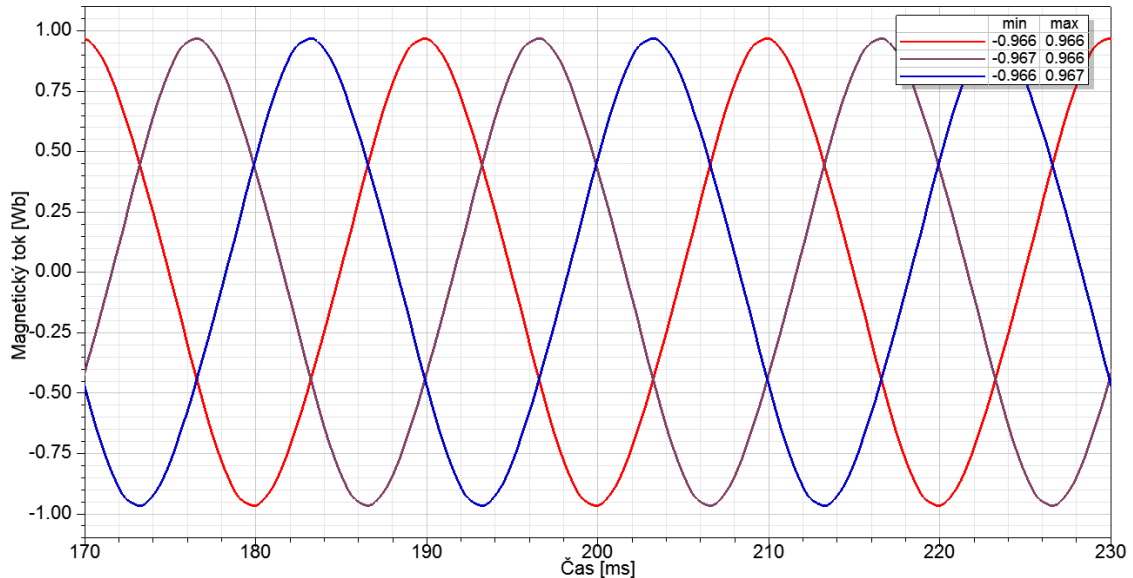


Obr. 3.4 Rozloženie magnetickej indukcie B_{ans}



Obr. 3.5 Rozloženie intenzity magnetického toku H_{ans}

Priebeh magnetického toku v čase, tvoreného každou fázou je zobrazený na obrázku 3.6.



Obr. 3.6 Priebeh magnetického toku v čase

Z grafu na obrázku 3.7, v ktorom je zobrazené vstupné napätie (napätie siete) a magnetický tok je možné odčítať uhol posunutia v nule φ_{ma} , pričom t_{0Ua} a t_{0ma} sú časy prvého prechodu napätia a toku nulou. T_a je perióda napätia siete a pre napájanie s frekvenciou 50 Hz je jej veľkosť 0,02 s. Veľkosť uhla je teda

$$\varphi_{ma} = \frac{t_{0ma} - t_{0Ua}}{T_a} \cdot 360 = \frac{0,18492 - 0,180}{0,02} \cdot 360 = 88,56^\circ \quad (3.1)$$

čo zodpovedá teoretickým predpokladom, keďže z Faradayovho zákona plynie, že ak okamžitá hodnota magnetického toku v jarme statora je

$$\phi_{mx} = \phi_{maxx} \cdot \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

