

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

TŘÍFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR NAPÁJENÝ Z FREKVENČNÍHO MĚNIČE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

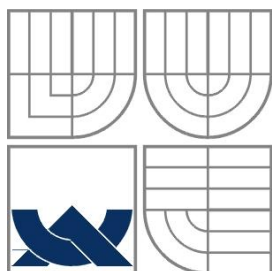
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

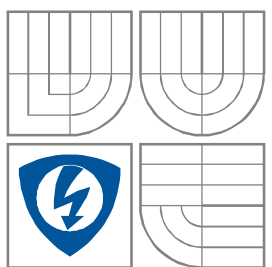
BRNO 2014

Zbyněk Fiala



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

TŘÍFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR NAPÁJENÝ Z FREKVENČNÍHO MĚNIČE

THREE PHASE INDUCTION MOTOR POWERED FROM FREQUENCY CONVERTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

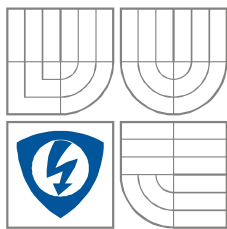
Zbyněk Fiala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO, 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Zbyněk Fiala

ID: 145028

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/14

NÁZEV TÉMATU:

Třífázový asynchronní motor napájený z frekvenčního měniče

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s konstrukcí a principem funkce asynchronního motoru, výpočtem jeho parametrů, metodou měření a stanovení jednotlivých druhů ztrát.
2. Vypočtete parametry konkrétního asynchronního motoru na základě dodané výrobní dokumentace, určete jeho ztráty a to jak analyticky, tak pomocí programu RMXprt.
3. Na předloženém vzorku motoru proveďte měření při různých frekvencích a průbězích napájecího napětí, proveďte rozdělení ztrát. Analyzujte vliv časových harmonických na vlastnosti asynchronního motoru.
4. Proveďte měření při různé spínací frekvenci měniče a analyzujte vliv na velikost ztrát v železe.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Boldea, I., Nasar, S.A. The Induction Machine Handbook. USA: CRC Press, 2002. ISBN 978-0849300042
- [2] Časopisecké a konferenční články z databáze IEEE Xplore.
- [3] Petrov, G.N. Elektrické stroje 2. Praha: Academia. 1982.
- Dále dle pokynu vedoucího práce.

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 2.6.2014

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

Konzultanti bakalářské práce:

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Práce rozebírá ztráty v asynchronním motoru se zaměřením na ztráty v železe motoru. V úvodu práce je nejprve obecně popsán asynchronní motor a ztráty, které vznikají při jeho provozu. Poté je následně proveden analytický výpočet, simulace v programu RMXprt a měření při různých frekvencích (40, 50, 60Hz) a průbězích (sinusový, sinusová PWM o různých modulačních frekvencích) napájecího napětí na vybraném motoru TM90-2S od firmy EMP Slavkov. Závěrem jsou výsledky analytického výpočtu, simulace i měření srovnány.

Abstract

The thesis analyses losses in the three phase induction motor with a focus on iron losses. In the first instance the three phase induction motor and the losses in it are described. The analytical calculation and the simulations in the RMXprt software are performed. The measurements were made with a different frequency (40, 50, 60Hz) and behaviour of supply voltage on a motor TM90-2S by EMP Slavkov. In conclusion the results of calculation, simulation and measurements are compared.

Klíčová slova

Analytický výpočet; asynchronní motor; hysterezní ztráty; měření ztrát; RMXprt; simulace; ztráty v železe; ztráty vířivými proudy; ztráty

Keywords

Analytical calculation; eddy current losses; hysteresis losses; iron losses; loss measurement; losses; RMXprt; simulation; three phase induction motor

Bibliografická citace

FIALA, Z. *Třífázový asynchronní motor napájený z frekvenčního měniče*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 81 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Třífázový asynchronní motor napájený z frekvenčního měniče jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

1 ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	14
1.1 KONSTRUKCE	14
1.2 PRINCIP ČINNOSTI.....	16
1.3 ZTRÁTY V MOTORICKÉM REŽIMU ASYNCHRONNÍHO STROJE	17
1.4 ZTRÁTY V ŽELEZE.....	18
1.4.1 SINUSOVÝ TVAR MAGNETICKÉ INDUKCE.....	19
1.4.2 NESINUSOVÝ TVAR MAGNETICKÉ INDUKCE	21
2 ANALYTICKÝ VÝPOČET ASYNCHRONNÍHO MOTORU	22
2.1 VÝPOČET MAGNETIZAČNÍHO PROUDU	22
2.2 VÝPOČET ODPORU VINUTÍ STATORU	26
2.3 VÝPOČET ODPORU VINUTÍ ROTORU.....	26
2.4 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATOROVÉHO VINUTÍ.....	27
2.5 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE ROTOROVÉHO VINUTÍ	28
2.6 VÝPOČET CELKOVÝCH ZTRÁT V ŽELEZE	29
2.7 VÝPOČET JMENOVITÉHO SKLUZU.....	31
2.8 VÝPOČET JMENOVITÉHO PROUDU	32
3 ANALYTICKÝ VÝPOČET MOTORU TM90-2S.....	33
3.1 ANALYTICKÝ VÝPOČET MAGNETIZAČNÍHO PROUDU MOTORU TM90-2S.....	33
3.2 ANALYTICKÝ VÝPOČET ODPORU VINUTÍ STATORU MOTORU TM90-2S.....	36
3.3 ANALYTICKÝ VÝPOČET ODPORU VINUTÍ ROTORU MOTORU TM90-2S	36
3.4 ANALYTICKÝ VÝPOČET ROZPTYLOVÉ REAKTANCE STATOROVÉHO VINUTÍ MOTORU TM90-2S	37
3.5 ANALYTICKÝ VÝPOČET ROZPTYLOVÉ REAKTANCE ROTOROVÉHO VINUTÍ MOTORU TM90-2S.....	38
3.6 ANALYTICKÝ VÝPOČET ZTRÁT V ŽELEZE MOTORU TM90-2S	39
3.7 ANALYTICKÝ VÝPOČET JMENOVITÉHO SKLUZU MOTORU TM90-2S.....	40
3.8 ANALYTICKÝ VÝPOČET JMENOVITÉHO PROUDU MOTORU TM90-2S	41
4 VÝPOČET POMOCÍ PROGRAMU RMXPRT	42
5 MĚŘENÍ ZTRÁT NA MOTORU TM90-2S.....	44
5.1 MĚŘENÍ PŘI SINUSOVÉM PRŮBĚHU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ O FREKVENCI 50Hz.....	44
5.1.1 ZKOUŠKA PŘI ZATÍŽENÍ MĚŘENÉHO MOTORU	46
5.1.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO MĚŘENÉHO MOTORU	49
5.2 MĚŘENÍ ZTRÁT PŘI SINUSOVÉM PRŮBĚHU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ O FREKVENCI 60Hz.....	54
5.2.1 ZKOUŠKA PŘI ZATÍŽENÍ.....	54
5.2.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO	56
5.3 MĚŘENÍ ZTRÁT PŘI SINUSOVÉM PRŮBĚHU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ O FREKVENCI 40Hz.....	59
5.4 MĚŘENÍ ZTRÁT PŘI 3kHz PWM. NAPĚTÍ O FREKVENCI 40Hz.....	60
5.5 MĚŘENÍ ZTRÁT PŘI 12kHz PWM. NAPĚTÍ O FREKVENCI 40Hz.....	60
5.6 MĚŘENÍ ZTRÁT PŘI 3kHz PWM. NAPĚTÍ O FREKVENCI 50Hz.....	61
5.7 MĚŘENÍ ZTRÁT PŘI 12kHz PWM. NAPĚTÍ O FREKVENCI 50Hz.....	62

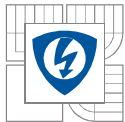


6 SROVNÁNÍ HODNOT	62
7 ZÁVĚR.....	66
LITERATURA	67
PŘÍLOHY	68



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1.1 Příklad statoru [12]</i>	14
<i>Obr. 1.1.2 Model klecové kotvy motoru</i>	15
<i>Obr. 1.2.1 Vznik síly, která otáčí rotorem [4]</i>	16
<i>Obr. 1.3.1 Tok výkonů asynchronního stroje v motorickém režimu</i>	17
<i>Obr. 1.4.1 Příklad výskytu minoritních smyček v hysterezní smyčce [8]</i>	19
<i>Obr. 1.4.2 Doménová struktura látek [6]</i>	21
<i>Obr. 3.8.1 B-H křivka zadávaného materiálu (ocele) statoru a rotoru</i>	42
<i>Obr. 3.8.2 Vedení statoru</i>	43
<i>Obr. 3.8.3 Průřez rotorem a statorem v programu RMXprt</i>	43
<i>Obr. 5.1.1 Ochlazovací charakteristika motoru</i>	46
<i>Obr. 5.1.2 Schéma zapojení u zkoušky při zatížení při frekvenci 50Hz</i>	47
<i>Obr. 5.1.3 Zatěžovací křivka motoru během zkoušky při zatížení</i>	48
<i>Obr. 5.1.4 Schéma zapojení zkoušky naprázdno při 50Hz</i>	49
<i>Obr. 5.1.5 Určení ztrát třením a ztrát ventilačních ze závislosti konstantních ztrát na druhé mocnině napětí</i>	52
<i>Obr. 5.1.6 Určení ztrát v železe měřeného motoru</i>	53
<i>Obr. 5.2.1 Schéma zapojení u zkoušky při zatížení při 60Hz</i>	54
<i>Obr. 5.2.2 Zatěžovací křivka motoru během zkoušky při zatížení</i>	55
<i>Obr. 5.2.1 Schéma zapojení u zkoušky naprázdno při 60Hz</i>	56
<i>Obr. 5.2.2 Určení ztrát třením a ztrát ventilačních ze závislosti konstantních ztrát na druhé mocnině napětí</i>	57
<i>Obr. 5.2.3 Určení ztrát v železe měřeného motoru</i>	58



SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5.1.1 Určení ustálené teploty</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5.1.2 První část zaznamenaných hodnot u zkoušky při zatížení.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 5.1.3 Druhá část zaznamenaných hodnot u zkoušky při zatížení</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 5.1.4 Vypočtené hodnoty ze zkoušky při zatížení.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5.1.5 První část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 5.1.6 Druhá část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 5.1.7 Vypočtené hodnoty při měření naprázdno</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 5.2.1 První část změřených hodnot u zkoušky při zatížení.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 5.2.2 Druhá část změřených hodnot u zkoušky při zatížení</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 5.2.3 Vypočtené hodnoty u zkoušky při zatížení</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 5.2.1 První část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 5.2.2 Druhá část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 5.2.3 Vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6.1 Srovnání měřených a simulovaných hodnot (1. část)</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 6.2 Srovnání měřených a simulovaných hodnot (2. část).....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 6.3 Srovnání sinusového a PWM průběhu napětí při 40Hz</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 6.4 Srovnání sinusového a PWM průběhu napětí při 50Hz včetně analytického výpočtu</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 6.5 Srovnání měření a simulovaných hodnot sinusového průběhu napětí při 60Hz</i>	<i>64</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	- magnetická indukce [T]
$\cos\varphi$	- účinník/power factor – p.f. [-]
$D_{1,2}$	- vnitřní průměr statoru, rotoru [m]
f	- frekvence [Hz]
F_m	- magnetické napětí celého magnetického obvodu [A]
H	- intenzita magnetického pole [A/m]
$h_{j1,2}$	- výška jha statoru, rotoru [m]
$h_{z1,2}$	- výška zubů statoru, rotoru [m]
I	- proud [A]
I_0	- proud naprázdno [A]
I_μ	- magnetizační proud [A]
k_c	- Carterův činitel [-]
l_{Fe}	- délka železa motoru [m]
l_{td}	- střední délka závitů vinutí [m]
M	- moment [Nm]
$m_{j1,2}$	- hmotnost jha statoru, rotoru [kg]
$m_{z1,2}$	- hmotnost zubů statoru, rotoru [kg]
n	- otáčky rotoru [min^{-1}]
N	- počet závitů vinutí [-]
n_s	- otáčky statoru (synchronní otáčky) [min^{-1}]
N_s	- počet závitů v sérii [-]
p	- součinitel pro přepočítání parametrů mezi statorem a rotorem [-]
P	- výkon na hřídeli motoru [W]
P_1	- příkon motoru [W]
P_{10}	- příkon naprázdno [W]
P_{mech}	- mechanický výkon motoru [W]
P_σ	- výkon na vzduchové mezeře (přenášený ze statoru do rotoru) [W]
$Q_{1,2}$	- počet drážek rotoru a statoru [-]
R	- odpor [Ω]
R_0	- odpor naprázdno [Ω]
S_1	- průřez cívky statorového vinutí [m^2]
S_{hd}	- plocha dynamické hysterezní křivky [J/m^3]



S_{hs} – plocha hysterezní křivky [J/m^3]

U – napětí [V]

U_0 – napětí naprázdno [V]

U_δ – magnetické napětí ve vzduchové mezeře [A]

X_{11} – magnetizační reaktance [Ω]

X_σ – rozptylová reaktance [Ω]

$X_{\sigma\mu}$ – rozptylová reaktance s uvažováním vlivu natočení drážek [Ω]

β – poměrné zkrácení kroku vinutí [-]

δ – rozměr vzduchové mezery [m]

δ – ztrátový úhel [$^\circ$]

ΔP_d – dodatečné ztráty [W]

ΔP_e – přídavné ztráty [W]

ΔP_{Fe1} – ztráty v železe statoru [W]

ΔP_{Fe2} – ztráty v železe rotoru [W]

ΔP_{fw} – ventilační ztráty a ztráty třením [W]

ΔP_h – ztráty hysterezní [W]

ΔP_{j0} – ztráty ve vinutí naprázdno [W]

ΔP_{j1} – ztráty ve vinutí statoru [W]

ΔP_{j2} – ztráty ve vinutí rotoru [W]

ΔP_k – konstantní ztráty [W]

ΔP_{mech} – mechanické ztráty [W]

ΔP_v – ztráty vířivými proudy [W]

ΔP_z – ztráty magnetickým zpožděním [W]

η – účinnost [-]

λ – činitel magnetické vodivosti [-]

σ – činitel vlivu natočení drážek [-]

υ – teplota [$^\circ C$]

ϕ – magnetický tok [Wb]

ω – úhlová rychlost [rad/s]

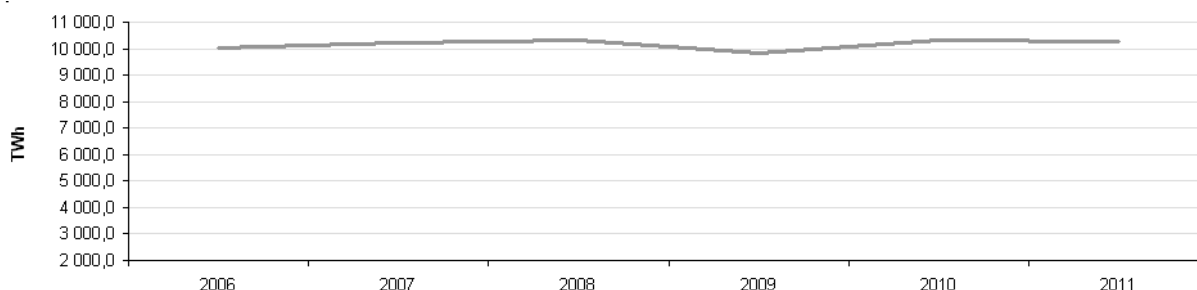
Úvod

Asynchronní stroje spadají do velké skupiny elektrických strojů, které elektromechanicky přeměňují energii. Elektrické stroje, které přeměňují elektrickou energii na mechanickou, nazýváme motory. Elektrické stroje, které naopak přeměňují mechanickou energii na elektrickou, nazýváme generátory. Tato práce se zejména bude zabývat právě asynchronními motory a jejich ztrátami v železe.

Asynchronní motory jsou nejvíce rozšířenými elektromotory vůbec, hlavně díky tomu, že jejich konstrukce je většinou jednodušší, výroba je levnější, mají malé nároky na údržbu a jsou provozně velice spolehlivé.

Každoročně vzroste celosvětově spotřeba elektrické energie. Proto je záhodno spotřebu elektrické energie u jednotlivých spotřebičů snižovat, ostatně díky Evropské unii se již zavedlo několik opatření a předpisů. Spotřebu elektrické energie lze obecně snížit menším odebíraným výkonem spotřebiče. Řešením je tedy zvýšením účinnosti daného spotřebiče, potažmo zmenšením jeho ztrát. Nejprve je však potřeba ztráty analyzovat a potom lze následně řešit problém jejich snížení.

Vzhledem k tomu, že asynchronní motory jsou, jak již bylo zmíněno, velice rozšířené hlavně v průmyslu, tento trend snižování spotřeby elektrické energie se jim pravděpodobně také nevyhne.



Obr. 0.1.1 Celosvětová spotřeba elektrické energie [13]

V práci bude nejprve popsán samotný asynchronní motor, tedy jeho konstrukce a princip funkce. Dalším bodem práce bude popsání jednotlivých druhů ztrát, přičemž se práce zaměří především na ztráty v železe motoru.

Na asynchronním motoru TM90-2S od firmy EMP Slavkov bude provedeno měření při různých frekvencích a průbězích napájecího napětí. V programu Maxwell – RMXprt bude provedena simulace tohoto motoru. Na základě výrobní dokumentace motoru bude ještě proveden výpočet jeho parametrů a ztrát. Výsledky měření, výpočtu a simulace budou v závěru práce porovnány.