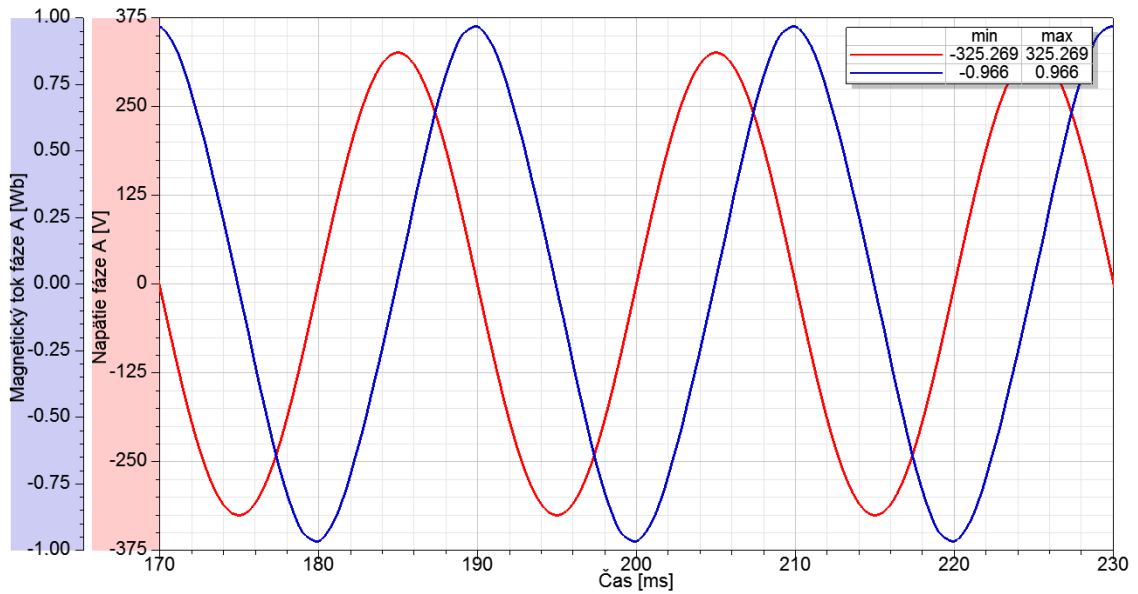
a

$$\psi_x = N \cdot \phi_{mx} \quad (3.3)$$

potom deriváciou tohto toku sa získa indukované napätie u_{ix}

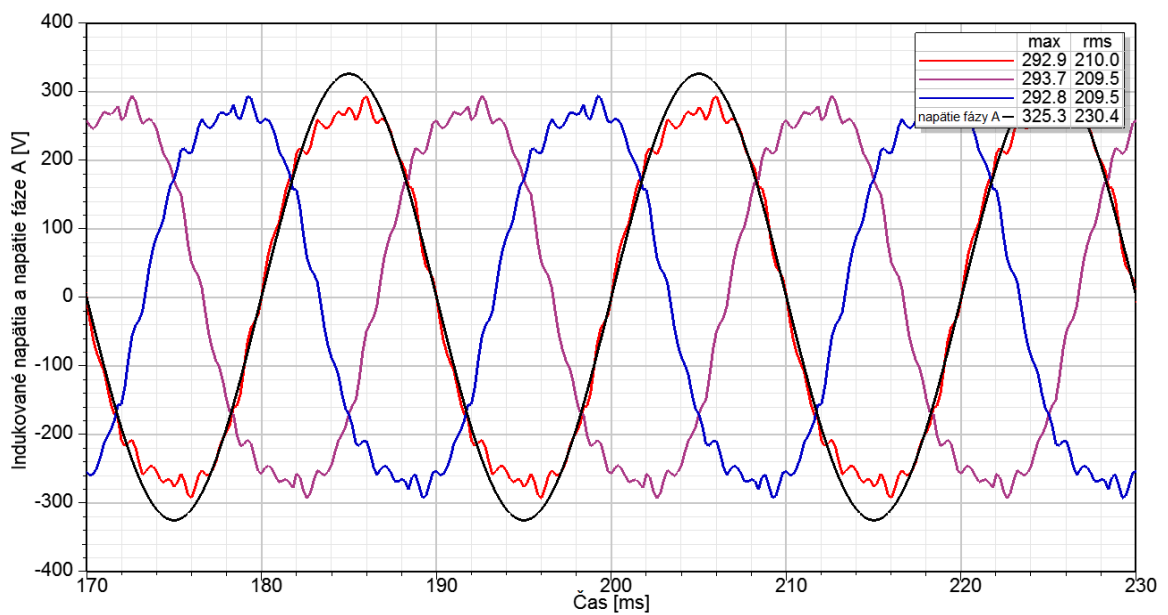
$$u_{ix} = \frac{d\psi_{mx}}{dt} = \omega \cdot \psi_{maxx} \cdot \cos(\omega t) = \omega \cdot \psi_{maxx} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.4)$$

z čoho vyplýva, že magnetický tok sa oneskoruje za napätím o 90° .

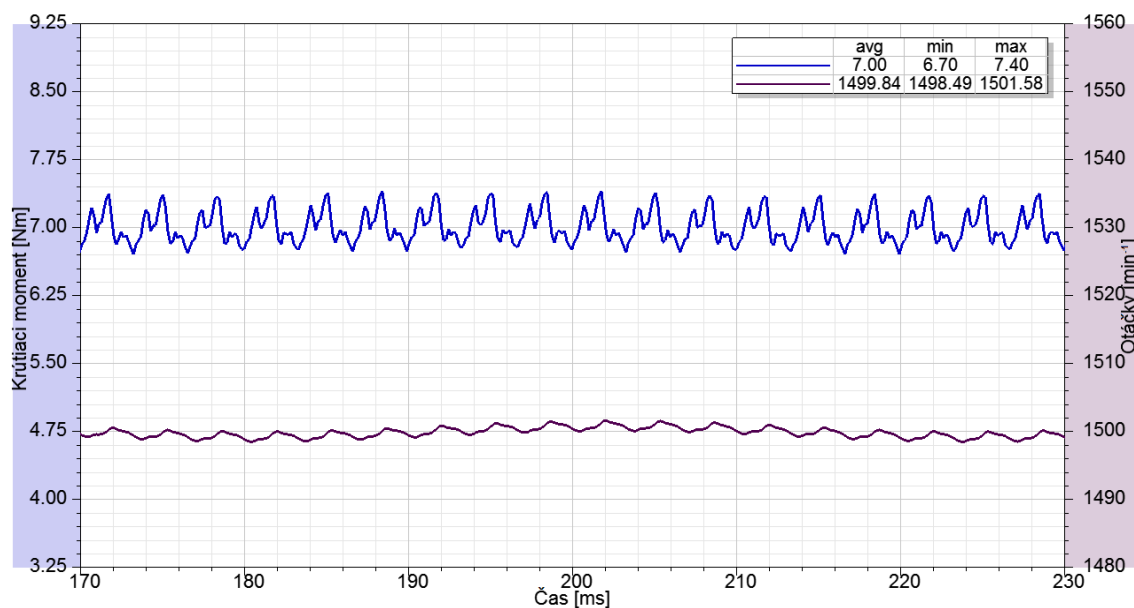


Obr. 3.7 Napätie siete a magnetický tok v čase

Na obrázku 3.8 sú vykreslené indukované napätia všetkých fáz v závislosti na čase a napätie siete fáze A pre porovnanie. Viditeľne menšia amplitúda je spôsobená úbytkami na odporoch vinutia.



Obr. 3.8 Indukované napätia a napätie siete fáze A



Obr. 3.9 Krútiaci moment a počet otáčok za minútu

Obrázok 3.9 znázorňuje tvar zmeny momentu v čase a počet otáčok za minútu. Násobkom týchto veličín v jednotlivých časových okamihoch ANSYS počíta výkon motora, príkon je počítaný buď zo vstupného napätia a prúdu ako

$$p_{1a}(t) = u_{1Aa}(t) \cdot i_{1Aa}(t) + u_{1Ba}(t) \cdot i_{1Ba}(t) + u_{1Ca}(t) \cdot i_{1Ca}(t), \quad (3.5)$$

alebo sčítaním príkonu a sumárom strát, čo je metóda využívaná pre ďalšie výpočty.

$$P_{1a} = P_{2a} + \Delta P_{suma} \quad (3.6)$$

Všeobecne sú straty v železe p_v počítané ako súčet hysterézných strát (p_h), strát vírivými prúdmi (p_c) a nadbytočnými stratami (p_e):

$$p_v = p_h + p_c + p_e, \quad (3.7)$$

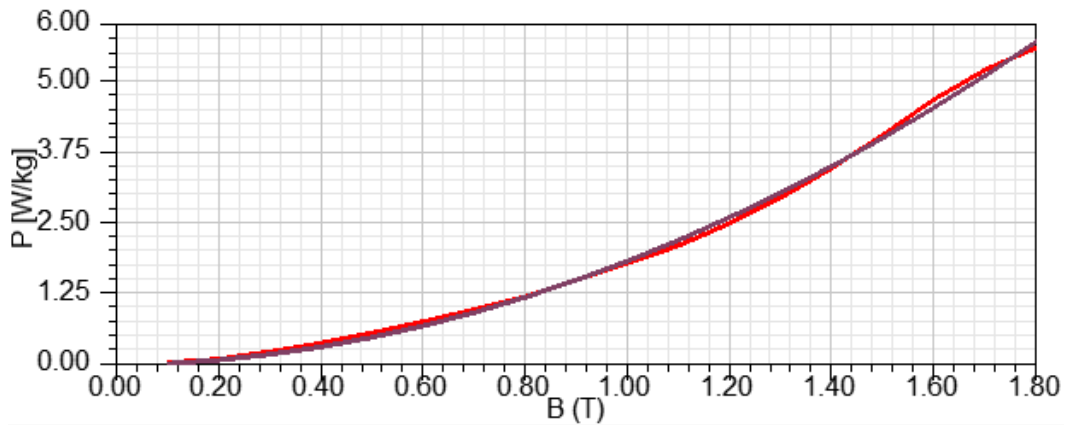
pričom princíp výpočtov týchto stratových výkonov je nasledovný:

$$p_h = k_h \cdot f \cdot B_m^2 \quad (3.8)$$

$$p_c = k_c (f \cdot B_m)^2 \quad (3.9)$$

$$p_e = k_e (f \cdot B_m)^{1.5}. \quad (3.10)$$

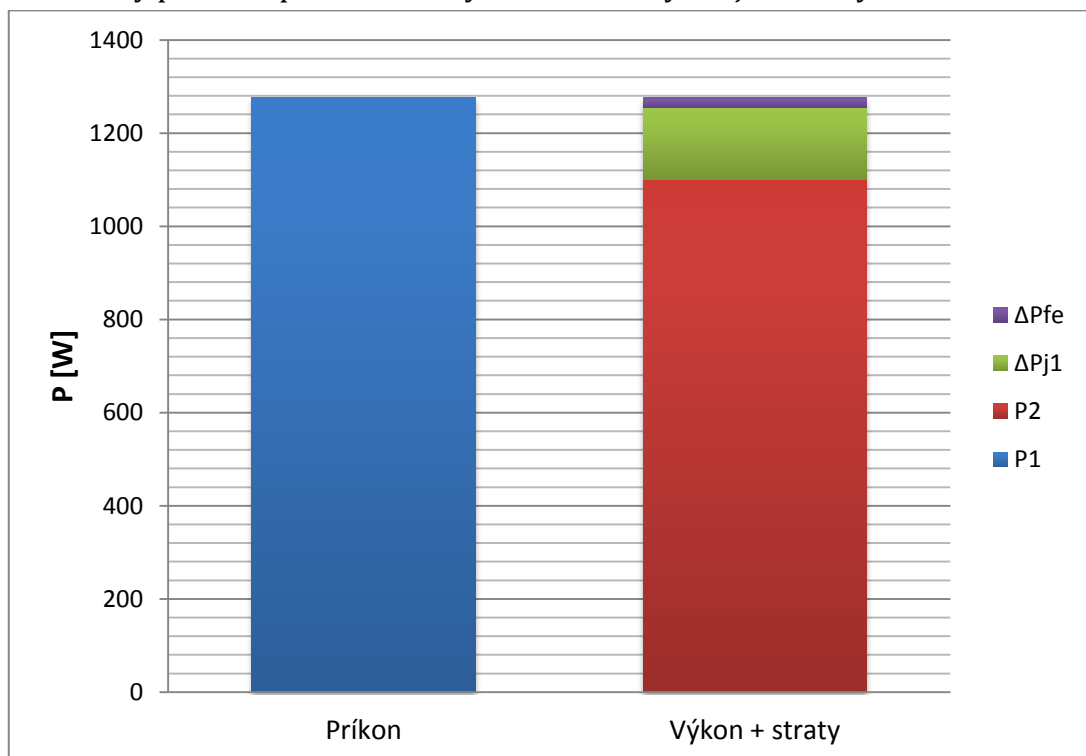
Koeficient k_c program vypočíta z informácií o hrúbke laminátov a vodivosti. Z tohto koeficientu a z rovnice krivky závislosti strát na indukcii pri referenčnej frekvencii, ktorá bola vytvorená preložením bodov grafu získaných z datasheetu plechu, vypočíta koeficienty k_h a k_e . Túto krivku a parametre potrebné k výpočtu, spolu s vypočítanými koeficientmi možno vidieť na obrázku 3.10.



Core Loss Unit:	w/kg			
Mass Density:	7315	kg/m ³	w/m ³	w/kg
Frequency:	50	Hz	Kh: 173.663	0.0237407
Thickness:	0.5	mm	Kc: 1.05445	0.000144148
Conductivity:	2564103	S/m	Ke: 5.7738	0.000789309

Obr. 3.10 Údaje pre výpočet koeficientov a ich hodnoty

Jouleove straty v odporoch cievok sú rovné veľkostiam týchto odporov vynásobených kvadrátom prúdu nimi prechádzajúcim. V grafe na obrázku 3.11 je zobrazený príkon v porovnaní s výkonom sčítaným s jednotlivými stratami.