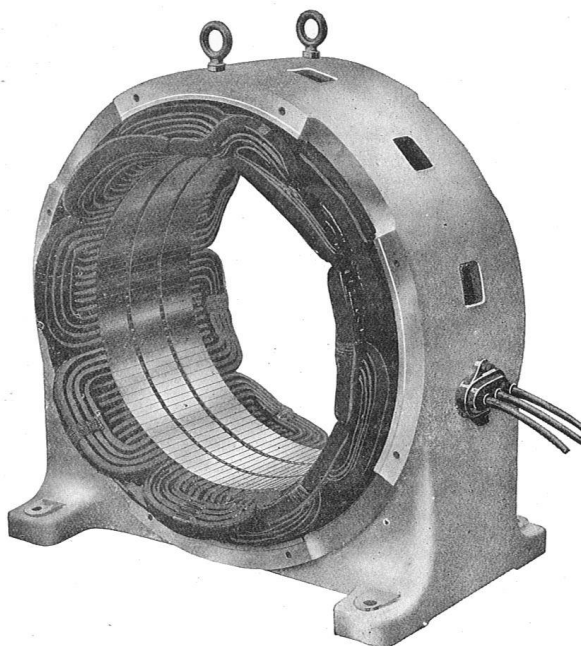
1 ASYNCHRONNÍ MOTOR

Jak již bylo v úvodu této práce zmíněno, asynchronní motory patří do velké skupiny elektrických strojů. Obecně lze tedy říct, že přeměňují energii elektrickou na energii mechanickou. Používají se především motory s lineárním nebo otáčivým mechanickým pohybem. Výkony asynchronních motorů se pohybují řádově od zlomků W do tisíců kW. Napětí největších motorů může dosahovat 10 a více kV. Kmitočet běžných nejrozšířenějších trojfázových motorů vyráběných na našem území dosahuje stejných hodnot jako kmitočet distribuční sítě elektrické energie a sice 50Hz. Otáčky těchto motorů pak většinou bývají od cca 500 do cca 3000min⁻¹. Avšak kmitočet zvláštních motorů může nabývat hodnot v řádech tisíců Hz a otáčky takových motorů mohou dosahovat i několik set tisíc za minutu.

1.1 Konstrukce

Asynchronní motor se stejně jako většina strojů, které přeměňují mechanickou energii na mechanickou nebo naopak, skládá obecně ze dvou základních částí. První částí je stator, který je pevnou částí stroje. Druhou částí stroje je pohyblivá část, která se u strojů s otáčivým pohybem nazývá rotor.

Statorový svazek je nalisován v kostře a tvoří část magnetického obvodu. Ve většině případů je kostra litinová. Na vnitřním obvodu statoru jsou drážky, ve kterých je uloženo trojfázové vinutí. Začátky a konce tohoto vinutí jsou vyvedeny na statorovou svorkovnici umístěnou na kostře [4].



Obr. 1.1.1 Příklad statoru [12]

Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera umožňující pohyb rotoru. Samotný rotor je nalisován na hřídeli, která má na svých koncích ložiska a je uložena v ložiskových štítech. Na této hřídeli může být většinou u motorů menších výkonů umístěn ještě ventilátor pro chlazení motoru. V rotorových drážkách na vnější straně obvodu je stejně jako ve satorových umístěno vinutí. Tomuto vinutí se říká kotva motoru [4].



Obr. 1.1.2 Model klecové kotvy motoru

Rotory dělíme podle typu konstrukce kotvy:

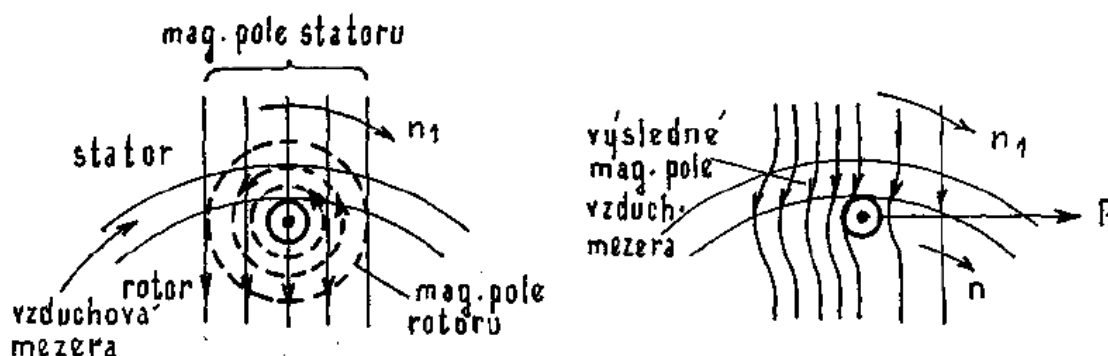
- Kotva nakrátko/klecová kotva - v drážkách rotoru jsou nalisované tyče, které jsou na začátku a konci rotoru spojeny zkratovacími kroužky. Tyto tyče svým uspořádáním vytvoří klec. Nejčastěji jsou tyče z hliníku, mědi, nebo mosazi a nejsou izolované.
- Kroužková kotva – v drážkách rotoru je uloženo trojfázové vinutí z izolovaných vodičů, které je spojeno do hvězdy a v některých případech i do trojúhelníka. Začátky fází rotorového vinutí jsou připojeny do uzlu a konce jsou připojeny na tři sběrací kroužky. Na tyto kroužky dosedají uhlíkové kartáče, které jsou připojeny na rotorovou svorkovnici [4],[10].

1.2 Princip činnosti

Statorové vinutí trojfázového asynchronního motoru je připojeno na trojfázovou síť. Magnetické pole, které je vytvořeno tímto vedením, pak protíná vodiče rotoru a indukuje v těchto vodičích napětí. Je-li vinutí rotoru uzavřeno, pak jím protéká elektrický proud a tento proud vytváří magnetické pole rotoru. Vzájemným působením těchto magnetických polí pak vzniká síla, která působí na vodiče rotoru ve směru, ve kterém se pohybuje magnetické pole statoru [4].

Napětí a proud se však ve vodičích rotoru při běžné zátěži bude indukovat jen v případě relativního pohybu pole statoru vůči rotoru. Rotor se tedy nemůže otáčet synchronně s magnetickým polem statoru. Kdyby se stator a rotor dostal do synchronismu, magnetická pole by se vůči sobě nepohybovala, a tudíž by se v motoru neindukovalo napětí a nevznikala by točivá síla [4],[2].

Rozdíl otáček statoru a rotoru, vztažený na jednu otáčku statoru vyjadřuje skluz. Otáčky magnetického pole statoru závisí na počtu pólů motoru a kmitočtu napájecího napětí. S mechanickým zatížením motoru se mění i skluz, který při jmenovitém zatížení leží v intervalu (0;1). Prakticky platí, že čím větší bude motor, tím jeho skluz bude menší [4][10].

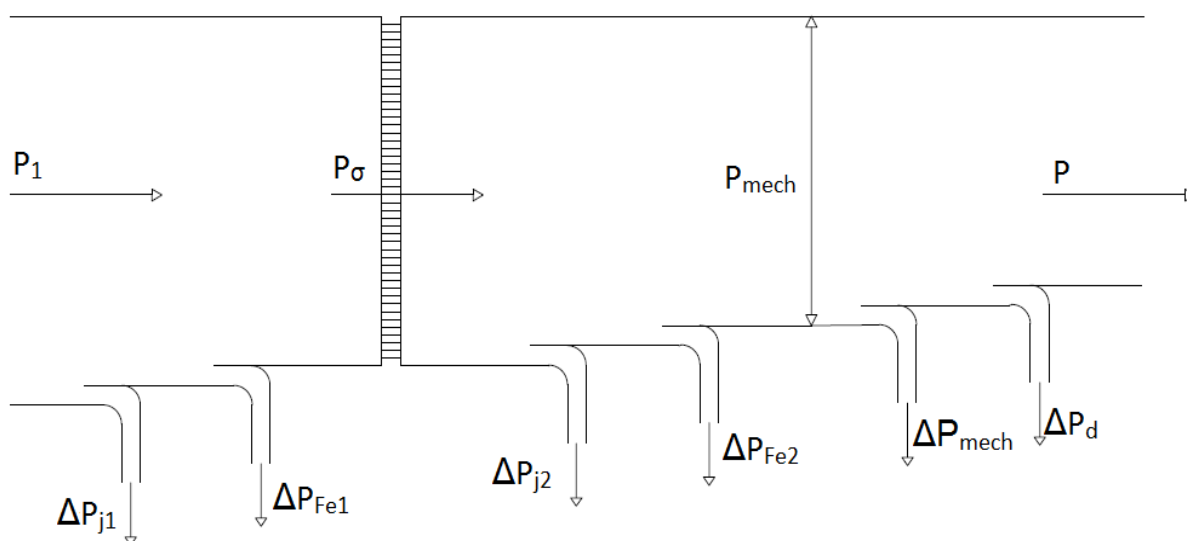


Obr. 1.2.1 Vznik síly, která otáčí rotorem [4]

1.3 Ztráty v motorickém režimu asynchronního stroje

Ztráty obecně v asynchronních strojích dělíme na:

1. mechanické ztráty ΔP_{mech} ,
2. ztráty v železe statoru ΔP_{Fe1} ,
3. ztráty v železe rotoru ΔP_{Fe2} ,
4. Jouleovy ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1} – tedy ztráty, které vznikají při průchodu elektrického proudu ve vinutí statoru,
5. Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{j2} – tedy ztráty, které vznikají při průchodu elektrického proudu ve vinutí rotoru,
6. dodatečné/přídavné ztráty v železe ΔP_d ,
7. případně ještě elektrické ztráty v kartáčích (podle normy ČSN 35 0015“Určení účinnosti elektrických strojů točivých“ se tyto ztráty nezjišťují při určování účinnosti asynchronního stroje) [1].



Obr. 1.3.1 Tok výkonů asynchronního stroje v motorickém režimu

Na obrázku lze vidět znázornění toku výkonů v asynchronním motoru. Než se příkon motoru P_1 předá točivým polem ze statoru do rotoru přes vzduchovou mezeru (vnitřní výkon P_σ), je zmenšen o Jouleovy ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1} a o ztráty v železe statoru ΔP_{Fe1} .

$$P_{\sigma} = P_1 - \Delta P_{Fe1} - \Delta P_{j1} \quad (1.1)$$

Nyní se výkon, který se přenesl do rotoru P_{σ} , přemění na mechanický výkon P_{mech} . Nejdříve se však zmenší o ztráty v železe rotoru ΔP_{Fe2} a o Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{j2} .

$$P_{\text{mech}} = P_1 - \Delta P_{Fe2} - \Delta P_{j2} \quad (1.2)$$

Nakonec se z mechanického výkonu P_{mech} odečte další část díky mechanickým ztrátám ΔP_{mech} a dodatečným ztrátám ΔP_d . Zmenšený výkon o tyto ztráty je výkon, který je na hřídeli motoru P a může být předáván jiným zařízením připojeným na tuto hřídel.

$$P = P_{\text{mech}} - \Delta P_d - \Delta P_{\text{mech}} \quad (1.3)$$

1.4 Ztráty v železe

Ztráty v železe obecně představují výkon spotřebovaný ve feromagnetických materiálech - při působení střídavého magnetického pole (průchodu střídavého proudu) na tyto materiály. Výkon, respektive energie, která se takto spotřebuje, má za následek zpoždění vektoru magnetické indukce B za vektorem intenzity magnetického pole H . Navíc je tato energie provázena ohřevem materiálu. Zpoždění vektorů B a H vyjadřujeme ztrátovým úhlem δ . Ztráty v železe lze rozdělit na:

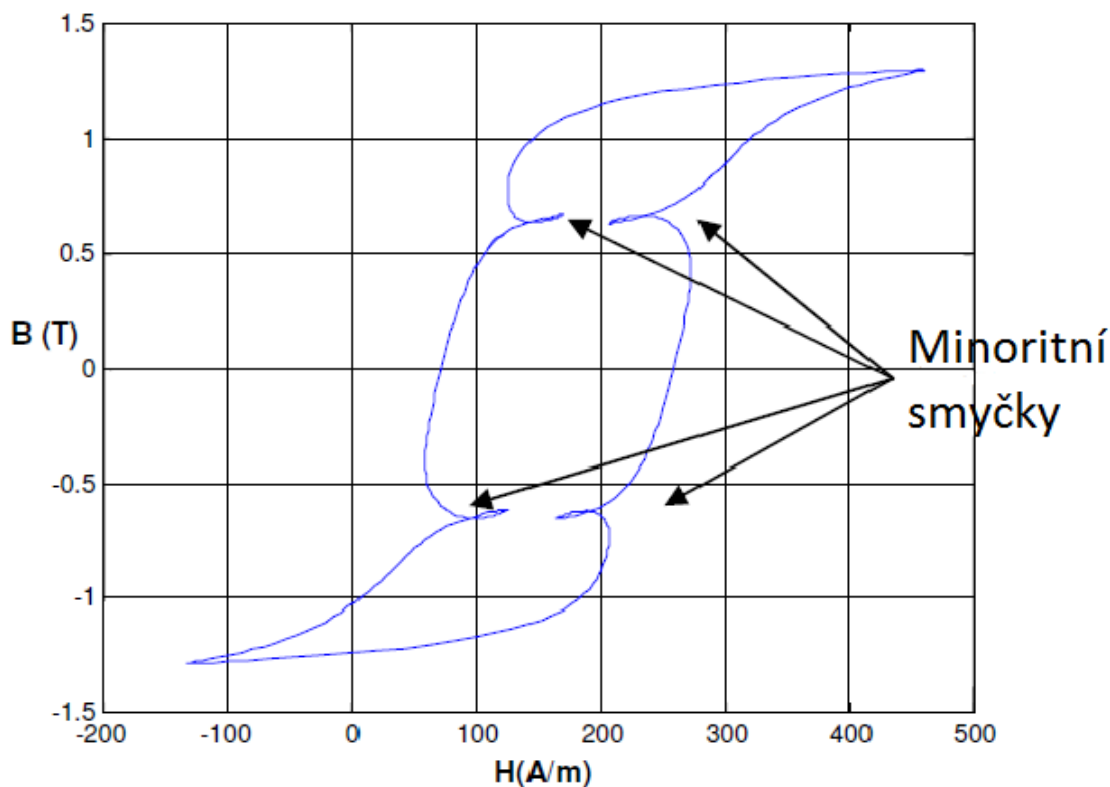
- hysterezní ztráty ΔP_h ,
- ztráty vířivými proudy ΔP_v ,
- ztráty magnetickým zpožděním ΔP_z ,
- přídatné ztráty ΔP_e [6].

Důležité je také však znát charakter změny (průběh) magnetické indukce.

Změny magnetické indukce:

- střídavé
- rotační.

Střídavé průběhy magnetické indukce lze dále rozdělit na sinusové a nesinusové. Nesinusový tvar je způsoben díky výskytu různých harmonických. To má za následek, že v samotné hysterezní smyčce se mohou vyskytnout ještě menší vedlejší/minoritní smyčky, které záleží právě na počtu harmonických [8]. Minoritní smyčky jsou zobrazeny na Obr. 1.4.1.



Obr. 1.4.1 Příklad výskytu minoritních smyček v hysterezní smyčce [8]

Rotační průběhy lze také dále rozdělit, a sice na kruhové a elipsovité [9].

1.4.1 Sinusový tvar magnetické indukce

Hysterezní ztráty vznikají při přemagnetizování železa. Jsou způsobeny změnami v magnetickém poli a jsou přímo úměrné stupni deformace krystalické mřížky daného feromagnetika. Tyto ztráty jsou přímo úměrné součinu frekvence magnetického pole f , objemu materiálu V a plochy statické hysterezní smyčky S_{hs} [J/m^3] [6]:

$$\Delta P_h = f V S_{hs}. \quad (1.4)$$

Popřípadě můžeme k výpočtu použít Steinmetzovu rovnici [8]:

$$\Delta p_h = k_h f B_{max}^n, \quad (1.5)$$

kde koeficienty k_h a n závisí na použitém magnetickém materiálu a B_{max} maximální (špičková) hodnota magnetické indukce.

Steinmetzova věta říká, že se díky měnícímu se magnetickému poli zpožďuje pole magnetizace feromagnetických látek. Tomu se říká hysterezní jev. Ztráta energie za jeden cyklus na jednotku objemu je dána Steinmetzovou rovnicí.

$$Q = \eta B^n. \quad (1.6)$$

B - je maximální magnetická indukce [T],

η – je hysterezní koeficient závislý na druhu feromagnetika,

n – mocninný činitel, který nabývá hodnot 1,6 - 3

Ztráty vířivými proudy jsou způsobeny indukováním elektrického napětí magnetickým polem v železném jádře. Lenzův zákon říká, že proudy působí svým magnetickým proti změně magnetického indukčního toku, která zapříčinila vzniku vířivých proudů. Proudů tak zeslabují budící magnetický tok. Největší zeslabení bude uprostřed průřezu vodiče, kde je střed průřezu obepínán všemi proudy [8][9].

Tloušťka feromagnetika a jeho rezistivita značně ovlivňuje ztráty vířivými proudy. Ztráty hysterezními proudy jsou na rozdíl od hysterezních ztrát závislé na časovém průběhu magnetické indukce. Tyto ztráty se rovněž vypočtou jako součin frekvence magnetického pole a objemu materiálu, ale s tím rozdílem, že plochu statické hysterezní smyčky odečteme od plochy dynamické hysterezní křivky [6].

$$\Delta P_v = fV(S_{hd} - S_{hs}) \quad (1.7)$$

Případně lze ztráty vířivými proudy vypočíst dle vzorce:

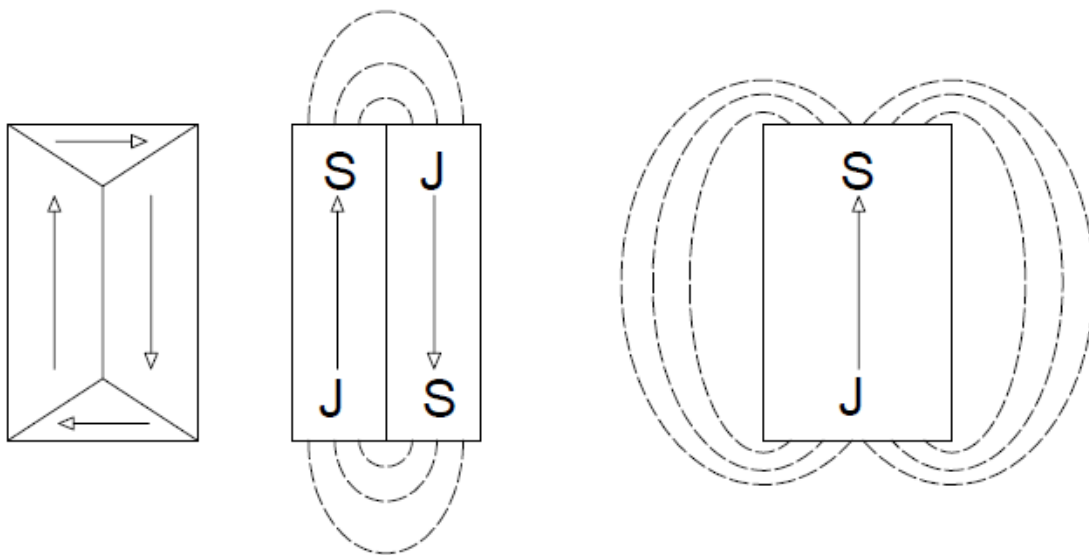
$$\Delta P_v = \frac{f^2 \sigma d^2 \pi^2 B_{max}^2}{6}, \quad (1.8)$$

kde σ je elektrická konduktivita, ρ rezistivita materiálu, μ permeabilita materiálu a d tloušťka, která má podmínku $d < \sqrt{\frac{\rho}{\mu \pi f}}$.

Přídavné ztráty jsou způsobeny parazitickými proudy, které jsou velmi malé a mají velkou frekvenci, kterou obíhají kolem doménové struktury ve směru magnetizace materiálu [8].

$$\Delta p_e = k_a f^{1,5} B_{max}^{1,5}, \quad (1.9)$$

kde koeficient je roven $k_a = \sqrt{\sigma G S V_0}$, S je průřez materiálu, G a V_0 jsou stavové konstanty materiálu a magnetizace.



Obr. 1.4.2 Doménová struktura látek [6]

Celkové ztráty v železe tedy vypočteme jako součet ztrát hysterezních, ztrát vířivými proudy a přídatných ztrát.

$$\Delta P_{fe} = \Delta P_h + \Delta P_v + \Delta P_e \quad (1.10)$$

1.4.2 Nesinusový tvar magnetické indukce

Hysterezní ztráty v nesinusovém tvaru magnetické indukce ovlivňují pouze minoritní smyčky. Minoritní smyčka se v hysterezní křivce vyskytne díky obrácenému toku v průběhu magnetické indukce, který vzniká díky výskytu různých harmonických. S ohledem na výskyt minoritních smyček se pak hysterezní ztráty spočítají [8]:

$$\Delta P_h = C_h k_h f B_{max}^n, \quad (1.11)$$

kde C_h je korekční činitel hysterezních ztrát, který uvažuje práce [8].

Ztráty vířivými proudy můžeme následně vypočítat podle rovnice:

$$\Delta P_v = \frac{f^2 \sigma d^2 \pi^2}{6} \sum_{n=0}^{\infty} n^2 B_n^2, \quad (1.12)$$

kde B_n jsou harmonické v magnetické indukci.

Přídavné ztráty lze vypočítat podle vzorce [8]:

$$\Delta P_e = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1,5} dt \quad (1.13)$$

2 ANALYTICKÝ VÝPOČET ASYNCHRONNÍHO MOTORU

V této kapitole budou uvedeny vzorce, kterých bude využíváno při analytickém výpočtu předloženého motoru. Vzorce byly převzaty z literatury [14] a [3].

2.1 Výpočet magnetizačního proudu

Činitel zkrácení kroku vinutí:

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y}{t_p} \frac{\pi}{2}\right) [-], \quad (2.1)$$

kde $\frac{y}{t_p}$ je zkrácení kroku statorového vinutí.

Počet drážek na pól a fázi statorového vinutí:

$$q = \frac{Q_1}{2p * m} [-], \quad (2.2)$$

kde je: - Q_1 počet drážek statoru,
- m počet fází vinutí statoru.

Činitel rozlohy statorového vinutí:

$$k_{r1} = \frac{0,5}{q * \sin \frac{30^\circ}{q}} [-]. \quad (2.3)$$

Činitel statorového vinutí:

$$k_{v1} = k_{r1} k_{y1} [-]. \quad (2.4)$$

Magnetický tok:

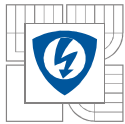
$$\phi = \frac{k_E U_{1n}}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_{s1} k_{v1} f_1} [Wb], \quad (2.5)$$

kde je: - k_E součinitel napětí [-] určený podle [14],

- f_1 kmitočet napájecího napětí [Hz],

- U_{1n} jmenovité fázové napětí [V],

- N_{s1} počet závitů statorového vinutí v sérii [-].



Magnetická indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_{\delta} = \frac{p\phi}{D_1 l_i} [T], \quad (2.6)$$

kde je: - D_1 vnitřní průměr statoru [m],
- l_i ideální délka vzduchové mezery [m].

Drážková rozteč statoru:

$$t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q_1} [m]. \quad (2.7)$$

Vnější průměr rotoru:

$$D_2 = D_1 - 2\delta [m]. \quad (2.8)$$

Drážková rozteč rotoru:

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} [m], \quad (2.9)$$

kde Q_2 je počet drážek rotoru [-].

Magnetická indukce v zubech statoru:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} t_{d1} l_i}{b_{z1} l_{Fe1} k_{Fe}} [T], \quad (2.10)$$

kde je: - b_{z1} šířka zubu statoru [m],
- l_{Fe1} aktivní délka statorového svazku [m],
- k_{Fe} činitel plnění železa [-].

Magnetická indukce v zubech rotoru:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} t_{d2} l_i}{b_{z2} l_{Fe2} k_{Fe}} [T], \quad (2.11)$$

- b_{z2} šířka zubu statoru [m],
- l_{Fe2} aktivní délka statorového svazku [m].

Výška jha statoru:

$$h_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} [m], \quad (2.12)$$

kde h_{d1} je hloubka drážky statoru.

Výpočtová výška jha rotoru:

$$h_{j2} = \frac{2 + p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) [m], \quad (2.13)$$

kde h_{d2} je hloubka rotorové drážky [m].

Magnetická indukce ve jhu statoru:

$$B_{j1} = \frac{\phi}{2h_{j1}l_{Fe1}k_{Fe}} [T]. \quad (2.14)$$

Magnetická indukce ve jhu rotoru:

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2h_{j2}l_{Fe2}k_{Fe}} [T]. \quad (2.15)$$

Koeficienty κ_1 a κ_2 pro Carterův činitel:

$$\kappa_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)} [-], \quad (2.16)$$

$$\kappa_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)} [-], \quad (2.17)$$

kde $b_{01,02}$ je otevření statorové/rotorové drážky [m].

Carterův činitel:

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \kappa_1\delta} [-], \quad (2.18)$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \kappa_2\delta} [-]. \quad (2.19)$$

Carterův činitel stroje:

$$k_c = k_{c1}k_{c2} [-]. \quad (2.20)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$U_\delta = 1,59 * 10^6 B_\delta k_c \delta [A]. \quad (2.21)$$

Výpočtová výška zubu statoru:

$$h_{z1} = h_{d1} - 0,1b_1[m], \quad (2.22)$$

a zubu rotoru:

$$h_{z2} = h_{d2} - 0,1b_2[m], \quad (2.23)$$

kde $b_{1,2}$ je vnitřní rozměr statorové/rotorové drážky [m].

Magnetické napětí zubů statoru:

$$U_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} [A], \quad (2.24)$$

kde H_{z1} je intenzita magnetického pole při magnetické indukci v zubech statoru B_{z1} určená podle magnetizační křivky použité elektrotechnické oceli [A/m].

Magnetické napětí zubů rotoru:

$$U_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} [A]. \quad (2.25)$$

Činitel nasycení zubů:

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} [-]. \quad (2.26)$$

Výška rotorového jha:

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} [m]. \quad (2.27)$$

Délka střední magnetické indukční čáry ve jhu statoru:

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p} [m]. \quad (2.28)$$

Délka střední magnetické indukční čáry ve jhu rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h - h_{j2})}{2p} [m], \quad (2.29)$$

kde D_h je vnitřní rozměr rotoru [m].

Magnetické napětí jha statoru:

$$U_{j1} = l_{j1}H_{j1} [A], \quad (2.30)$$

kde H_{j1} je intenzita magnetického pole při magnetické indukce ve jhu statoru B_{j1} určená podle magnetizační křivky použité elektrotechnické oceli [A/m],

a magnetické napětí jha rotoru:

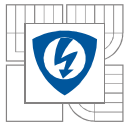
$$U_{j2} = l_{j2}H_{j2} [A]. \quad (2.31)$$

Magnetické napětí celého magnetického obvodu (na jednu pólovou dvojici):

$$F_m = U_\delta + U_{j1} + U_{j2} + U_{z1} + U_{z2} [A]. \quad (2.32)$$

Činitel nasycení magnetického obvodu:

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} [-]. \quad (2.33)$$



Magnetizační proud:

$$I_{\mu} = \frac{pF_m}{0,9m_1N_{s1}k_{v1}} [A]. \quad (2.34)$$

2.2 Výpočet odporu vinutí statoru

Průřez vodiče cívky statorového vinutí:

$$S_1 = \pi \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 [m^2], \quad (2.35)$$

kde d_1 je průměr vodiče cívky statorového vinutí [mm].

Střední délka závitu vinutí:

$$l_{td} = 2(l_d + l_{\xi}) [m], \quad (2.36)$$

kde je: - l_d délka drážkové části (konstrukční délka statorového svazku),

- l_{ξ} délka čela cívky.

Přepočet rezistivity mědi na požadovanou teplotu v_2 :

$$\rho_{Cu,v2} = \rho_{Cu,v1} \left(1 + \frac{v_2 - v_1}{234,5 + v_2} \right) [\Omega m]. \quad (2.37)$$

Odpor vinutí statoru:

$$R_1 = k_{\sim} \rho_{Cu,v2} \frac{l_{td} N_{s1}}{S_1 a} [\Omega], \quad (2.38)$$

kde je: - a počet paralelních větví vinutí [-],

- $k_{\sim}$ činitel zvětšení odporu působením povrchového jevu [-]

2.3 Výpočet odporu vinutí rotoru

Odpor rotorové tyče:

$$R_t = \frac{l_t}{S_t} k_{\sim} \rho_t [\Omega], \quad (2.39)$$

kde je: - l_t délka rotorové tyče [m],

- S_t průřez tyče rotoru [m²],

- ρ_t rezistivita rotorové tyče při uvažované teplotě [Ωm].

Příčný řez kruhů nakrátko:

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} [m^2], \quad (2.40)$$

kde je: - a_{kn} střední výška kruhů nakrátko [m],

- b_{kn} střední šířka kruhů nakrátko [m].

Střední průměr kruhů nakrátko:

$$D_{kn} = D_2 - a_{kn} [m]. \quad (2.41)$$

Odpor části kruhu nakrátko mezi dvěma sousedícími tyčemi:

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} [\Omega], \quad (2.42)$$

kde je: - D_{kn} střední průměr kruhu nakrátko [m],

- ρ_{kn} rezistivita materiálu kruhů nakrátko [Ωm].

Odpor jedné fáze rotorového vinutí:

$$R_2 = R_t + \frac{2R_{kn}}{\left(2\sin\frac{\pi p}{Q_2}\right)^2} [\Omega]. \quad (2.43)$$

Součinitel pro výpočet odporu rotoru na počet závitů statorového vinutí:

$$p = \frac{4m_1(N_{s1}k_{v1})^2}{Q_2} [-]. \quad (2.44)$$

Odpor statoru přepočtený na počet závitů statorového vinutí:

$$R'_2 = R_2 p [\Omega]. \quad (2.45)$$

2.4 Rozptylová reaktance statorového vinutí

Činitel magnetické vodivosti drážky statoru:

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{3b} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b+2b_0} + \frac{h_0}{b_0}\right) k'_\beta [-], \quad (2.46)$$

kde: - h_3, h_1, h_0, b, b_0 jsou rozměry daného typu drážek podle [14] [m],

- $k_\beta = k'_\beta$ je činitel kroku vinutí [-].

Poměrné zkrácení kroku vinutí:

$$\beta = \frac{2}{3} \frac{q_1 + 1}{q_1} [-]. \quad (2.47)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel statoru:

$$\lambda_{c1} = 0,34 \frac{q_1}{l_i} (l_c - 0,64 \beta t_p) [-]. \quad (2.48)$$

Činitel natočení drážek:

$$\beta_\gamma = \frac{b_\gamma}{t_{d2}} [-]. \quad (2.49)$$

Činitel pro výpočet činitele magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru:

$$\varepsilon_1 = 2k'_\gamma k_\beta - k_{v1}^2 \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 (1 + \beta_\gamma^2) [-]. \quad (2.50)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru:

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \varepsilon_1 [-]. \quad (2.51)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{N_{s1}}{100} \right)^2 \frac{l_{Fe}}{p_1 q_1} (\lambda_{d1} + \lambda_{\zeta 1} + \lambda_{dif1}) [\Omega]. \quad (2.52)$$

Činitel vlivu natočení drážek:

$$\sigma_\gamma = 1 + 0,41 \left(\frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \frac{U_{1n}}{X_{1\sigma} l_\mu} [-]. \quad (2.53)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí s ohledem na vliv natočení drážek:

$$X_{1\sigma\gamma} = X_{1\sigma} \sigma_\gamma [\Omega]. \quad (2.54)$$

2.5 Rozptylová reaktance rotorového vinutí

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu

$$\lambda_{d2} = \left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8S_t} \right) + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} [-], \quad (2.55)$$

kde je: - b_0 rozměr rotorové drážky [m],

- h_0 výška otevření rotorové drážky [m],

- h_1 rozměr rotorové drážky [m],

- $k_d=1$ pro jmenovitý chod [-].

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel rotoru:

$$\lambda_{\zeta 2} = 2,3 \frac{D_{kn}}{Q_2 l_{Fe} \left(2 \sin \frac{\pi p}{Q_2} \right)^2} \log \frac{4,7 D_{kn}}{2a_{kn} + b_{kn}} [-]. \quad (2.56)$$

Činitel pro výpočet činitele magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotoru:

$$\varepsilon_2 = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} [-], \quad (2.57)$$

kde Δ_z je činitel určený z charakteristik z [14].

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotoru:

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \varepsilon_2 [-]. \quad (2.58)$$

Rozptylová reaktance rotorového vinutí:

$$X_{2\sigma} = 7,9 f_1 l_{Fe} (\lambda_{d2} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif2}) * 10^{-6} [\Omega]. \quad (2.59)$$

Přepočtená rozptylová reaktance rotorového vinutí na statorové:

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} p [\Omega]. \quad (2.60)$$

Přepočtená rozptylová reaktance rotorového vinutí na statorové vinutí s ohledem na vliv natočení drážek:

$$X_{2\sigma\lambda} = X'_{2\sigma} \sigma_\lambda [\Omega]. \quad (2.61)$$

2.6 Výpočet celkových ztrát v železe

Hlavní ztráty v železe statoru:

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (h_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + h_{dz} B_{z1}^2 m_{z1}) [W], \quad (2.62)$$

kde je: - $\Delta p_{1,0}$ měrné ztráty v železe [W/kg],

- β exponent závislý na druhu použité oceli,

- h_{dj} a h_{dz} činitelé uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v částech magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku.

Činitelé β_{01} a β_{02} pro výpočet amplitudy pulzací magnetické indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů statoru:

$$\beta_{01} = f \left(\frac{b_{02}}{\delta} \right) [-], \quad (2.63)$$

$$\beta_{02} = f \left(\frac{b_{01}}{\delta} \right) [-]. \quad (2.64)$$

Činitelé se určí z grafu podle [14].

Amplituda pulzací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů statoru:

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta [T]. \quad (2.65)$$

Amplituda pulzací indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů rotoru:

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta [T]. \quad (2.66)$$

Hustota povrchových ztrát statoru:

$$p_{\delta p1} = 0,5k_{01} \left(\frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 [W/m^2], \quad (2.67)$$

kde k_{01} je činitel respektující vliv opracování hlav zubů statoru a dle [14] je pro motory do 160kW $k_{01} \approx 1,4 - 1,8 [-]$.

Hustota povrchový ztrát rotoru:

$$p_{\delta p2} = 0,5k_{02} \left(\frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 [W/m^2], \quad (2.68)$$

kde k_{02} je činitel respektující vliv opracování hlav zubů rotoru a dle [14] je pro motory do 160kW $k_{02} \approx 1,4 - 1,8 [-]$.

Celkové povrchové ztráty ve statoru a rotoru:

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 l_{Fe} [W], \quad (2.69)$$

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} p_{\delta p1} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 l_{Fe} [W]. \quad (2.70)$$

Činitelé pro výpočet amplitudy pulzací magnetické indukce ve středním průřezu zubu statoru a rotoru:

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{01}}{\delta}} [-], \quad (2.71)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{02}}{\delta}} [-]. \quad (2.72)$$

Amplituda pulzací magnetické indukce ve středním průřezu zubu statoru:

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2t_{d1}} B_{z1} [T]. \quad (2.73)$$

Amplituda pulzací magnetické indukce ve středním průřezu zubu rotoru:

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{d2}} B_{z2} [T]. \quad (2.74)$$

Pulzní ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \left(\frac{Q_2 n}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} [W], \quad (2.75)$$

kde m_{z1} je hmotnost zubů statoru [kg].

Pulzní ztráty v zubech rotoru:

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \left(\frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} [W], \quad (2.76)$$

kde m_{z2} je hmotnost zubů rotoru [kg].