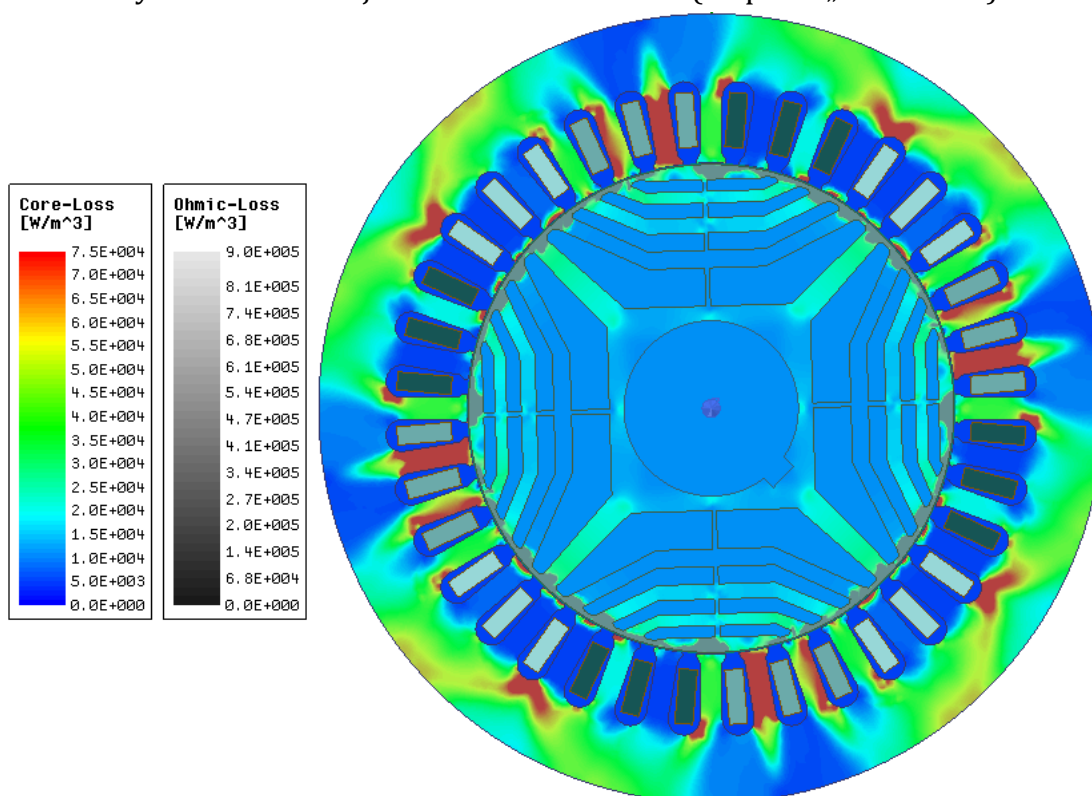
Obr. 3.11 Graf príkonu v porovnaní s výkonom a stratami

Zastúpenie strát hysteréznych, vírivými prúdmi a dodatočných je znázornené v grafe na obrázku 3.12, pričom v danom grafe je zobrazený aj pomer, ktorým sa na týchto stratách podieľa rotor a stator. Veličiny boli odčítané ako priemerné hodnoty z 3 periód ich časovej závislosti vypočítanej počítačom a presné hodnoty sú v tabuľke 3.1.

Tab. 3.1 Rozdelenie strát v železe

Časť:	ΔP_{fe}	ΔP_h	ΔP_c	ΔP_e
	[W]	[W]	[W]	[W]
celok	25,3	11,0	9,2	5,1
stator	12,0	6,0	5,0	3,0
rotor	13,3	5,0	4,2	2,1

Hustota strát prierezom motora je zobrazená na obrázku 3.13, pričom z dôvodu rozdielu hodnôt o jeden rád, je pre názornejšiu predstavu vyobrazená zvlášť v cievkach hustota Joulových strát (čiernobiela stupnica „Ohmic-Loss“) a v ostatných častiach stroja hustota strát v železe (stupnica „Core-Loss“).



Obr. 3.12 Rozloženie strát v železe a v odporoch cievok v priereze motora

Pre zaistenie požadovaného výkonu by reálny motor po zostrojení vyžadoval vyšší príkon, ako dôsledok krytia strát mechanických a dodatočných. Nakoľko tieto straty neboli súčasťou výpočtu modelu, ich určenie by bolo možné napríklad odhadom z údajov pre stroje podobných parametrov alebo už vyhotovených

strojov. Keďže motor je reálne zhotovený a prebehlo na ňom meranie, určia sa mechanické a dodatočné straty z daného merania. Nakoľko z merania neboli určené samostatne straty v železe, sú dostupné informácie len o súčte strát ΔP_{ine} .

$$\Delta P_{ine} = \Delta P_{fe} + \Delta P_{mechd} \quad (3.11)$$

Nasledujúce výpočty a hodnoty sú získané a platia pre 1. riadok tabuľky 3.2 a 3.3, pričom hodnoty ΔP_{ine} sú získané z tabuľky 2.5 pre odpovedajúce záťažové momenty a otáčky.

$$S_{1a} = 3 \cdot U_{1fa} \cdot I_{1a} = 3 \cdot 230 \cdot 2,471 = 1704,99 \text{ VA} \quad (3.12)$$

$$\lambda_a = \frac{P_{1a}}{S_{1a}} = \frac{1276,71}{1704,99} = 0,749 \quad (3.13)$$

$$\Delta P_{osta} = \Delta P_{j1a} + \Delta P_{fea} = 153,2 + 22,35 = 175,55 \text{ W} \quad (3.14)$$

$$\Delta P_{mechda} = \Delta P_{ine} - \Delta P_{fea} = 69,91 - 22,35 = 47,56 \text{ W} \quad (3.15)$$

$$\Delta P_{celka} = \Delta P_{j1a} + \Delta P_{fea} + \Delta P_{mechda} = 153,2 + 22,35 + 47,56 = 223,11 \text{ W} \quad (3.16)$$

$$P_{1a} = P_{2a} + \Delta P_{osta} = 1101,16 + 175,55 = 1276,71 \text{ W} \quad (3.17)$$

$$P_{1+a} = P_{2a} + \Delta P_{celka} = 1101,16 + 223,11 = 1324,27 \text{ W} \quad (3.18)$$

$$\eta_a = \frac{\Delta P_{2a}}{\Delta P_{1+a}} \cdot 100 = \frac{1101,16}{1324,27} \cdot 100 = 83,15 \% \quad (3.10)$$