Dodatečné ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} [W]. \quad (2.77)$$

Celkové ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} [W]. \quad (2.78)$$

Činitel pro výpočet mechanických a ventilačních ztrát:

$$K_T = 1,3(1 - D_e) [-]. \quad (2.79)$$

Mechanické a ventilační ztráty:

$$\Delta P_{fw} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 [W]. \quad (2.80)$$

Ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno:

$$\Delta P_{j01} = m_1 R_1 I_\mu^2 [W]. \quad (2.81)$$

Činná složka proudu naprázdno:

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{fw} + \Delta P_{j01}}{m_1 U_{1n}} [A]. \quad (2.82)$$

Za předpokladu, že jalová složka proudu naprázdno I_{0j} je rovna magnetizačnímu proudu I_μ a výsledný proud naprázdno I_0 je roven proudu úměrnému ztrátám v železe I_{Fe} [14]:

$$I_{Fe} = I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{0j}^2} [A]. \quad (2.83)$$

2.7 Výpočet jmenovitého skluzu

Pro výpočet jmenovitého skluzu lze vyjít z rovnice pro výkon ve vzduchové mezeře uvedeného v předchozí podkapitole:

$$P_\delta = m_1 \frac{R'_2}{s} \frac{\kappa_1^2 U_{1n}^2}{\left(\frac{R'_2}{s} + \kappa_1^2 R_1 \right)^2 + (X'_{2\sigma\gamma} + \kappa_1 X_{1\sigma\gamma})^2} [W]. \quad (2.84)$$

Porovnáním rovnice 5.86 s rovnicí pro mechanický výkon (5.87) je výsledkem kvadratická rovnice:

$$s^2 \left(Z_{2,\infty}^2 + \frac{m_1 R'_2 \kappa_1^2 U_1^2}{P} \right) + s \left(2R_{2,\infty}' R_2' - \frac{m_1 R'_2 \kappa_1^2 U_1^2}{P} \right) + R_2'^2 = 0, \quad (2.85)$$

kde jmenovitý skluz se vypočte:

$$s_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} [-]. \quad (2.86)$$

V řešení kvadratické rovnice mají tedy výrazy a , b , c tyto hodnoty:

$$a = Z_{2\infty}'^2 + \frac{m_1 R_2' \kappa_1^2 U_1^2}{P}, \quad (2.87)$$

$$b = 2R_{2\infty}' R_2' - \frac{m_1 R_2' \kappa_1^2 U_1^2}{P}, \quad (2.88)$$

$$c = R_2'^2, \quad (2.89)$$

kde $R_{2\infty}'$ a $X_{2\infty}'$ jsou složky sekundární impedance $Z_{2\infty}'$ při skluzu $s=\infty$, přepočtené na stator:

$$Z_{2\infty}' = R_{2\infty}' + jX_{2\infty}' [\Omega], \quad (2.90)$$

$$R_{2\infty}' = \kappa_1^2 R_1 [\Omega], \quad (2.91)$$

$$X_{2\infty}' = \kappa_1^2 X_{1\sigma\mu} + X_{2\sigma\mu}' [\Omega]. \quad (2.92)$$

2.8 Výpočet jmenovitého proudu

Činitel primární vazby:

$$\kappa_1 = \frac{X_{11}}{X_{11} + X_{1\sigma\gamma}} [-], \quad (2.93)$$

kde X_{11} je magnetizační reaktance $[\Omega]$ spočtena dle vzorce:

$$X_{11} = \frac{U_1}{I_\mu} - X_{1\sigma\mu} [\Omega]. \quad (2.94)$$

Činitel sekundární vazby:

$$\kappa_2 = \frac{X_{11}}{X_{11} + X_{2\sigma\gamma}'} [-]. \quad (2.95)$$

Výkon ve vzduchové mezeře dle odvození z rovnice proudu rotoru:

$$P_\delta = m_1 \frac{R_2'}{s} \frac{\kappa_1^2 U_{1n}^2}{\left(\frac{R_2'}{s} + \kappa_1^2 R_1\right)^2 + \left(X_{2\sigma\gamma}' + \kappa_1 X_{1\sigma\gamma}\right)^2} [W], \quad (2.96)$$

kde jsou odpor R_1 a rozptylová reaktance $X_{1\delta\gamma}$ přepočítány na rotor.

Výkon na hřídeli/mechanický výkon:

$$P_m = (1 - s)P_\delta [W]. \quad (2.97)$$

Přepočtený proud I'_2 na stator:

$$I'_2 = \sqrt{\frac{s}{1-s} \frac{P}{R'_2}} [A]. \quad (2.98)$$

Proud rotoru:

$$I_2 = I'_2 \frac{m_1 N_{S1} k_{v1}}{m_2 N_{S2} k_{v2}} [A]. \quad (2.99)$$

Proud statoru:

$$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{R'_2}{sX'_{2\sigma\gamma} + X_{11}} \right)^2}}{\kappa_2} [A]. \quad (2.100)$$

Proud statoru s uvažováním ztrát v železe a dodatečných ztrát:

$$I_{1n} = I_1 + \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{fw}}{m_1 U_{1f}} \cos \varphi_n [A]. \quad (2.101)$$

3 ANALYTICKÝ VÝPOČET MOTORU TM90-2S

Z uvedených vzorců v předchozí kapitole budou vypočítány parametry motoru EMP Slavkov TM90-2S na základě dodané výrobní dokumentace [11] k tomuto motoru.

3.1 Analytický výpočet magnetizačního proudu motoru TM90-2S

Ze značení motoru vyplývá, že jde o 2pólový stroj (-2S, $2p=2$).

$$k_{y1} = \sin \left(\frac{y}{t_p} \frac{\pi}{2} \right) = \sin \left(1 \frac{\pi}{2} \right) = 1$$

$$q = \frac{Q_1}{2p * m} = \frac{24}{2 * 3} = 4$$

$$k_{r1} = \frac{0,5}{q * \sin \frac{30^\circ}{q}} = \frac{0,5}{4 * \sin \frac{30^\circ}{4}} = 0,9577$$

$$k_{v1} = k_{r1} k_{y1} = 0,9577 * 1 = 0,9577$$

Koeficient $k_E=0,9775$ byl odečten z [14].

$$\phi = \frac{k_E U_{1n}}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_1 k_{v1} f_1} = 0,9775 * \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} * 4 * 55 * 0,9577 * 50} = 4,8233 * 10^{-3} Wb$$

Vnitřní průměr statoru byl spolu s ideální délkou vzduchové mezery odečten z výrobní dokumentace $D_1=72mm$, $l_i=l_{Fe}=78mm$.

$$B_\delta = \frac{p\phi}{D_1 l_i} = \frac{1 * 4,8233 * 10^{-3}}{72 * 10^{-3} * 78 * 10^{-3}} = 0,8589T$$

$$t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q_1} = \frac{\pi * 72 * 10^{-3}}{24} = 9,4248mm$$

Šířka vzduchové mezery byla odečtena z výrobní dokumentace $\delta=0,3mm$.

$$D_2 = D_1 - 2\delta = 72 - 2 * 0,3 = 71,4mm$$

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi * 71,4 * 10^{-3}}{19} = 11,8058mm$$

Šířka statorového zubu a činitel plnění železa byly odečteny z výrobní dokumentace $b_{z1}=4,13mm$, $k_{Fe}=0,94$.

$$B_{z1} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,8589 * 9,4248 * 10^{-3} * 78 * 10^{-3}}{4,13 * 10^{-3} * 78 * 10^{-3} * 0,94} = 2,08499T$$

Šířka statorového zubu byla odečtena z výrobní dokumentace $b_{z2}=5,1mm$.

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_{d2} l_i}{b_{z2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,8589 * 11,8058 * 10^{-3} * 78 * 10^{-3}}{5,1 * 10^{-3} * 78 * 10^{-3} * 0,94} = 2,1162T$$

Hloubka statorové drážky a vnější průměr statoru byly odečteny z výrobní dokumentace $h_{d1}=12,8mm$, $D_e=135mm$.

$$h_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} = \frac{135 - 72}{2} - 12,8 = 18,7mm$$

Hloubka rotorové drážky byla odečtena z výrobní dokumentace $h_{d2}=14mm$.

$$h_{j2} = \frac{2+p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) = \frac{2+1}{3,2 * 1} \left(\frac{71,4}{2} - 13,5 \right) = 20,3438mm$$

$$B_{j1} = \frac{\phi}{2h_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{4,8233 * 10^{-3}}{2 * 18,7 * 10^{-3} * 78 * 10^{-3} * 0,95} = 1,7589T$$

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2h_{j2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{4,8233 * 10^{-3}}{2 * 20,3438 * 10^{-3} * 78 * 10^{-3} * 0,95} = 1,6168T$$

Otevření statorové a rotorové drážky bylo odečteno z dokumentace $b_{01}=3\text{mm}$, $b_{02}=0\text{mm}$.

$$\kappa_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{3}{0,3}\right)^2}{5 + \left(\frac{3}{0,3}\right)} = 6,6667$$

$$\kappa_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{0}{0,3}\right)^2}{5 + \left(\frac{0}{0,3}\right)} = 0$$

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \kappa_1 \delta} = \frac{9,4248}{9,4248 - 6,6667 * 0,3} = 1,2694$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \kappa_2 \delta} = \frac{11,8058}{11,8058 - 0 * 0,3} = 1$$

$$k_c = k_{c1} k_{c2} = 1,2694 * 1 = 1,2694$$

$$U_\delta = 1,59 * 10^6 B_\delta k_c \delta = 1,59 * 10^6 * 0,8589 * 1,2694 * 0,3 * 10^{-3} = 520,0261A$$

Rozměry statorových a rotorových drážek byly odečteny z dokumentace $b_1=7,7\text{mm}$, $b_2=2,5\text{mm}$.

$$h_{z1} = h_{d1} - 0,1b_1 = 12,8 - 0,1 * 7,7 = 12,03\text{mm}$$

$$h_{z2} = h_{d2} - 0,1b_2 = 14 - 0,1 * 2,5 = 13,75\text{mm}$$

Intenzity magnetického pole při magnetické indukci v zubech statoru a rotoru byly určeny z [5] z magnetizační charakteristiky použitého materiálu M800-50A: $H_{z1}=12000\text{A/m}$, $H_{z2}=13250\text{A/m}$.

$$U_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2 * 12,03 * 10^{-3} * 12000 = 288,72A$$

$$U_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 2 * 13,75 * 10^{-3} * 13250 = 364,375A$$

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{288,72 + 364,375}{520,0261} = 2,2559$$

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi * (135 - 18,7)}{2 * 1} = 182,6836\text{mm}$$

Vnitřní průměr rotoru byl odečten z výrobní dokumentace $D_h=30\text{mm}$.

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h - h_{j2})}{2p} = \frac{\pi * (30 - 20,3438)}{2 * 1} = 15,168\text{mm}$$

Intenzity magnetického pole při magnetické indukci ve jhu statoru a rotoru byly určeny z [5] z magnetizační charakteristiky použitého materiálu M800-50A: $H_{j1}=6350$, $H_{j2}=2300\text{A/m}$

$$U_{j1} = l_{j1}H_{j1} = 182,6836 * 10^{-3} * 6350 = 1160,0409A$$

$$U_{j2} = l_{j2}H_{j2} = 15,168 * 10^{-3} * 2300 = 34,8864A$$

$$F_m = U_\delta + U_{j1} + U_{j2} + U_{z1} + U_{z2} = 520,0261 + 1160,0109 + 34,8864 + 288,72 + 364,375 = 2368,0485A$$

$$k_{\mu} = \frac{F_m}{U_{\delta}} = \frac{2368,0485}{520,0261} = 4,5537$$

$$I_{\mu} = \frac{pF_m}{0,9mN_1k_{v1}} = \frac{1 * 2368,0485}{0,9 * 3 * 4 * 55 * 0,9577} = \underline{4,1629A}$$

3.2 Analytický výpočet odporu vinutí statoru motoru TM90-2S

Původní vinutí bylo nahrazeno, tudíž ve výrobní dokumentaci je nesprávný údaj o průměru vodiče statorového vinutí. Nový průměr statorového vinutí má hodnotu: $d_1=0,56\text{mm}$.

$$S_1 = \pi \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0,56 * 10^{-3}}{2} \right)^2 = 2,463 * 10^{-7} \text{m}^2$$

Délka vnitřní čtyřcívky:

$$l_{tdvnit\check{r}1} = 2(l_{dvnit\check{r}1} + l_{čvnit\check{r}1}) = 2 \left(168 - 80 + \frac{2\pi 40}{2p} \right) = 427,327 \text{mm}$$

$$l_{tdvnit\check{r}2} = 2(l_{dvnit\check{r}2} + l_{čvnit\check{r}2}) = 2 \left(188 - 96 + \frac{2\pi 48}{2 * 1} \right) = 485,593 \text{mm}$$

Délka vnější čtyřcívky:

$$l_{tdvněj\check{s}1} = 2(l_{dvněj\check{s}1} + l_{čvněj\check{s}1}) = 2 \left(174 - 80 + \frac{2\pi 40}{2 * 1} \right) = 439,327 \text{mm}$$

$$l_{tdvněj\check{s}2} = 2(l_{dvněj\check{s}2} + l_{čvněj\check{s}2}) = 2 \left(194 - 96 + \frac{2\pi 48}{2 * 1} \right) = 497,593 \text{mm}$$

$$l_{tdvnit\check{r}-celk} = 2(l_{dvnit\check{r}1} + l_{čvnit\check{r}2}) = 2(427,327 + 485,593) = 1,8738 \text{m}$$

$$l_{tdvněj\check{s}-celk} = 2(l_{dvněj\check{s}1} + l_{čvněj\check{s}2}) = 2(439,327 + 497,593) = 1,8498 \text{m}$$

$$l_{td} = \frac{l_{tdvnit\check{r}-celk} + l_{tdvněj\check{s}-celk}}{2} = 1,8498 \text{m}$$

Rezistivita mědi byla odečtena z [14] $\rho_{Cu,75}=1/47*10^{-6}\Omega\text{m}$.

$$\rho_{Cu,v2} = \rho_{Cu,v1} \left(1 + \frac{v_2 - v_1}{234,5 + v_1} \right) = \frac{1}{47} * 10^{-6} \left(1 + \frac{78 - 75}{234,5 + 75} \right) = 2,148 * 10^{-8} \Omega\text{m}$$

Činitel $k_{\sim}$ je podle [14] roven 1.

$$R_1 = k_{\sim} \rho_{Cu,v2} \frac{l_{td} N}{S_1 a} = 1 * 2,148 * 10^{-8} \frac{1,8498 * 55}{2,463 * 10^{-7} * 2} = \underline{4,4363\Omega}$$

3.3 Analytický výpočet odporu vinutí rotoru motoru TM90-2S

Z výrobní dokumentace byl odečten průřez tyče rotoru $S_t=53*10^{-6}\text{m}^2$, podle [14] je $l_t=l_{Fe}$ a $\rho_{t,75}=1/21,5 * 10^{-6} [\Omega\text{m}]$.

$$R_t = \frac{l_t}{S_t} k_{\sim} \rho_t = \frac{78 \cdot 10^{-3}}{53 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 \cdot \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} = 6,8451 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Z výrobní dokumentace byla odečtena střední výška a šířka kruhů nakrátko $a_{kn}=15,5\text{mm}$, $b_{kn}=15,5\text{mm}$.

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} = 15,5 \cdot 10^{-3} \cdot 15,5 \cdot 10^{-3} = 2,4025 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$$

$$D_{kn} = D_2 - a_{kn} = 71,4 - 15,5 = 55,9 \text{mm}$$

Podle [14] je $\rho_{kn}=\rho_t$.

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \frac{\pi 0,0559}{19 \cdot 2,4025 \cdot 10^{-4}} = 1,7894 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$R_2 = R_t + \frac{2R_{kn}}{\left(2\sin\frac{\pi p}{Q_2}\right)^2} = 6,8451 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 1,7894 \cdot 10^{-6}}{\left(2\sin\frac{\pi 1}{19}\right)^2} = 10,1476 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$p = \frac{4m_1(N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot (4 \cdot 55 \cdot 0,95766)^2}{19} = 28034,8151$$

$$R'_2 = R_2 p = 10,1476 \cdot 10^{-5} \cdot 28034,8151 = \underline{2,8449 \Omega}$$

3.4 Analytický výpočet rozptylové reaktance statorového vinutí motoru TM90-2S

Rozměry drážek byly odečteny z výrobní dokumentace $h_3=11,3\text{mm}$, $h_2=0\text{mm}$, $h_1=1\text{mm}$, $h_0=0,5\text{mm}$, $b=5,7\text{mm}$, $b_0=3\text{mm}$

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{3b} k_{\beta} + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b+2b_0} + \frac{h_0}{b_0}\right) k'_{\beta} = \frac{11,3}{3 \cdot 5,7} 1 + \left(\frac{0}{5,7} + \frac{3 \cdot 1}{5,7+2 \cdot 3} + \frac{0,5}{3}\right) 1 = 1,0839 \text{mm}$$

$$\beta = \frac{2q_1+1}{3q_1} = \frac{2 \cdot 4+1}{3 \cdot 4} = \frac{5}{6}$$

$$\lambda_{\zeta 1} = 0,34 \frac{q_1}{l_i} (l_{\zeta} - 0,64 \beta t_p) = 0,34 \frac{4}{78 \cdot 10^{-3}} \left(138,23 \cdot 10^{-3} - 0,64 \frac{5}{6} \frac{\pi \cdot 72 \cdot 10^{-3}}{2}\right) = 1,358$$

Činitel natočení drážek byl odečten z dokumentace motoru $\beta_{\gamma}=1,26$.

$$\varepsilon_1 = 2k'_{\gamma} k_{\beta} - k_{v1}^2 \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}}\right)^2 (1 + \beta_{\gamma}^2) = 2 \cdot 2,51 \cdot 1 - 0,9577^2 \cdot \left(\frac{11,3097}{9,4248}\right)^2 \cdot (1 + 1,26^2) = 1,2964$$

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \varepsilon_1 = \frac{9,4248}{12 \cdot 0,3 \cdot 1,2694} 1,2964 = 2,6736$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \frac{l_{Fe}}{p_1 q_1} (\lambda_{d1} + \lambda_{\zeta 1} + \lambda_{dif1}) =$$

$$\begin{aligned}
 &= 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l_{Fe}}{p_1 q_1} (\lambda_{d1} + \lambda_{\xi 1} + \lambda_{dif 1}) = \\
 &= 15,8 \frac{50}{100} \left(4 * \frac{55}{100} \right)^2 \frac{0,078}{1 * 4} (1,0839 + 1,358 + 1,2964) = 3,8145 \Omega \\
 \sigma_\gamma &= 1 + 0,41 \left(\frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \frac{U_{1n}}{X_{1\sigma} I_\mu} = 1 + 0,41 \left(\frac{0,0149}{0,1131} \right)^2 \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{3,8145 * 4,2495} = 1,1032 \\
 X_{1\sigma\gamma} &= X_{1\sigma} \sigma_\gamma = 3,8145 * 1,1032 = \underline{4,208 \Omega}
 \end{aligned}$$

3.5 Analytický výpočet rozptylové reaktance rotorového vinutí motoru TM90-2S

Z výrobní dokumentace byly odečteny parametry rotorové drážky $h_1=9,45\text{mm}$, $h_0=0,8\text{mm}$, $b=5,6\text{mm}$, $b_0=0\text{mm}$.

$$\begin{aligned}
 \lambda_{d2} &= \left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8S_t} \right) + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} = \\
 &= \left[\frac{9,45}{3 * 5,6} \left(1 - \frac{\pi 0,0056^2}{8 * 53 * 10^{-6}} \right) + 0,66 - \frac{0}{2 * 5,6} \right] 1 = 0,803 \\
 \lambda_{\xi 2} &= 2,3 \frac{D_{kn}}{Q_2 l_{Fe} \left(2 \sin \frac{\pi p}{Q_2} \right)^2} \log \frac{4,7 D_{kn}}{2 a_{kn} + b_{kn}} = \\
 &= 2,3 \frac{55,9}{19 * 78 \left(2 \sin \frac{\pi * 1}{19} \right)^2} \log \frac{4,7 * 55,9}{2 * 15,5 + 15,5} = 0,6021
 \end{aligned}$$

Činitel $\Delta_z=0$ je určen z grafické závislosti podle [14] z poměru b_0/t_{d2} .