Tab. 3.2 Výkony, straty a účinnosti, prvá časť

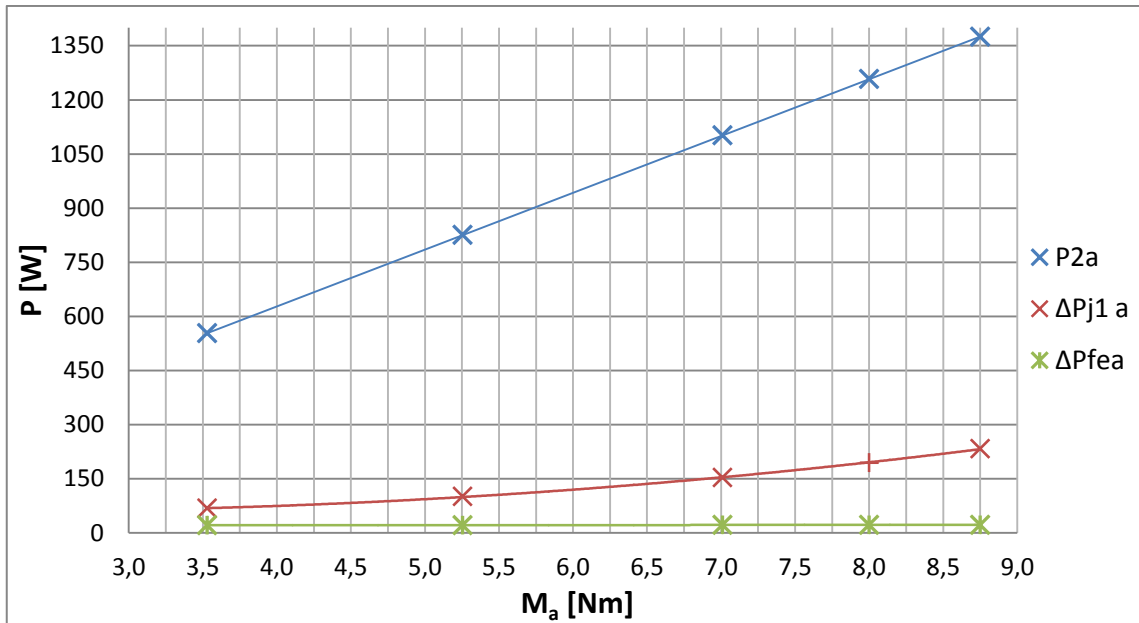
M_a	U_{1fa}	I_{1a}	S_{1a}	λ_a	P_{2a}	P_{1a}	P_{1+a}
[Nm]	[V]	[A]	[VA]	[-]	[W]	[W]	[W]
7,01	230	2,471	1704,99	0,749	1101,16	1276,71	1324,27
8,75	230	3,049	2103,81	0,775	1374,925	1630,56	1681,42
8,00	230	2,787	1923,10	0,767	1257,49	1474,49	1521,34
5,26	230	2,009	1386,21	0,684	825,68	948,45	995,11
3,53	230	1,648	1136,98	0,566	553,82	643,36	675,02

Tab. 3.3 Výkony, straty a účinnosti, druhá časť

M_a	ΔP_{j1a}	ΔP_{fea}	ΔP_{osta}	ΔP_{ine}	ΔP_{mechda}	ΔP_{celka}	η_a
[Nm]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]
7,01	153,20	22,35	175,55	69,91	47,56	223,11	83,15
8,75	233,241	22,3913	255,63	73,26	50,87	306,50	81,77
8,00	194,87	22,13	217,00	68,98	46,85	263,86	82,66
5,26	101,27	21,50	122,77	68,16	46,66	169,43	82,97
3,53	68,12	21,43	89,55	53,08	31,66	121,20	82,04

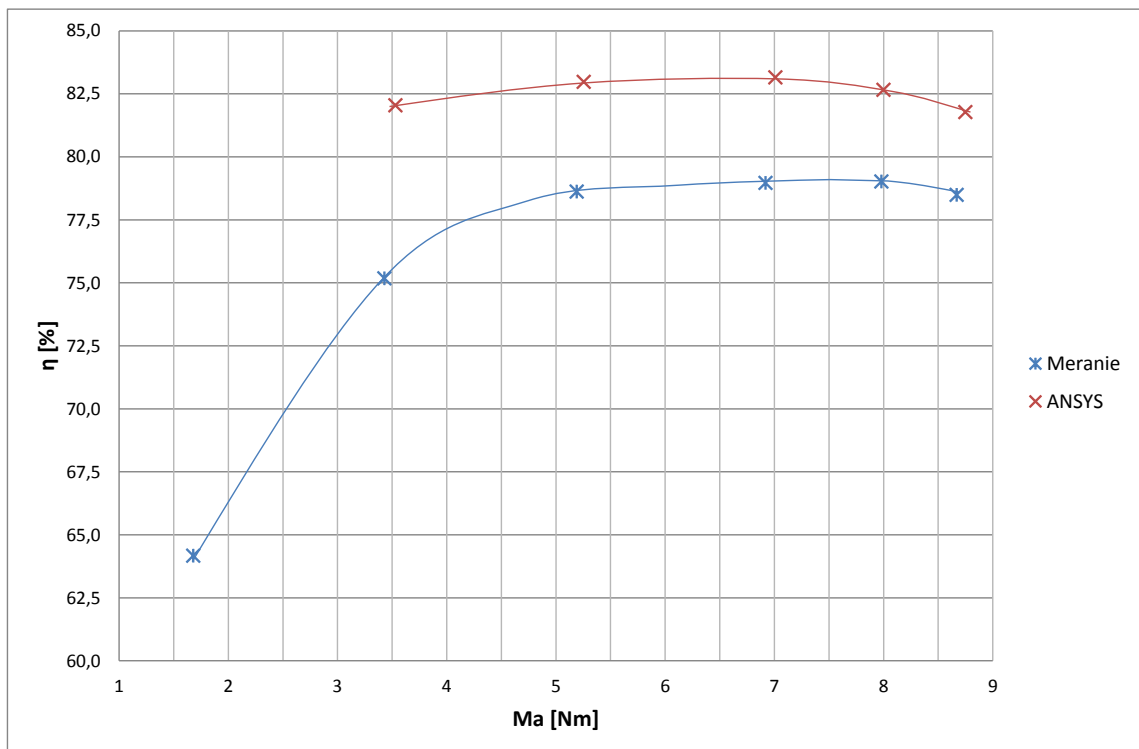
Veľkosť výkonu, strát v medi a strát v železe v závislosti na záťažovom momente je možno vidieť v grafe na obrázku 3.13. Na obrázku 3.15 je vynesená závislosť

celkového účinníku na momente. Pre simuláciu v rôznych v bodoch bola upravená podmienka zadávajúca moment.

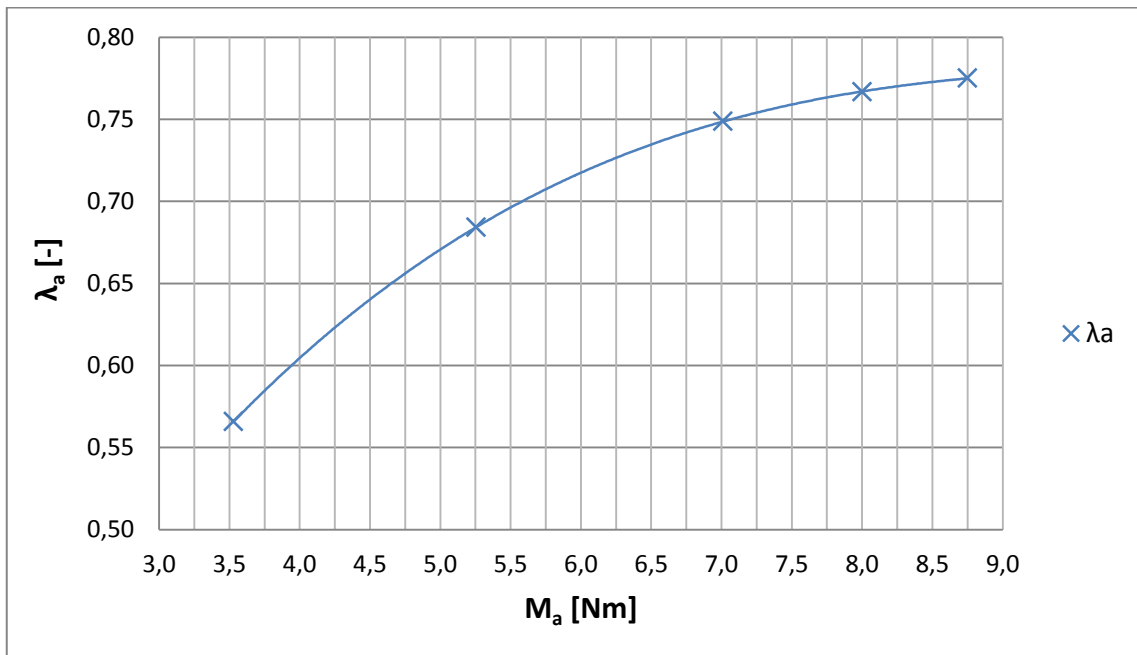


Obr. 3.13 Závislosť výkonu a strát na momente

Výsledky simulácie sú porovnané s výsledkami merania v tabuľke YX a účinnosti motora v závislosti na momente získané oboma metódami sú vynesené v grafe na obrázku XY.



Obr. 3.14 Rozloženie strát v železe a v odporoch cievok v priereze motora



Obr. 3.15 Závislosť celkového účinníka na momente

Simulácia chodu motoru zaťažovaného momentom 1,75 Nm mala kmitavý a nestabilný charakter, takže porovnanie tohto bodu nebolo možné.

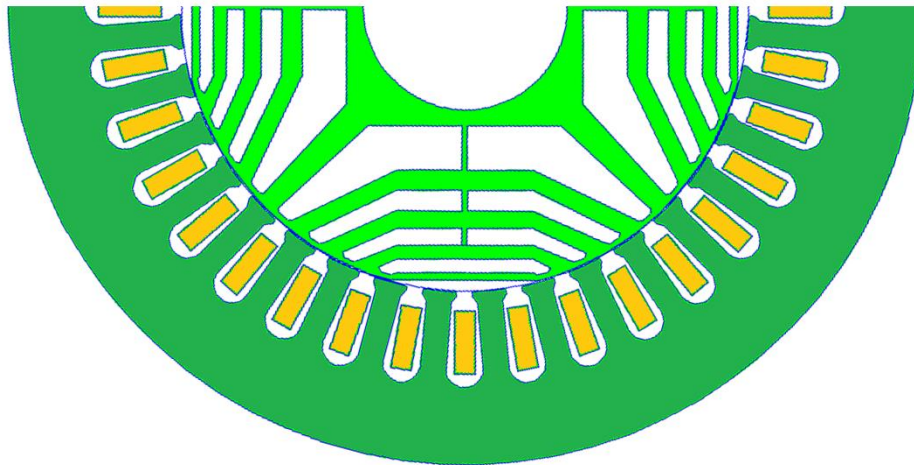
Porovnaním údajov získaných dvoma rôznymi metódami (meranie, simulácia) možno pozorovať výrazné rozdiely v stratách motora a tým pádom aj účinnosti. Hlavnou zložkou podieľajúcou sa na týchto odlišnostiach sú straty vo vinutí ΔP_{JL} . Ich hodnota v nominálnom bode záťažového momentu 7 Nm bola zistená meraním 219,8 W, pričom simuláciou len 153,2 W. Tento rozdiel je hlavným dôvodom vysokej účinnosti modelu motora a 4,19 percentného rozdielu. Najvýraznejší rozdiel účinností je v meraní zaťažovacím momentom 5,25 Nm s veľkosťou 4,35 %.