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_2 &= 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi * p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi * 1}{19} \right)^2 - 0 = 1,0055 \\
 \lambda_{dif 2} &= \frac{t_{d2}}{12 \delta k_c} \varepsilon_2 = \frac{11,8058}{12 * 0,3 * 1,2694} * 1,0055 = 2,5906
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_{2\sigma} &= 7,9 f_1 l_{Fe} (\lambda_{d2} + \lambda_{\xi 2} + \lambda_{dif 2}) * 10^{-6} = \\
 &= 7,9 * 50 * 0,078 (0,803 + 0,6021 + 1,0055) * 10^{-6} = 12,3324 * 10^{-5} \Omega \\
 X'_{2\sigma} &= X_{2\sigma} p = 12,3324 * 10^{-5} * 28034,81505 = 3,4573 \Omega \\
 X_{2\sigma\lambda} &= X'_{2\sigma} \sigma_\lambda = 3,4573 * 1,1032 = \underline{3,814 \Omega}
 \end{aligned}$$

3.6 Analytický výpočet ztrát v železe motoru TM90-2S

Měrné ztráty v železe použitého materiálu jsou $\Delta p_{1,0}=3,05\text{W/kg}$. Exponent β je dle [1] 1,3. Činitelé $h_{dj}=1,6$ a $h_{dz}=1,8$ jsou určeny podle [14]. Z výrobní dokumentace byly odečteny hmotnosti:

- hmotnost železa statorového jha $m_{j1}=4,13\text{kg}$,
- hmotnost zubů statoru $m_{z1}=0,51\text{kg}$,
- hmotnost zubů rotoru $m_{z2}=0,67\text{kg}$.

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (h_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + h_{dz} B_{z1}^2 m_{z1}) =$$

$$= 3,15 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} (1,6 * 1,759^2 * 4,13 + 1,8 * 2,085 * 0,51) = 74,5272\text{W}$$

$$\beta_{01} = f\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right) = f\left(\frac{0}{0,3}\right) = 0$$

$$\beta_{02} = f\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right) = f\left(\frac{3}{0,3}\right) = f(10) \xrightarrow{\text{dle grafu z [14]}} \beta_{02} = 0,4$$

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta = 0 * 1,2694 * 0,8589 = 0\text{T}$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta = 0,4 * 1,2694 * 0,8589 = 0,4361\text{T}$$

Pro činitele k_{01} a k_{02} byla dle [14] zvolena hodnota 1,6.

$$p_{\delta p1} = 0,5 k_{01} \left(\frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 = 0,5 * 1,6 \left(\frac{19 * 2850}{10000} \right)^{1,5} (0 * 11,8058)^2 =$$

$$= 0\text{W/m}^2$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 = 0,5 * 1,6 \left(\frac{24 * 2850}{10000} \right)^{1,5} (0,4361 * 9,4248)^2 =$$

$$= 241,7408\text{W/m}^2$$

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 l_{Fe} = 0(9,4248 - 0) * 10^{-3} * 24 * 0,078 = 0\text{W}$$

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} (t_{d2} - b_{01}) Q_2 l_{Fe} = 241,7408(11,8058 - 3) * 10^{-3} * 19 * 0,078 = 4,2295\text{W}$$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{01}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3}{0,3}\right)^2}{5 + \frac{3}{0,3}} = 6,6667$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{02}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0}{0,3}\right)^2}{5 + \frac{0}{0,3}} = 0$$

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2 t_{d1}} B_{z1} = \frac{0 * 0,3}{2 * 9,4248} * 2,085 = 0\text{T}$$

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2 t_{d2}} B_{z2} = \frac{0,6667 * 0,3}{2 * 11,8058} * 2,1162 = 0,1793\text{T}$$

$$\Delta P_{p1} = 0,11 \left(\frac{Q_2 n}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} = 0,11 \left(\frac{19 * 2850}{1000} 0 \right)^2 0,51 = 0W$$

$$\Delta P_{p2} = 0,11 \left(\frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \left(\frac{24 * 2850}{1000} 0,1793 \right)^2 0,67 = 11,0795W$$

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 0 + 4,2295 + 0 + 11,0795 = 15,309W$$

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 74,5272 + 15,309 = 89,8362W$$

$$K_T = 1,3(1 - D_e) = 1,3(1 - 0,135) = 1,1245$$

$$\Delta P_{fw} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 = 1,1245 \left(\frac{2850}{10} \right)^2 0,135^4 = 30,3378W$$

$$\Delta P_{j01} = m_1 R_1 I_\mu^2 = 3 * 4,4363 * 4,1623^2 = 240,3395W$$

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{fw} + \Delta P_{j01}}{m_1 U_{1n}} = \frac{89,8362 + 30,3378 + 240,3395}{3 * \frac{400}{\sqrt{3}}} = 0,5204A$$

$$I_{Fe} = I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{0j}^2} = \sqrt{0,5204^2 + 4,1623^2} = 4,1953A$$

3.7 Analytický výpočet jmenovitého skluzu motoru TM90-2S

$$R'_{2\infty} = \kappa_1^2 R_1 = 0,92257^2 * 4,4363 = 3,7759\Omega$$

$$X'_{2\infty} = \kappa_1^2 X_{1\sigma\mu} + X'_{2\sigma\mu} = 0,92257^2 * 4,20797 + 3,8199 = 7,6961\Omega$$

$$Z'_{2\infty} = \sqrt{R_{2\infty}'^2 + X_{2\infty}'^2} = \sqrt{3,7759^2 + 7,6961^2} = 8,5725\Omega$$

$$a = Z_{2\infty}'^2 + \frac{m_1 R_2' \kappa_1^2 U_1^2}{P} = 8,5725^2 + \frac{3 * 2,8449^2 * 0,92257^2 * \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2}{1500} = -236,7948$$

$$b = 2R'_{2\infty} R_2' - \frac{m_1 R_2' \kappa_1^2 U_1^2}{P} = 2 * 3,7759 * 2,842 - \frac{3 * 2,8449^2 * 0,92257^2 * \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2}{1500} = 331,7672$$

$$c = R_2'^2 = 2,8449^2 = 8,0933$$

$$|s| = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-331,7672 + \sqrt{331,7672^2 + 4 * 236,7948 * 8,0933}}{2 * (-236,7948)} = 0,02398$$

3.8 Analytický výpočet jmenovitého proudu motoru TM90-2S

$$X_{11} = \frac{U_1}{I_\mu} - X_{1\sigma\mu} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{4,2495} - 4,20797 = 51,1371\Omega$$

$$\kappa_1 = \frac{X_{11}}{X_{11} + X_{1\sigma\gamma}} = \frac{51,1371}{51,1371 + 4,20797} = 0,92257$$

$$\kappa_2 = \frac{X_{11}}{X_{11} + X'_{2\sigma\gamma}} = \frac{51,1371}{51,1371 + 3,8199} = 0,9293$$

$$P_\delta = \frac{P}{1-s} = \frac{1500}{1-0,02398} = 1524,5674W$$

$$I'_2 = \sqrt{\frac{s}{1-s} \frac{P}{R'_2}} = \sqrt{\frac{0,02398}{1-0,02398} \frac{1500}{2,8449}} = 3,4537A$$

$$k_{v2} = \frac{0,5}{Q_2 \sin \frac{\pi p}{6Q_2}} = \frac{0,5}{19 \sin \frac{\pi * 1}{6 * 19}} = 0,9593$$

$$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{R'_2}{sX'_{2\sigma\gamma} + X_{11}} \right)^2}}{\kappa_2} = 3,5995 \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2,0596}{0,02398 * 3,81399 + 51,1371} \right)^2}}{0,9293} =$$

$$= 3,7196A$$

Za znalosti jmenovitého proudu rotoru a statoru lze určit ztráty ve vinutí rotoru a statoru:

$$\Delta P_{j1} = 3R_1 I_1^2 [W], \quad (3.1)$$

$$\Delta P_{j2} = 3R'_2 I_2^2 [W]. \quad (3.2)$$

$$\Delta P_{j1} = 3R_1 I_1^2 = 3 * 4,4363 * 3,7196^2 = 184,1368W$$

$$\Delta P_{j2} = 3R'_2 I_2^2 = 3 * 2,8449 * 3,4537^2 = 73,7021W$$

$$P_1 = P\Delta P_{Fe} + \Delta P_{fw} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} =$$

$$= 1500 + 184,1368 + 73,7021 + 184,1368 + 73,7021 = 1878,0127W$$

$$\cos \varphi_n = \frac{P_1}{m_1 U_{1f} I_{1n}} = \frac{1878,0127}{3 \frac{400}{\sqrt{3}} * 3,8428} = 0,7055$$

$$I_{1n} = I_1 + \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{fw}}{m_1 U_{1f}} \cos \varphi_n = 3,7196 + \frac{89,8362 + 30,3378}{3 \frac{400}{\sqrt{3}}} 0,7055 = 3,842A$$

Moment motoru:

$$M = \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{1500}{2\pi \frac{2850}{60}} = 5,0259 Nm$$

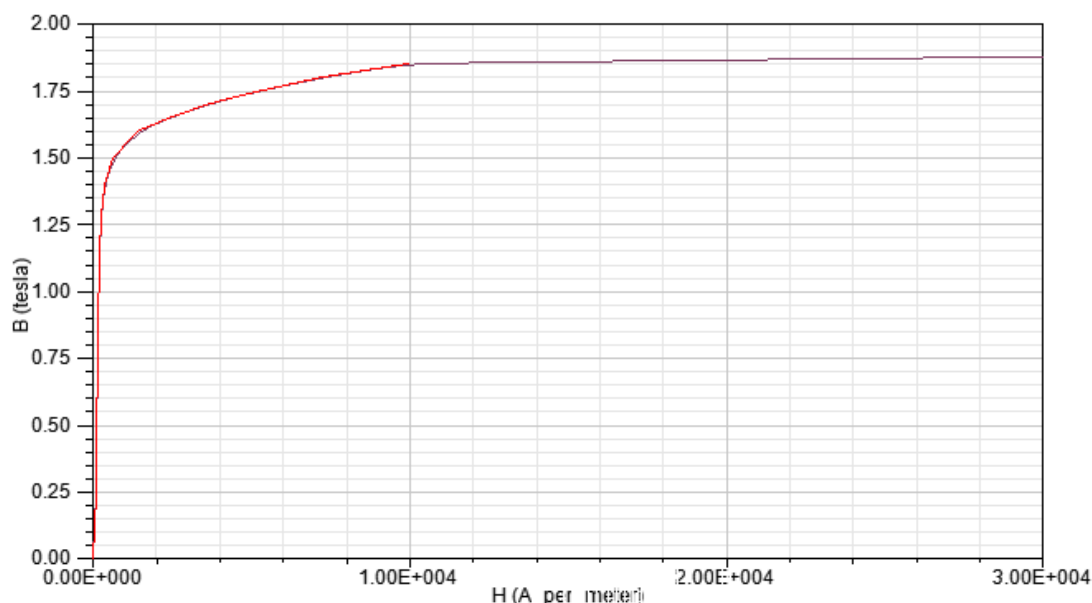
V kapitole 6 jsou shrnuty všechny důležité výsledky obdržené při výpočtech v této kapitole.

4 VÝPOČET POMOCÍ PROGRAMU RMXprt

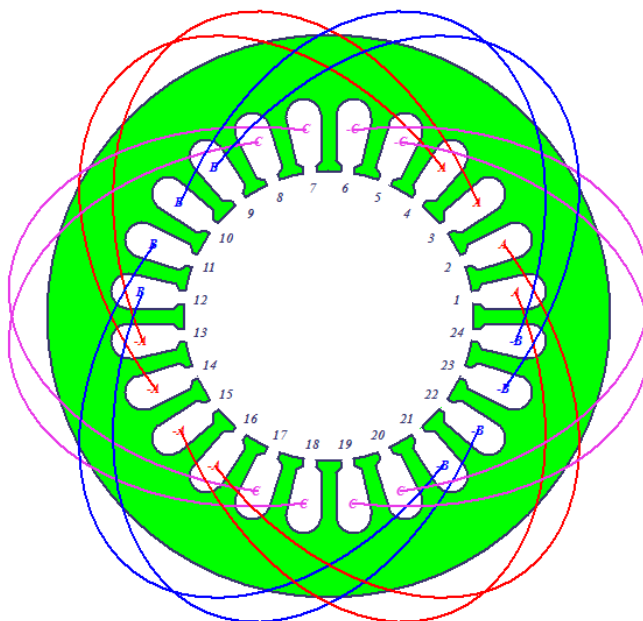
K výpočtu (simulaci) byl použit program Ansoft RMXprt (Rotation Machine expert) ve verzi 15.0. Tento program provádí, jak už jeho název napovídá, analýzu elektrických točivých strojů, přičemž provádí návrh i geometrických rozměrů a obvodových vlastností některých prvků strojů.

Z přednastavených šablon motorů programu byla zvolena šablona třífázového asynchronního motoru (Three-phase induction motor) a dle dodané technické dokumentace předloženého motoru EMP Slavkov TM90-2S byly zadány jeho údaje [11]. Nejprve tedy bylo zadáno, že se jedná o dvoupólový stroj s referenční rychlostí 2850 min^{-1} pracující v motorickém režimu.

Poté byly zadány geometrické rozměry statoru, jeho drážek a jeho materiálové vlastnosti. Tyto vlastnosti byly převzaty z katalogu společnosti Cogent [5]. Mimo jiné byly zadány rozměry a typy vedení statoru.

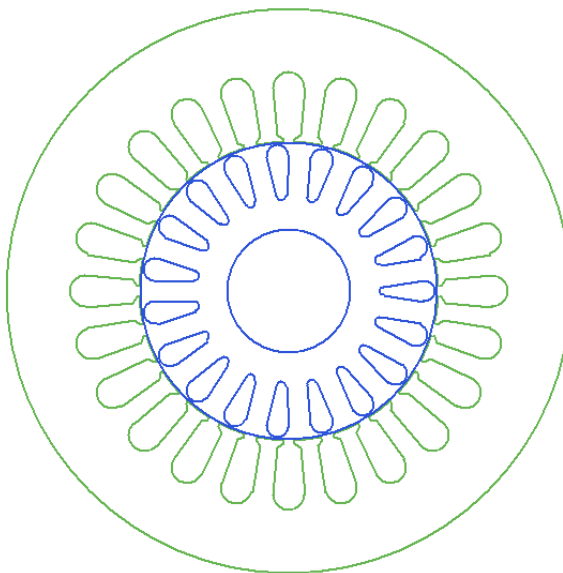


Obr. 3.8.1 B-H křivka zadávaného materiálu (ocele) statoru a rotoru



Obr. 3.8.2 Vedení statoru

V další části byly zadány geometrické rozměry rotoru, jeho drážek a rozměry a typ materiálu vedení (klece) rotoru.



Obr. 3.8.3 Průřez rotorem a statorem v programu RMXprt

Simulace byla provedena celkem třikrát pro sinusové průběhy napájecího napětí o různé frekvenci a sice 40Hz, 50Hz, 60Hz. Výsledky simulace jsou uvedeny v závěru ve srovnávací tabulce. Důležité výsledky z programu RMXprt jsou rovněž uvedeny a srovnány v kapitole 6.

5 MĚŘENÍ ZTRÁT NA MOTORU TM90-2S

V této kapitole budou uvedeny výsledky z měření na motoru EMP Slavkov TM90-2S. Měření bylo provedeno dle normy ČSN EN 60034-2-1.

5.1 Měření při sinusovém průběhu napájecího napětí o frekvenci 50Hz

Jak již bylo uvedeno v nadpisu, při prvním měření byl asynchronní motor napájený napětím, které mělo sinusový průběh a běžnou hodnotu síťové frekvence 50Hz.

Nejprve je třeba určit hodnotu odporu vinutí při zahřátém stavu zatíženého motoru. Ještě před zahřátím však byly odečteny hodnoty odporu vinutí motoru za studena (při teplotě 23°C).

$$R_{uU} = 3,08\Omega$$

$$R_{uV} = 3,072\Omega$$

$$R_{uW} = 3,074\Omega$$

$$R_{UV} = 6,182\Omega$$

$$R_{UW} = 6,177\Omega$$

$$R_{VW} = 6,16\Omega$$

Po cca hodině a půl byl motor dostatečně oteplen a mohla být určena ustálená hodnota odporu vinutí. Pro její určení však nejprve byly odečítány hodnoty odporu vinutí mezi fázemi U a V od 30s do 10minut, jinými slovy byla proměřena ochlazovací charakteristika vinutí statoru motoru.

t [s]	$R_{vin} [\Omega]$	$\vartheta [^{\circ}C]$
30	7,3980	73,1786
60	7,2980	69,0521
90	7,2180	65,7508
120	7,1560	63,1924
180	7,0616	59,2970
240	6,9940	56,5074
300	6,9500	54,6917
420	6,8857	52,0384
600	6,8292	49,7069
900	6,7599	46,8472

Tab. 5.1.1 Určení ustálené teploty

Odpor vinutí se následně musel přepočíst na teplotu podle vzorce:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta\vartheta), \quad (5.1)$$

jehož upravením je získána hodnota teploty:

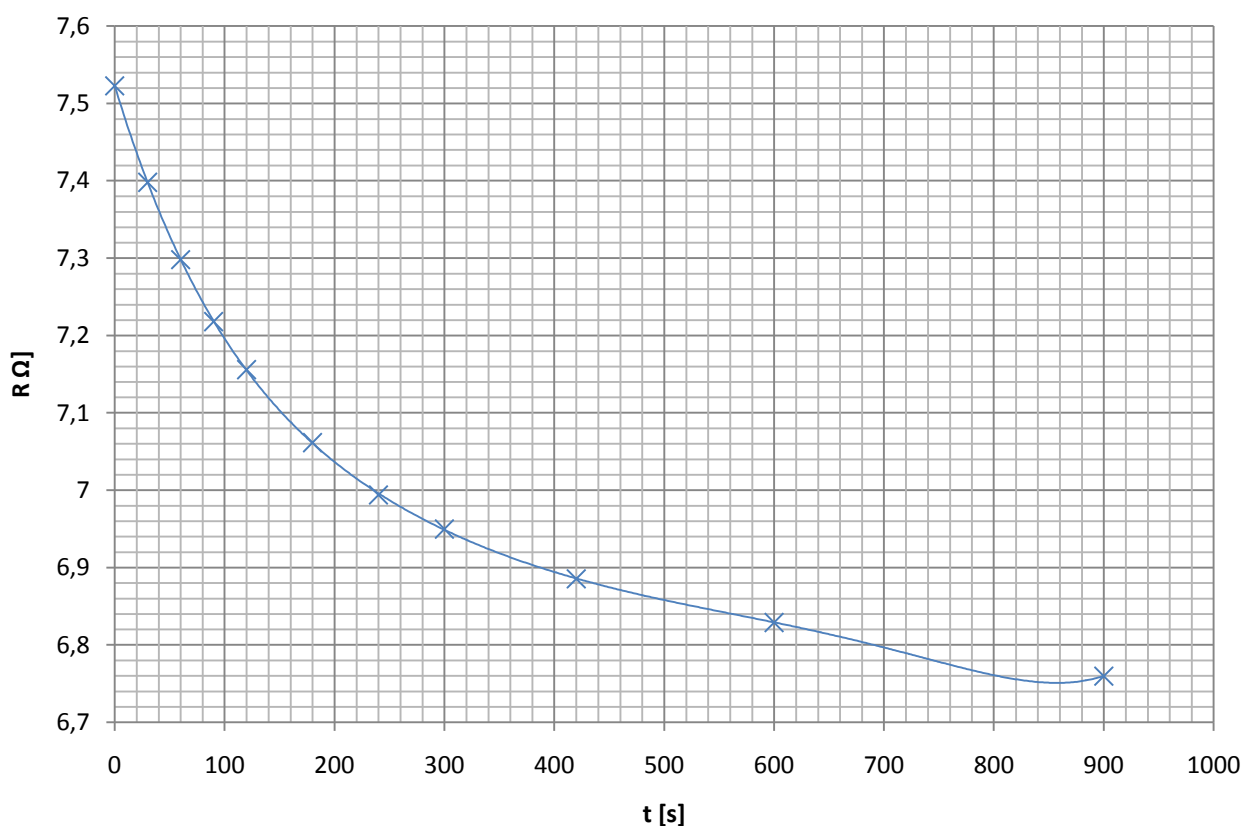
$$\vartheta = \frac{R - R_0}{R_0\alpha} + \vartheta_0 \quad (5.2)$$

Příklad výpočtu pro 1. řádek tabulky:

$$\vartheta = \frac{R_{vin} - R_0}{R_0\alpha} + \vartheta_0 = \frac{7,398 - 6,182}{6,182 * 3,92 * 10^{-3}} + 23 = 73,1786^{\circ}C,$$

kde teplotní součinitel elektrického odporu α činí pro měď $\alpha = 3,92 * 10^{-3} K^{-1}$.