Príčiny týchto rozdielov môžu byť viaceré. Jednak medzi meraním odporu a ustálených chodom reálneho motora došlo k zmenám veľkostí týchto odporov. Do ANSYS-u mohli byť zadané menšie hodnoty. Výpočtami však bola táto chyba do istej miery kompenzovaná. Reálnym motorom tiež tiekol vyšší prúd potrebný na vykrytie mechanických a dodatočných strát. Tento prúd by však spôsobil iba malé navýšenie prúdu motorom I_{RMS} približne o 3 – 4 %. Je tiež možné pravdepodobné, že výsledný rozdiel získaných dát je kombináciou chýb vyskytujúcich sa u oboch metód.

3.5 Z princípu fungovania SynRM Možnosti zlepšenia parametrov motora

Účinnosť 78,96 % vypočítaná z merania nie je dostačujúca a v súčasnej dobe by pri uvedení na trh pravdepodobne nebol konkurencieschopný. Zníženie mechanických strát je technicky náročné a spolu s ním rastie cena. To platí aj pre straty v železe. Ich zníženie je dosiahnuteľné vhodnou voľbou plechov a vývojom nových, s lepšimi parametrami. Vzhľadom k tomu, že tieto straty sú relatívne malé voči ostatným a existujú isté limity, pod ktoré nie je možné sa dostať, výrazné zníženie strát týmto smerom nevedie.

Z princípu fungovania SynRM a jeho popisu kruhovým diagramom v kapitole 1.4 je zrejmé, že jeho parametre sú podmienené pomeru reaktancií. Vhodnou úpravou konštrukcie je možné tento pomer zväčšiť. Na obrázku XY je frakcia modelu motora s upravenou geometriou rotorovej časti.



Obr. 3.16 Model motora s návrhom novej geometrie rotora

Táto geometria bola vymodelovaná v programe FEMM, pričom parametre a metóda výpočtu sú rovnaké ako v kapitole 1.4.1. Z vypočítaných indukčností L_{qn} a L_{dn} a ich pomeru

$$\xi_n = \frac{L_{dn}}{L_{qn}} = \frac{0,3178}{0,0506} = 6,28,$$

ktorý je menší ako v pôvodnom návrhu, vyplýva, že tento pokusný tvar zlepšenie parametrov nedocieli. I keď sa indukčnosť v smere osi q zväčšila, zmena mala markantný negatívny vplyv na L_d , pričom tento vplyv bol dominantný. Zlepšenie parametrov zmenou geometrie vyžaduje dôkladnejšiu analýzu a viacnásobné detailné simulácie, čo presahuje rámec tejto práce.

4 ZÁVER

Obsahom prvej časti práce bola rešerš synchronného reluktančného motora. Bol popísaný princíp fungovania a konštrukcie základných typov, s dôrazom na rotor a jeho úlohu pri tvorbe momentu. V programe FEMM bol namodelovaný jeden zo zadaných vzorkov motorov. Z modelu boli získané indukčnosti pre vytvorenie kruhového diagramu, z ktorého boli stanovené parametre ako veľkosť maximálneho výkonu a záťažný uhol.

Druhá časť práce bola praktického charakteru. Zadané vzorky motorov boli nainštalované na dynamometer a pracovisko bolo pripravené na meranie. Pred meraním bol naštudovaný materiál meniča, a menič samotný bol následne nastavený do režimu dedikovanému k riadeniu SynRM. V niekoľkých bodoch merania, určených záťažovým momentom a rýchlosťou otáčania, ktoré boli určené normami pre asynchronné motory a návrhom normy pre motory napájané meničom, boli dynamometrom a výkonovým analyzátorom zmerané viaceré elektrické a mechanické veličiny. Tieto dáta boli následne spracované a použité pre ďalšie výpočty parametrov motorov. Z dopočítaných veličín a veličín nameranými boli vynesené a popísané závislosti. V závere kapitoly boli výsledky porovnané s požiadavkami pre splnenie noriem, pričom jeden z motorov by nespĺňal ani jednu, nakoľko jeho účinnosť bola príliš nízka.

V programe ANSYS RMxprt a Maxwell bol namodelovaný jeden motor zo vzoriek, označený ako motor B, pričom sa jedná o motor, pre ktorý bol v 1. kapitole zostrojený kruhový diagram. Po dôkladnom nastavení optimálnych parametrov simulácie pre dosiahnutie požadovanej presnosti boli získané údaje o motore porovnané s údajmi z merania. Tie sa nezhodovali, pričom simuláciou boli dosiahnuté výrazne lepšie výsledky. Možné príčiny týchto rozdielov sú uvedené, spolu s úvodom do návrhu motora s lepšími parametrami za grafickými porovnaniami výsledkov.

LITERATÚRA

- [1] KOSTKO, J.K., *Polyphase reaction synchronous motors*, Journal A.I.E.E, 1923, Vol 42, pp. 1162-1168
- [2] HORTMAN, M.B. *Implementation And Evaluation Of a Full-order Observer For a Synchronous Reluctance Motor*, Thesis, School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, 2004.
- [3] *Elektrické pohony ABB* [online]. b.r. [cit. 2017-12-9]. Dostupné z: <http://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp%20journal%203%202013%20str%2018-19.pdf>
- [4] PATOCKA, M. *Vybrané state z výkonové elektroniky - svazek IV: Magnetické obvody ve výkonové elektronice*, pulsní měniče s transformátorem. Brno, 2005
- [5] *Konstručné riešenia rotorov RSM a ich vlastnosti* [online]. b.r. [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/ŠES/Reluktančný%20synchrónny%20motor/RSM-%20konstrukcne%20riesenia%20a%20ich%20vlastnosti.pdf>
- [6] MOGHADDAM, R. *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design*. Stockholm, 2007. 95 s. Diplomová práca. Royal Institute of Technology.
- [7] HRABOVCOVÁ, Valéria a Miroslav LIČKO. *Reluktačný synchrónny motor*. Žilina: EDIS, 2001. ISBN 80-7100-891-5.
- [8] OPREA, Claudiu a Arkadiusz DZIECHCIARZ a Claudia MARTIS. *Comparative Analysis of Different Synchronous Reluctance Motor Topologies* [online]. b.r. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7165463/>
- [9] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2*. 1. vyd. Praha: academia, 1982. ISBN 509-21- 857
- [10] KOSTOLANSKÝ, R. *Riadenie polohy asynchrónnych motorov frekvenčným meničom*. Bratislava, 2010. Diplomová práca. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [11] AREFEEN, M. S. a M. EHSANI a T. A. LIPO. *Sensorless Position Measurement in Synchronous Reluctance Motor* [online]. 1994. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/334778/>
- [12] KOČMAN, S. a V. VRÁNA. *SYNCHRONNÍ STROJE* [online]. 2005. [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_synchrónni_stroje_bc.pdf
- [13] *Direct torque control – a motor control technique for all seasons* [online]. 2017. [cit. 2017-12-9]. Dostupné z: <http://www.ee.co.za/article/direct-torque-control-motor-control-technique-seasons.html>

- [14] VAS, P. *Sensorless vector and direct torque control*. New York: Oxford University Press, 1998. ISBN 9780198564652.
- [15] DE PANCORBO, S. M. a G. UGALDE, J. POZA, A. EGEA. *Comparative Study between Induction Motor and Synchronous Reluctance Motor for Electrical Railway Traction Applications* [online]. 2015. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7323219/>
- [16] BOGLIETTI, A. a M. PASTORELLI. *Induction and synchronous reluctance motors comparison* [online]. 2008. [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4758270/>
- [17] *Synchronní reluktanční motory v regulovaných pohonech* [online]. 2013. [cit. 2017-12-9]. Dostupné z: <https://www.abb-conversations.com/cs/files/2013/06/Synchronní-reluktanční-motory.pdf>
- [18] BAO, J a K. BOYNOV, J.J.H. PAULIDES, K. WJINANDS, E.A. LOMONOVA. *Comparison of 48V Rare-earth-free Reluctance Traction Motor drives for Mild Hybrid Powertrain* [online]. 2016. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7791635/>
- [19] BOUCHAREB, I. a A. BENTOUNSIA, A. LEBAROUD. *A comparative study of synchronous reluctance and switched reluctance motors for high-performance fault-tolerant applications* [online]. 2012. [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/234065298_A_Comparative_Study_of_Synchronous_Reluctance_and_Switched_Reluctance_Motors_for_High-Performance_Fault-Tolerant_Applications
- [20] KAZAKBAEV, V. a V. PRAKHT, V. DMITRIEVSKII, I. SOKOLOV. *The Feasibility Study of the Application of a Synchronous Reluctance Motor in a Pump Drive* [online]. 2016. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7756718/>
- [21] BOLDEA, I. *Reluctance synchronous machines and drives*. New York: Oxford University Press, 1996. ISBN 0-19-859391-0
- [22] *ANSYS RMXprt*. ANSYS [online]. [cit. 2018-05-28]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-rmxprt>

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

FEKT	-	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií	
VUT	-	Vysoké učení technické v Brně	
SynRM	-	synchronný reluktančný motor	
DTC	-	priame riadenie momentu (direct torque control)	
PC	-	osobný počítač	
KD	-	kruhový diagram	
q	-	osa q	
d	-	osa d	
M_s	-	moment sily	[Nm]
I	-	prúd	[A]
L_d	-	indukčnosť v smere osi d	[H]
L_q	-	indukčnosť v smere osi q	[H]
M	-	točivý moment	[Nm]
s	-	sklz	[-]
X_q	-	reaktancia v smere osi q	[Ω]
X_d	-	reaktancia v smere osi d	[Ω]
I_1	-	prúd statorom	[A]
P_1	-	výkon	[W]
P_{1max}	-	maximálny výkon	[W]
m_1	-	počet fáz	[-]
ω	-	uhlová rýchlosť	[s^{-1}]
U_1	-	napätie na motore	[V]
X	-	priemer hodnôt veličiny	[-]
n	-	počet hodnôt veličiny	[-]
t	-	čas	[s]
R_{AUV}	-	odpor motora A, medzi fázami U a V	[Ω]
R_{BUV}	-	odpor motora B, medzi fázami U a V	[Ω]
R_{priem}	-	priemerný odpor	[Ω]
U_{RMS}	-	efektívna hodnota napätia	[V]
I_{RMS}	-	efektívna hodnota prúdu	[A]
S_1	-	zdanlivý výkon	[VA]
f	-	frekvencia	[Hz]
n	-	otáčky	[ot/min]
M_{REAL}	-	moment reálny	[Nm]
M_{dyn}	-	moment zmeraný dynamometrom	[Nm]
M_{off}	-	moment odchýlka (offset)	[Nm]
P_2	-	výkon	[W]

α	-	teplotný súčiniteľ odporu	[K ⁻¹]
ξ	-	pomer indukčnosti	[-]
$(\cos\varphi_1)_{max}$	-	maximálny účinník	[°]
φ_{1min}	-	minimálny uhol	[°]
λ	-	účinník	[-]
η	-	účinnosť	[%]
ΔP_{celk}	-	straty celkové	[W]
ΔP_{j1}	-	straty vo vinutí statora	[W]
ΔP_{ine}	-	straty ostatné	[W]
Ψ_{kr}	-	spriahnutý tok	[W]
$(\cos\varphi_{1kr})_{max}$	-	maximálny účinník	[°]
X_{dkr}	-	reaktancia v smere osi d pre KD	[Ω]
X_{qkr}	-	reaktancia v smere osi q pre KD	[Ω]
L_{dkr}	-	indukčnosť v osi d pre KD	[H]
L_{qkr}	-	indukčnosť v osi q pre KD	[H]
ω	-	uhlová rýchlosť pre KD	[s ⁻¹]
β_{1kr}	-	záťažný uhol	[°]

Zoznam príloh