Výsledkem měření je křivka závislosti odporu na čase. Extrapolací křivky obdržíme ustálenou hodnotu odporu, která odpovídá ustálené pracovní teplotě motoru.



Obr. 5.1.1 Ochlazovací charakteristika motoru

Proložením grafu zjistíme rovnici trendu, kterou je použita k extrapolaci:

$$R = -6,03151 \cdot 10^{-14} t^5 + 7,05773 \cdot 10^{-11} t^4 - 4,51294 \cdot 10^{-8} t^3 + 1,78026 \cdot 10^{-5} t^2 - 4,66050 \cdot 10^{-3} t + 7,5227,$$

kdy odpor je získán dosazením hodnoty času za t , v tomto případě odpor odpovídá hodnotě času 0.

Odpor motoru při jeho ustálené teplotě je tedy $R_m = 7,5227 \Omega$.

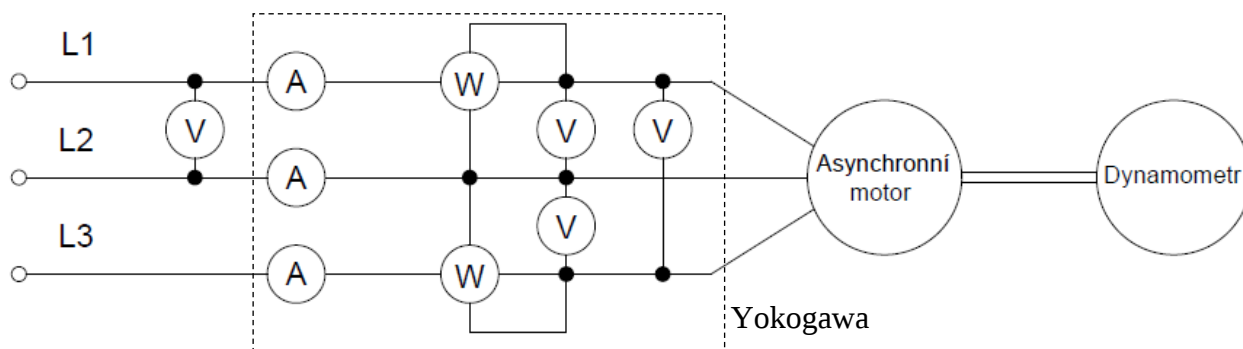
Nyní za znalosti ustáleného odporu lze určit pracovní teplotu motoru dle rovnice 8.2

$$\vartheta_{pr} = \frac{R_m - R_0}{R_0 \alpha} + \vartheta_0 = \frac{7,5227 - 6,182}{6,182 \cdot 3,92 \cdot 10^{-3}} + 23 = 78,3244^\circ\text{C}$$

5.1.1 Zkouška při zatížení měřeného motoru

Před provedením zkoušky naprázdno je potřeba vykonat zatěžovací zkoušku k zahřátí motoru na jeho pracovní teplotu. V tomto případě byl motor zahříván 1 – 1,5 hodiny. V následujících tabulkách jsou hodnoty odečtené při snižování zátěžného momentu. Průměrné

hodnoty napětí, proudu a příkonu multimetr Yokogawa zobrazoval do změřených hodnot po zvolení funkce průměru. Motor byl zapojen dle uvedeného schématu.



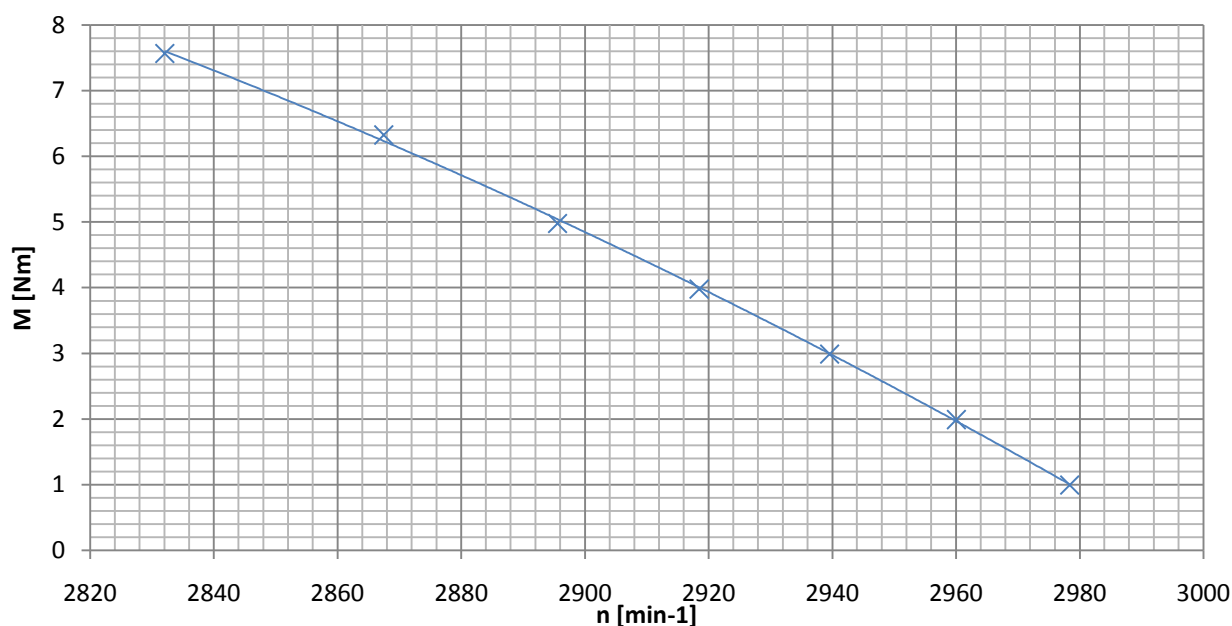
Obr. 5.1.2 Schéma zapojení u zkoušky při zatížení při frekvenci 50Hz

U_{efU} [V]	U_{efV} [V]	U_{efW} [V]	U_{ef} [V]	I_{efU} [A]	I_{efV} [A]	I_{efW} [A]	I_{ef} [A]
400,25	399,51	400,47	400,07	4,88	4,78	4,81	4,82
400,13	399,62	400,50	400,09	4,16	4,08	4,09	4,11
399,96	399,28	399,96	399,74	3,60	3,51	3,54	3,55
400,75	400,09	400,81	400,55	3,22	3,13	3,16	3,17
400,64	400,00	400,72	400,45	2,88	2,80	2,82	2,83
400,31	399,80	400,46	400,19	2,60	2,54	2,55	2,57
400,97	400,44	401,04	400,81	2,44	2,39	2,39	2,41

Tab. 5.1.2 První část zaznamenaných hodnot u zkoušky při zatížení

P_1 [W]	S [VA]	Q [VAr]	pf [-]	f_1 [Hz]	f_U [Hz]	n [min ⁻¹]	M [Nm]
2823,7	3341,6	1840,6	0,85	50,02	50,01	2832,1	7,57
2292,0	2847,3	1706,6	0,81	50,00	50,00	2867,5	6,33
1841,3	2458,3	1634,9	0,75	49,93	49,97	2895,6	4,98
1497,5	2198,4	1612,4	0,68	50,00	50,00	2918,5	3,98
1155,0	1963,6	1589,4	0,59	50,00	49,98	2939,6	2,99
817,1	1778,9	1580,7	0,46	49,98	49,98	2960,1	1,99
487,6	1669,6	1597,2	0,29	49,97	49,98	2978,4	1,00

Tab. 5.1.3 Druhá část zaznamenaných hodnot u zkoušky při zatížení



Obr. 5.1.3 Zatěžovací křivka motoru během zkoušky při zatížení

P [W]	η [%]	ΔP _s [W]	ΔP _r [W]
2244,1968	79,4772	263,2288	139,0233
1899,8962	82,8925	191,1399	88,5955
1510,0681	82,0110	142,7514	54,4514
1216,3859	81,2278	113,6903	35,1211
920,4242	79,6904	90,7316	19,4137
617,4820	75,5699	74,5405	8,4084
310,6497	63,7100	65,4801	2,2163

Tab. 5.1.4 Vypočtené hodnoty ze zkoušky při zatížení

Mechanický výkon je spočten z momentu a otáček motoru upravením vzorce:
 $P = M\omega$,

na následující vzorec, kde jsou dosazeny hodnoty z prvních řádků tabulek:

$$P = 2\pi M \frac{n}{60} = 2\pi * 7,57 * \frac{2832,1}{60} = 2244,1968W.$$

Výsledná účinnost je tedy:

$$\eta = \frac{P}{P_1} * 100 = \frac{2244,1968}{2823,7} 100 = 79,4722\%.$$

Ze zkoušky při zatížení jsou pro každý zatěžovací bod vypočteny hodnoty ztrát ve statoru ΔP_s a rotoru ΔP_r podle vzorců:

$$\Delta P_s = 1,5 I_{ef}^2 R_{st}, \quad (5.3)$$

$$\Delta P_r = s(P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe}), \quad (5.4)$$

$$\Delta P_s = 1,5 I_{ef}^2 R_{st} = 1,5 * 4,82^2 * 7,5472 = 263,2288 W.$$

Při výpočtu ztrát ve vinutí rotoru je dosazovaná hodnota ztrát v železe určená ze zkoušky naprázdno, přičemž se dle normy dosazuje stejná hodnota pro všechny zátěžové body. Postup určení ztrát v železe je popsán níže.

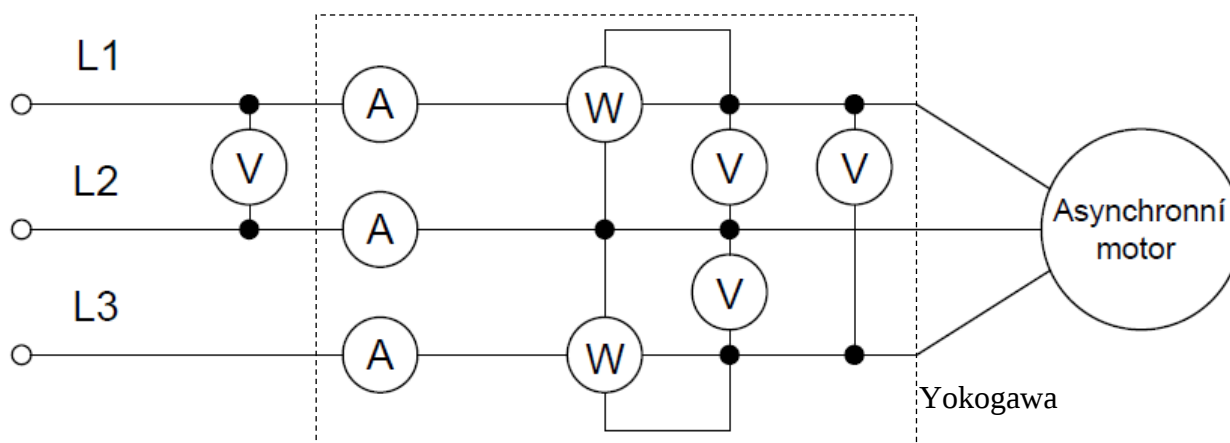
$$\Delta P_r = s(P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe}) = 0,056297 * (2823,7 - 263,2288 - 91,00846) = 139,0233 W$$

Přičemž skluz s byl vypočítán podle vzorce:

$$s = 1 - \frac{n}{f_{60}} = 1 - \frac{2832,1}{50 * 60} = 0,056297.$$

5.1.2 Zkouška naprázdno měřeného motoru

Při zkoušce naprázdno byl motor zapojen identicky jako během zkoušky při zatížení, jen s tím rozdílem, že hřídel motoru byla odpojena od dynamometru.



Obr. 5.1.4 Schéma zapojení zkoušky naprázdno při 50Hz

Výsledky ze zkoušky naprázdno jsou uvedeny v následujících tabulkách.

U_{efU} [V]	U_{efV} [V]	U_{efW} [V]	U_{ef} [V]	I_{eU} [A]	I_{efV} [A]	I_{efW} [A]	I_{ef} [A]
499,33	497,80	498,97	498,70	7,055	6,951	6,919	6,975
458,72	457,60	458,75	458,35	4,620	4,550	4,495	4,555
435,03	433,95	435,10	434,69	3,579	3,511	3,459	3,516
399,43	398,59	399,62	399,21	2,383	2,331	2,294	2,336
370,02	369,30	370,22	369,85	1,742	1,702	1,681	1,708
339,88	339,27	340,02	339,73	1,394	1,358	1,356	1,369
313,91	313,50	314,17	313,86	1,167	1,144	1,139	1,150
274,97	274,57	275,12	274,89	0,929	0,908	0,913	0,917
238,36	237,96	238,42	238,24	0,770	0,750	0,761	0,760
217,39	216,99	217,43	217,27	0,695	0,675	0,688	0,686
197,80	197,35	197,80	197,65	0,624	0,605	0,612	0,614
164,60	164,11	164,58	164,43	0,530	0,510	0,518	0,519
127,07	126,54	127,03	126,88	0,443	0,420	0,430	0,431
105,12	104,52	105,08	104,91	0,414	0,387	0,399	0,400
80,94	80,33	81,06	80,78	0,415	0,386	0,396	0,399

Tab. 5.1.5 První část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

P_{10} [W]	S [VA]	Q [VAr]	pf [-]	f_l [Hz]	f_U [Hz]
839,1	6024,8	5969,3	0,1393	49,980	49,972
438,1	3616,3	3591,2	0,1212	49,976	49,977
308,9	2647,6	2630,5	0,1167	50,008	50,006
196,3	1615,3	1603,9	0,1216	49,980	49,983
144,4	1094,4	1085,2	0,1319	49,981	49,986
113,7	805,7	798,3	0,1411	49,984	49,986
97,6	625,0	618,0	0,1561	49,968	49,972
79,3	436,6	429,7	0,1816	49,966	49,968
67,5	313,7	306,6	0,2151	49,976	49,975
61,9	258,1	250,8	0,2396	49,982	49,975
57,8	210,1	202,1	0,2753	49,971	49,981
51,1	147,9	139,0	0,3456	49,978	49,978
45,0	94,7	83,6	0,4746	49,990	49,977
42,0	72,6	59,6	0,5777	49,968	49,970
39,3	55,9	40,7	0,7033	49,957	49,981

Tab. 5.1.6 Druhá část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

ΔP_{s0} [W]	ΔP_k [W]	U_{ef}^2 [V]	ΔP_{fe} [W]
506,9395	332,1605	248701,6900	299,3301
216,1944	221,9056	210084,7225	189,0752
128,8147	180,0853	188955,3961	147,2549
56,8609	139,4391	159368,6241	106,6088
30,3979	114,0021	136789,0225	81,1718
19,5288	94,1712	115416,4729	61,3409
13,7805	83,8196	98508,0996	50,9892
8,7621	70,5379	75564,5121	37,7076
6,0186	61,4814	56758,2976	28,6511
4,9036	56,9964	47206,2529	24,1660
3,9283	53,8717	39065,5225	21,0413
2,8067	48,2933	27037,2249	15,4629
1,9356	43,0644	16098,5344	10,2340
1,6672	40,3328	11006,1081	7,5024
1,6589	37,6411	6525,4084	4,8108

Tab. 5.1.7 Vypočtené hodnoty při měření naprázdno

Po zkoušce naprázdno (odečtení nejnižší hodnoty napětí) byla také hned odečtena hodnota odporu vinutí:

$$R_{UV} = 6,95\Omega,$$

$$R_{UW} = 6,96\Omega,$$

$$R_{VW} = 6,93\Omega.$$

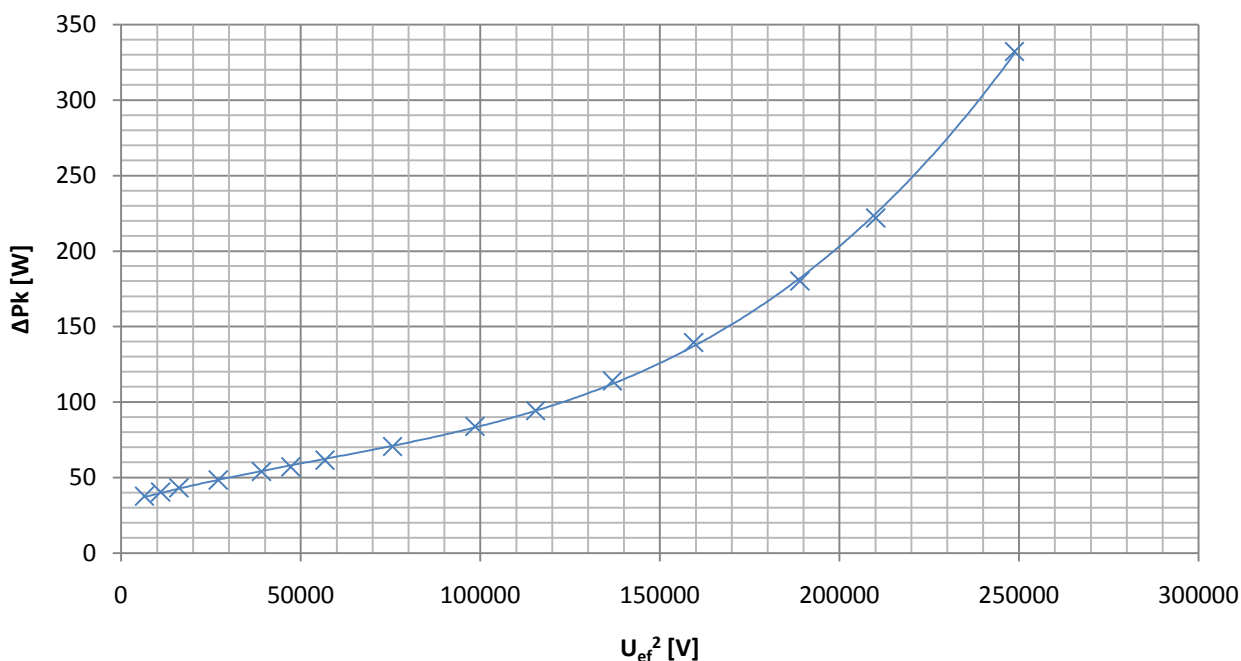
Nejprve jsou tedy určeny ztráty ve vinutí statoru ΔP_s :

$$\Delta P_{s0} = 1,5 R_{l10} I_{ef}^2 = 1,5 \frac{6,95 + 6,96 + 6,93}{3} 6,975^2 = 506,9395 W.$$

Konstantní ztráty ΔP_k jsou vypočteny odečtením ztrát ve statoru naprázdno ΔP_{s0} od příkonu naprázdno P_{10} :

$$\Delta P_k = P_{10} - \Delta P_{s0} = 839,1 - 506,9395 = 332,1605 W.$$

Nyní, když byly určeny konstantní ztráty, lze vytvořit závislost konstantních ztrát ΔP_k na druhé mocnině napájecího napětí U_{ef}^2



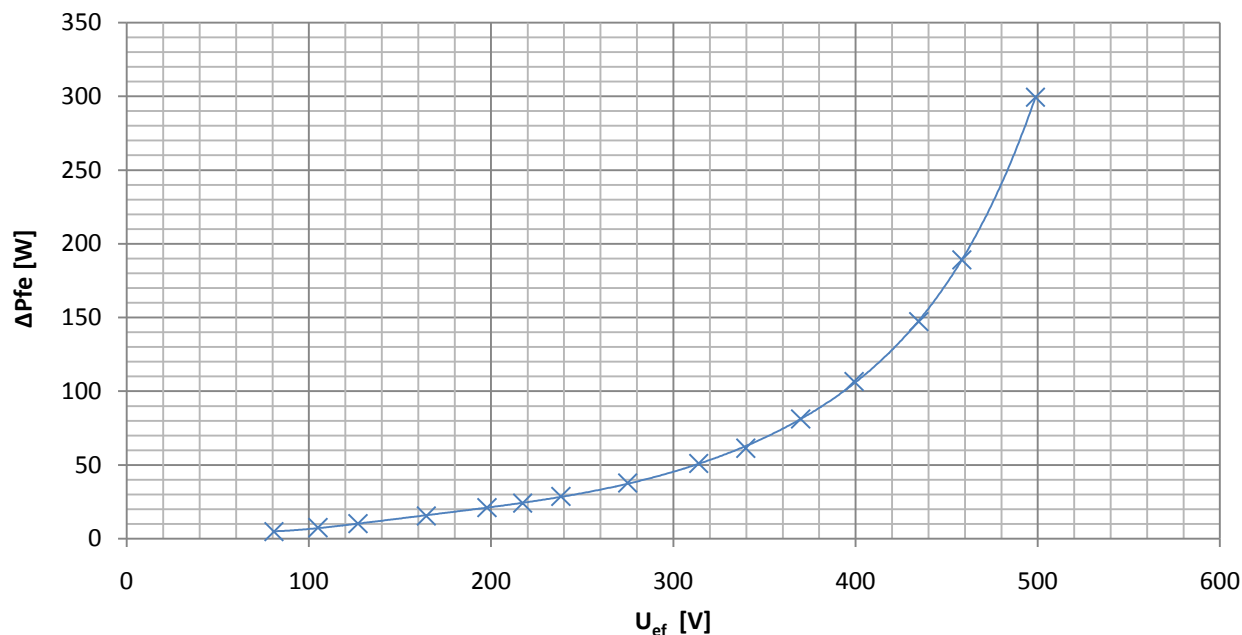
Obr. 5.1.5 Určení ztrát třením a ztrát ventilačních ze závislosti konstantních ztrát na druhé mocnině napětí

Proložení křivky a určením rovnicí funkce lze určit ztráty ventilační a ztráty třením ΔP_{fw} . Tyto ztráty podle normy odpovídají nulové hodnotě napětí:

$$\begin{aligned} \Delta P_k &= 2,501687 \cdot 10^{-14} U_{ef}^3 - 4,118040 \cdot 10^{-9} U_{ef}^2 + 6,74233010^{-4} U_{ef} + 32,8303 = \\ &= 2,501687 \cdot 10^{-14} \cdot 0 - 4,118040 \cdot 10^{-9} \cdot 0 + 6,74233010^{-4} \cdot 0 + 32,83035 = \\ &= 32,83035, \end{aligned}$$

tedy $\Delta P_{fw} = 32,83035 \text{ W}$.

Pro vypočítání ztrát v železe je třeba vytvořit křivku $\Delta P_{fe} = \Delta P_k - \Delta P_{fw}$ v závislosti na napětí U_{ef} . Z této závislosti proložení křivky a následným určením rovnice funkce lze vypočítat hodnotu ztrát v železe ΔP_{fe} při jmenovitém napětí.



Obr. 5.1.6 Určení ztrát v železe měřeného motoru

Nejprve je však potřeba vypočíst pro určování ztrát v železe napětí U_r podle rovnice:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} I R \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I R \sin\varphi\right)^2} =$$

$$\sqrt{\left(400,09 - \frac{\sqrt{3}}{2} * 3,551 * 7,5472 * 0,749\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} * 3,551 * 7,5472 * 0,6626\right)^2} = 383,01479V.$$

Napětí U_r je nyní dosazeno do rovnice funkce, kde je obdržena hodnota ztrát v železe motoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fe} &= 3,7199599531713 * 10^{-13} * 383,01479^6 - 5,5343722850432 * 10^{-10} \\ &\quad * 383,01479^5 + 3,3973860883443 * 10^{-7} * 383,01479^4 \\ &\quad - 1,0560318453587 * 10^{-4} * 383,01479^3 + 1,7495190219160 * 10^{-2} \\ &\quad * 383,01479^2 - 1,3226028365504 * 383,01479 + 40,659803863885 \\ &= 91,00846W. \end{aligned}$$

Celkové ztráty v motoru během měření jsou určeny podle vzorce:

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P_S + \Delta P_R + \Delta P_k \\ \Delta P_T &= 142,7514 + 45,4514 + 139,4391 = 336,642W \end{aligned}$$

5.2 Měření ztrát při sinusovém průběhu napájecího napětí o frekvenci 60Hz

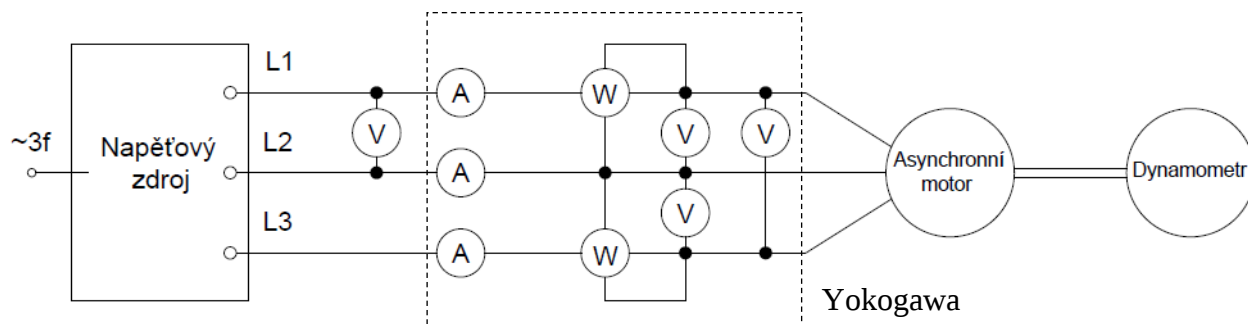
Obě zkoušky (naprázdno a při zatížení) byly provedeny stejným postupem jako zkoušky při frekvenci napájecího napětí 50Hz. Rovněž postupy a vzorce u vypočítaných hodnot obou zkoušek jsou identické. Frekvence 60Hz bylo dosaženo pomocí napěťového zdroje Ametek od firmy California Instruments. Vzhledem k tomu, že frekvence byla zvýšena, je nutné k dodržení sycení motoru zvednout také napětí. Poměr napětí a frekvence musí být konstantní, proto se napětí zvedlo z 400V na 480V.

$$\frac{U_{50}}{f} = \frac{400}{50} = 8 \text{ V/Hz}$$

$$U_{60} = 8f = 8 * 60 = 480\text{V}$$

5.2.1 Zkouška při zatížení

Motor byl zapojen podle schématu:



Obr. 5.2.1 Schéma zapojení u zkoušky při zatížení při 60Hz

U_{ef1} [V]	U_{ef2} [V]	U_{ef3} [V]	U_{ef} [V]	I_{ef1} [A]	I_{ef2} [A]	I_{ef3} [A]	I_{ef} [A]
480,06	482,11	479,02	480,40	4,545	4,650	4,705	4,634
480,14	482,13	479,00	480,42	4,064	4,165	4,228	4,153
480,16	482,18	479,04	480,46	3,521	3,614	3,684	3,606
480,17	482,20	479,08	480,48	3,132	3,216	3,289	3,213
480,17	482,22	479,12	480,51	2,817	2,877	2,962	2,885
480,19	482,23	479,16	480,53	2,554	2,594	2,691	2,613
480,21	482,24	479,20	480,55	2,384	2,411	2,507	2,434

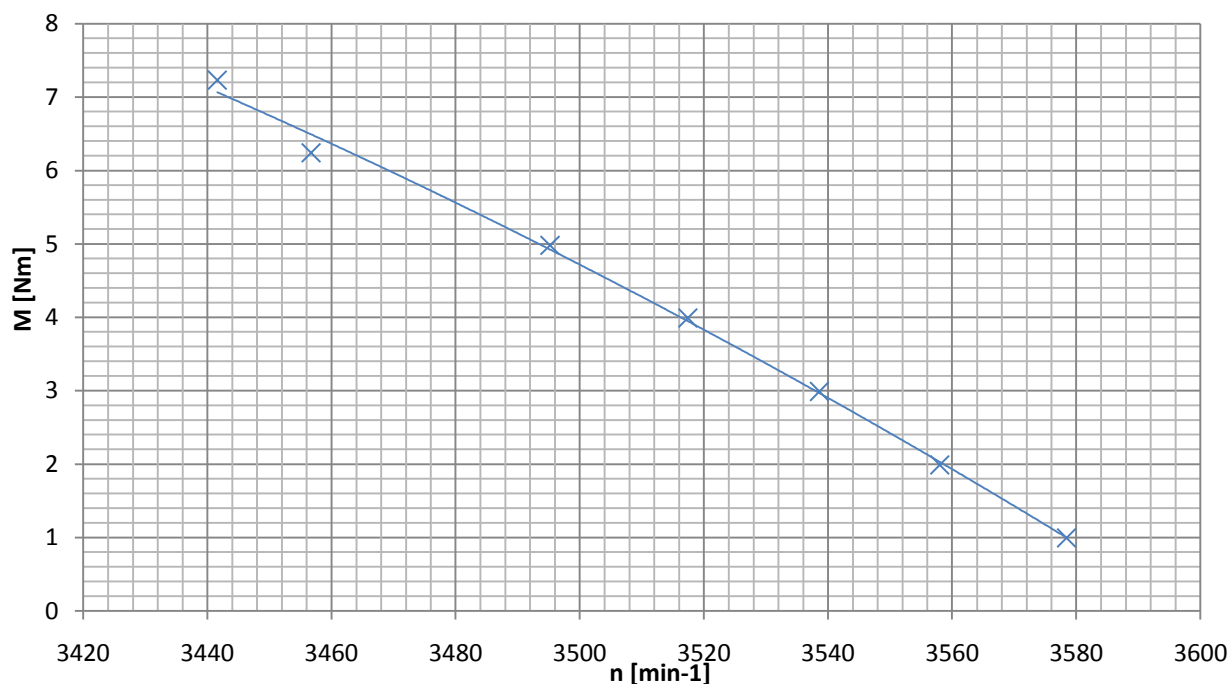
Tab. 5.2.1 První část změřených hodnot u zkoušky při zatížení

P_1 [W]	S [VA]	Q [VAr]	pf [-]	f_i [Hz]	f_u [Hz]	M [Nm]	n [min^{-1}]
3177,7	3855,4	2196,2	0,8242	60,031	60,002	7,230	3441,6
2743,8	3455,4	2106,7	0,7941	59,935	60,002	6,240	3456,7
2211,8	3000,9	2030,9	0,7371	59,955	60,003	4,980	3495,2
1798,2	2673,5	1979,9	0,6726	60,024	60,002	3,990	3517,4
1392,9	2401,3	1956,9	0,5801	60,011	60,003	2,990	3538,6
995,9	2174,8	1934,0	0,4579	59,993	60,003	1,990	3558,0
599,2	2025,8	1935,6	0,2958	59,996	59,998	0,995	3578,4

Tab. 5.2.2 Druhá část změřených hodnot u zkoušky při zatížení

P [W]	η [%]	ΔP_s [W]	ΔP_r [W]
2605,7174	82,0001	243,1034	124,3061
2258,7850	82,3232	195,2553	95,1997
1822,7621	82,4108	147,2077	55,7689
1469,6817	81,7307	116,8693	36,0100
1107,9784	79,5447	94,2260	20,1311
741,4598	74,4512	77,2961	9,2182
372,8555	62,2256	67,0687	2,4152

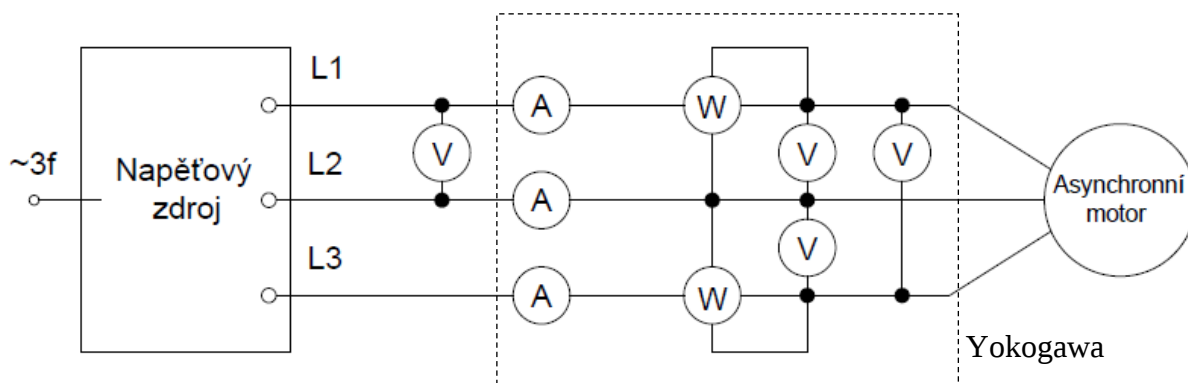
Tab. 5.2.3 Vypočtené hodnoty u zkoušky při zatížení



Obr. 5.2.2 Zatěžovací křivka motoru během zkoušky při zatížení

5.2.2 Zkouška naprázdno

Při zkoušce naprázdno byl motor jako u předchozí zkoušky naprázdno rovněž odpojen od dynamometru. Bohužel maximální napětí napěťového zdroje bylo 520V, což není 125% hodnoty napětí 480V jak udává norma, ale pouze zhruba 110%.



Obr. 5.2.1 Schéma zapojení u zkoušky naprázdno při 60Hz

U_{ef1} [V]	U_{ef2} [V]	U_{ef3} [V]	U_{ef} [V]	I_{ef1} [A]	I_{ef2} [A]	I_{ef3} [A]	I_{ef} [A]
519,69	521,98	518,56	520,08	3,352	3,360	3,524	3,412
479,75	481,73	478,65	480,04	2,360	2,375	2,489	2,408
439,74	441,53	438,71	439,99	1,638	1,662	1,745	1,682
399,72	401,32	398,79	399,94	1,270	1,294	1,355	1,306
360,04	361,48	359,19	360,24	1,010	1,032	1,078	1,040
319,72	320,94	318,86	319,84	0,859	0,877	0,919	0,885
280,57	281,64	279,76	280,66	0,733	0,748	0,783	0,755
239,71	240,58	238,94	239,74	0,617	0,630	0,658	0,635
199,67	200,39	199,03	199,70	0,526	0,541	0,563	0,544
158,76	159,33	158,26	158,78	0,458	0,475	0,489	0,474
122,71	123,13	122,33	122,73	0,444	0,460	0,467	0,457

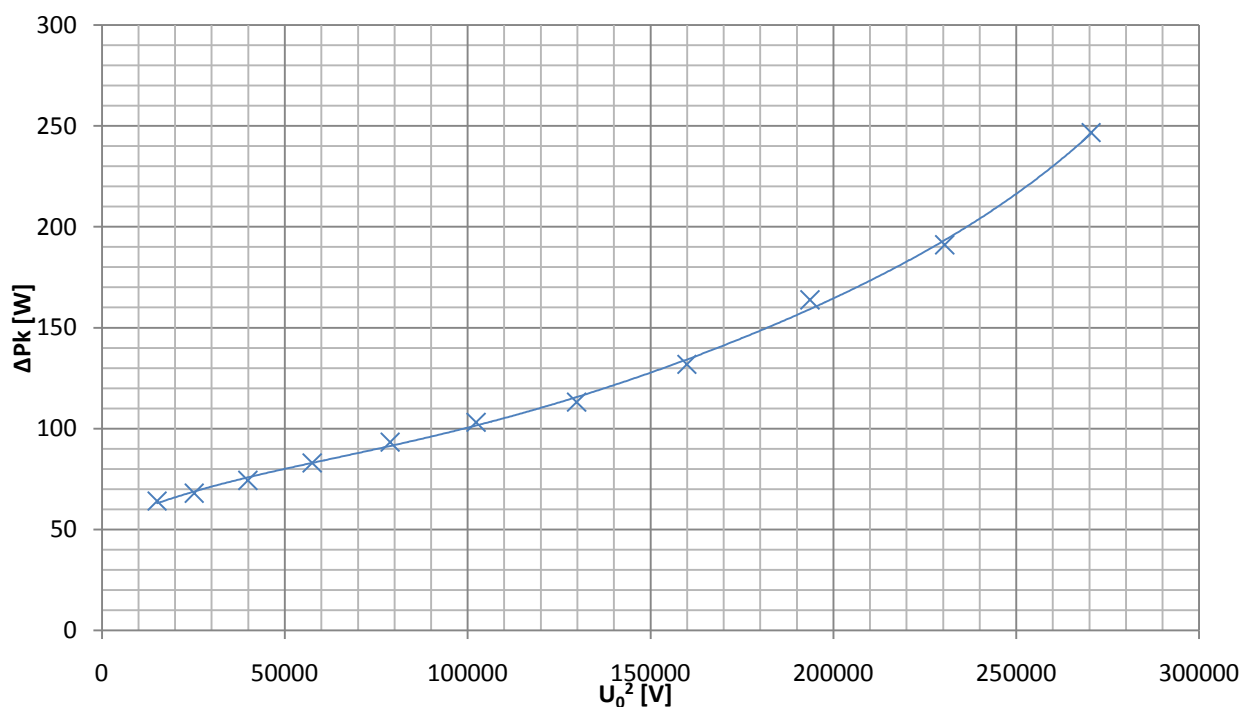
Tab. 5.2.1 První část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

P_{10} [W]	S [VA]	Q [VAR]	pf [-]	f_l [Hz]	f_u [Hz]
365,2	3073,5	3052,0	0,1188	59,999	60,001
250,1	2002,0	1986,3	0,1249	59,993	60,003
192,6	1281,6	1267,0	0,1503	60,005	60,003
149,2	904,8	892,4	0,1649	60,012	60,002
124,1	648,7	636,7	0,1913	59,991	60,002
111,1	490,2	477,4	0,2266	60,010	60,002
99,1	366,9	353,2	0,2700	60,022	60,003
87,0	263,7	249,0	0,3298	60,011	60,002
77,3	188,0	171,4	0,4111	59,960	60,003
70,2	130,3	109,8	0,5386	59,929	60,003
66,2	97,2	71,2	0,6816	60,014	60,002

Tab. 5.2.2 Druhá část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

ΔP_{s0} [W]	ΔP_k [W]	U_0^2 [V]	ΔP_{fe} [W]
118,5130	246,7	270483,21	194,8
59,0284	191,1	230438,40	139,2
28,8005	163,8	193591,20	111,9
17,3634	131,8	159952,00	79,9
11,0107	113,1	129772,86	61,2
7,9732	103,1	102297,63	51,2
5,8029	93,3	78770,04	41,4
4,1048	82,9	57475,27	31,0
3,0126	74,3	39880,09	22,4
2,2872	67,9	25211,09	16,0
2,1261	64,1	15062,65	12,2

Tab. 5.2.3 Vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno

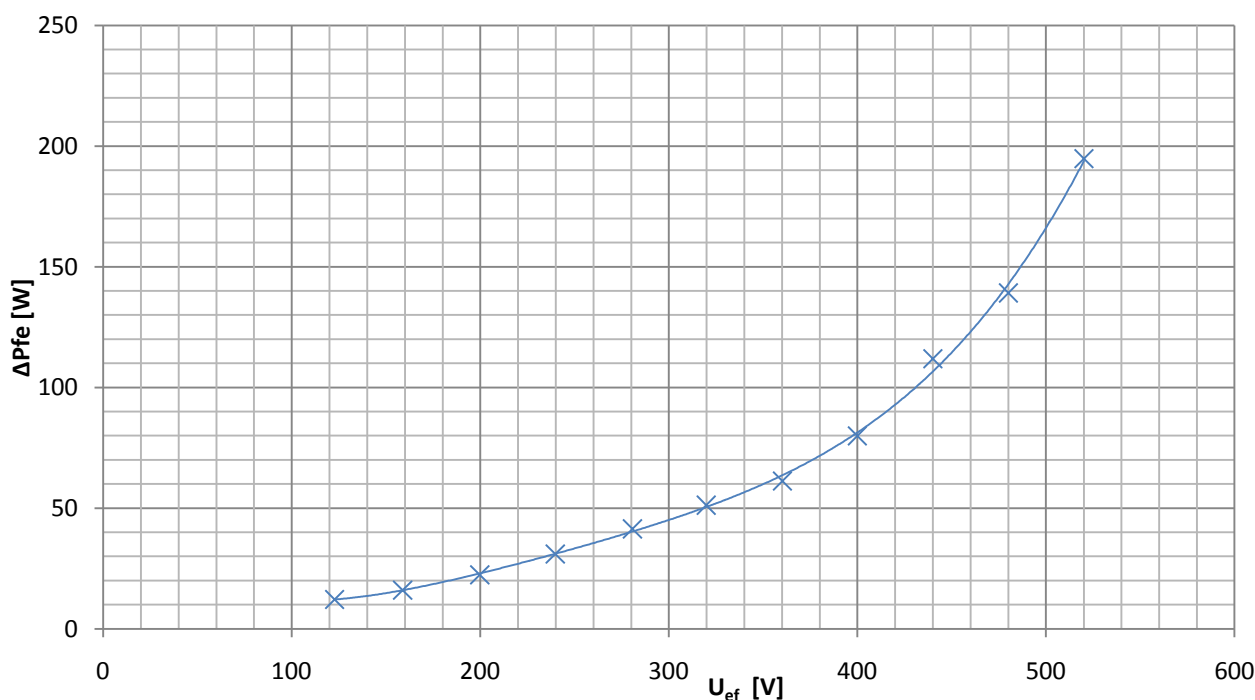


Obr. 5.2.2 Určení ztrát třením a ztrát ventilačních ze závislosti konstantních ztrát na druhé mocnině napětí

Z grafu byly určeny pomocí rovnice trendu ztráty třením a ventilační ztráty:

$$\Delta P_{fw} = 7,6707465775065 * 10^{-14} U_0^3 - 9,0075482005065 * 10^{-9} U_0^2 + 8,5225961632490 * 10^{-4} U_0 + 51,903049760392 ,$$

$$\Delta P_{fw} = 51,903W.$$



Obr. 5.2.3 Určení ztrát v železe měřeného motoru

Ztráty v železe motoru při jmenovitém zatížení jsou určeny proložením grafu a zjištěním rovnice funkce.

$$\begin{aligned} \Delta P_k = & -6,16211413618916 * 10^{-12} U_{ef}^5 + 2,21696316797591 * 10^{-8} U_{ef}^4 - \\ & 1,75948482573641 * 10^{-5} U_{ef}^3 + 6,10644949838779 * 10^{-3} U_{ef}^2 - \\ & 8,00158080622838 * 10^{-1} U_{ef} + 46,0019762158413 \end{aligned}$$

Napětí U_r spočteno podle rovnice:

$$\begin{aligned} U_r &= \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} I R \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I R \sin\varphi\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(480,46 - \frac{\sqrt{3}}{2} * 3,606 * 7,5472 * 0,737\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} 3,606 * 7,5472 * 0,6758\right)^2} \\ &= 463,362V, \end{aligned}$$

Napětí U_r je dosazeno za hodnotu x a výsledkem jsou ztráty v železe:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fe} = & -6,16211413618916 * 10^{-12} * 463,362^5 + 2,21696316797591 * 10^{-8} * \\ & 463,362^4 - 1,75948482573641 * 10^{-5} * 463,362^3 + 6,10644949838779 * 10^{-3} * 463,362^2 - \\ & 8,00158080622838 * 10^{-1} * 463,362 + 46,0019762158413 = 126,2339W \end{aligned}$$

Celkové ztráty motoru během měření při napětí o frekvenci 60Hz jsou:

$$\Delta P_T = \Delta P_S + \Delta P_R + \Delta P_k$$

$$\Delta P_T = 147,2077 + 55,7689 + 126,2339 = 394,0482W$$

5.3 Měření ztrát při sinusovém průběhu napájecího napětí o frekvenci 40Hz

Napájecího napětí o frekvenci 40Hz bylo dosaženo, stejně jako v předchozím měření/kapitole, napěťovým zdrojem Ametek od firmy California Instruments. Protože se rovněž měnila frekvence napájecího napětí, bylo nutné snížit napětí úměrně s frekvencí, k dosažení stejného sycení motoru.

$$\frac{U_{50}}{f} = \frac{400}{50} = 8 V/Hz$$

$$U_{40} = 8f = 8 * 40 = 320V$$

Pro tuhle a další zbývající kapitoly obsahující měření budou uvedeny již pouze výsledky z měření. Naměřené veličiny v tabulkách spolu se schémata zapojení jsou uvedeny v přílohách.

Zkouška při zatížení

Díky zkoušce při zatížení byly určeny celkové ztráty v motoru:

$$\Delta P_t = \underline{273,0585W}.$$

Zkouška naprázdno

Pomocí křivek sestrojených identicky jako v předchozích podkapitolách bylo určeno:

$$U_r = \underline{303,1357V},$$

$$\Delta P_{fe} = \underline{56,0259W}.$$

Ochlazovací charakteristika po zkoušce naprázdno

Výsledný odpor po extrapolaci ochlazovací přímky je $7,9328\Omega$.

5.4 Měření ztrát při 3kHz PWM. napětí o frekvenci 40Hz

Schémata zapojení s frekvenčním měničem u zkoušek naprázdno a zkoušek při zatížení jsou identické u všech napětíových i modulačních frekvencí. Proto budou uvedeny pouze v příloze k této kapitole a v dalších kapitolách už nikoliv.

Při měření byl přidán 4. kanál s filtrem na 1. harmonickou napájecího napětí. Díky tomu se musel přepočítat účinník a mechanická účinnost motoru. Naměřené hodnoty účinníku a účinnosti altimetrem Yokogawa byly totiž výskytem vyšších harmonických.

Zkouška při zatížení

Díky zkoušce při zatížení byly určeny celkové ztráty v motoru:

$$\Delta P_t = \underline{312,9503W}.$$

Zkouška naprázdno

Pomocí křivek sestrojených identicky jako v předchozích podkapitolách bylo určeno:

$$U_r = \underline{296,7533V},$$

$$\Delta P_{fe} = \underline{71,1553W}.$$

Ochlazovací charakteristika po zkoušce naprázdno

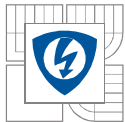
Výsledný odpor po extrapolaci ochlazovací přímky je $7,264\Omega$.

5.5 Měření ztrát při 12kHz PWM. napětí o frekvenci 40Hz

Zkouška při zatížení

Díky zkoušce při zatížení byly určeny celkové ztráty v motoru:

$$\Delta P_t = \underline{302,1253W}.$$



Zkouška naprázdno

Pomocí křivek sestrojených identicky jako v předchozích podkapitolách bylo určeno:

$$U_r = \underline{295,4607V},$$

$$\Delta P_{fe} = \underline{62,1485W}.$$

Ochlazovací charakteristika po zkoušce naprázdno

Výsledný odpor po extrapolaci ochlazovací přímky je $7,3733\Omega$.

5.6 Měření ztrát při 3kHz PWM. napětí o frekvenci 50Hz

U obou zkoušek při PWM modulovaném napětí o napájecí frekvenci 50Hz se bohužel díky frekvenčnímu měniči nedosáhlo dle normy 150% hodnoty jmenovitého napětí ale pouze 100%.

Zkouška při zatížení

Díky zkoušce při zatížení byly určeny celkové ztráty v motoru:

$$\Delta P_t = \underline{349,1497W}.$$

Zkouška naprázdno

Pomocí křivek sestrojených identicky jako v předchozích podkapitolách bylo určeno:

$$U_r = \underline{369,1166V},$$

$$\Delta P_{fe} = \underline{89,3567W}.$$

Ochlazovací charakteristika po zkoušce naprázdno

Výsledný odpor po extrapolaci ochlazovací přímky je $7,2202\Omega$.

5.7 Měření ztrát při 12kHz PWM. napětí o frekvenci 50Hz

Zkouška při zatížení

Díky zkoušce při zatížení byly určeny celkové ztráty v motoru:

$$\Delta P_t = 344,4506W.$$

Zkouška naprázdno

Pomocí křivek sestrojených identicky jako v předchozích podkapitolách bylo určeno:

$$U_r = 374,2983V,$$

$$\Delta P_{fe} = 59,7774W.$$

Ochlazovací charakteristika po zkoušce naprázdno

Výsledný odpor po extrapolaci ochlazovací přímky je 7,2559Ω

6 SROVNÁNÍ HODNOT

	Měřeno sin. 40Hz	RMXprt 40Hz	Procentní srovnání měř.40Hz - měř.50Hz	Procentní srovnání RMXprt40Hz - RMXprt50Hz	Měřeno sin. 50Hz	RMXprt 50Hz	Procentní srovnání měř.50Hz - měř.60Hz	Procentní srovnání RMXprt50Hz - RMXprt60Hz
P_1 [W]	1501	1503	-22,70	-21,27	1841	1822	-20,12	-19,66
P [W]	1209	1209	-24,95	-24,03	1510	1500	-20,71	-21,54
η [%]	80,54	80,45	-1,833	-2,304	82,01	82,30	-0,487	-1,576
U_1 [V]	320	320	-24,82	-25,00	400	400	-20,19	-20,00
I_{1n} [A]	3,509	3,728	-1,197	-0,748	3,551	3,756	-3,750	-1,315
pf [-]	0,771	0,722	2,853	3,732	0,749	0,695	1,589	1,594
n [min ⁻¹]	2294	2322	-26,23	-26,10	2896	2928	-20,71	-20,51
M [Nm]	5,030	4,970	1,014	1,567	4,980	4,890	0,000	-0,857
ΔP_{j1} [W]	139,4	175,1	-2,389	-1,506	142,8	177,7	-3,122	-2,647
ΔP_{j2} [W]	40,75	39,02	-33,62	5,490	54,45	36,88	-2,420	-0,234
ΔP_{Fe} [W]	56,03	67,23	-62,44	-37,39	91,01	92,37	-38,71	-28,77
ΔP_{fw} [W]	27,85	28,85	-17,87	-13,79	32,83	32,83	-58,10	-58,09
ΔP_T [W]	273,5	293,8	-23,09	-9,77	336,6	322,5	-17,05	-10,89

Tab. 6.1 Srovnání měřených a simulovaných hodnot (1. část)

	Měřeno sin. 60Hz	RMXprt 60Hz	Procentní srovnání měř.40Hz - měř.60Hz	Procentní srovnání RMXprt40Hz - RMXprt60Hz
P_1 [W]	2212	2181	-47,39	-45,10
P [W]	1823	1823	-50,82	-50,75
η [%]	82,41	83,60	-2,329	-3,916
U_1 [V]	480	480	-50,03	-50,00
I_{1n} [A]	3,684	3,805	-4,987	-2,074
pf [-]	0,737	0,684	4,397	5,266
n [min^{-1}]	3495	3528	-52,36	-51,96
M [Nm]	4,980	4,930	1,014	0,723
ΔP_{j1} [W]	147,2	182,5	-5,585	-4,193
ΔP_{j2} [W]	55,77	36,97	-36,85	5,269
ΔP_{Fe} [W]	126,2	118,9	-125,3	-76,91
ΔP_{fw} [W]	51,90	51,90	-86,35	-79,89
ΔP_T [W]	394,1	357,7	-44,08	-21,72

Tab. 6.2 Srovnání měřených a simulovaných hodnot (2. část)

	Měřeno sin. 40Hz	40Hz - 3kHz modulace	Procentní srovnání (sin. - 3kHz)	40Hz - 12kHz modulace	Procentní srovnání (sin. - 12kHz)
P_1 [W]	1501	1503	-0,153	1487	0,913
P [W]	1209	1196	1,045	1194	1,247
η [%]	80,54	79,57	1,197	80,26	0,338
U_1 [V]	320	314	1,889	313	2,326
I_{1n} [A]	3,509	3,490	0,541	3,457	1,482
pf [-]	0,771	0,791	-2,633	0,794	-2,970
n [min^{-1}]	2294	2280	0,610	2284	0,436
M [Nm]	5,030	5,010	0,437	4,990	0,815
ΔP_{j1} [W]	139,4	132,7	4,810	132,2	5,196
ΔP_{j2} [W]	40,75	64,96	-59,40	62,48	-53,32
ΔP_{Fe} [W]	56,03	71,16	-27,00	62,15	-10,93
ΔP_{fw} [W]	27,85	29,99	-7,659	30,90	-10,95
ΔP_T [W]	273,5	312,9	-14,43	302,1	-10,47

Tab. 6.3 Srovnání sinusového a PWM průběhu napětí při 40Hz



	Měřeno sin. 50Hz	an. výpoč. 50Hz	Procentní srovnání (měř. - výpoč.)	RMXprt 50Hz	Procentní srovnání (měř. - RMXprt)	50Hz - 3kHz mod.	Procentní srovnání (sin. - 3kHz)	50Hz - 12kHz mod.	Procentní srovnání (sin. - 12kHz)
P_1 [W]	1841	1878	-1,994	1822	1,023	1853	-0,635	1845	-0,201
P [W]	1510	1500	0,667	1500	0,672	1511	-0,034	1511	-0,091
η [%]	82,01	79,87	2,609	82,30	-0,355	81,52	0,598	81,92	0,110
U_1 [V]	400	400	-0,065	400	-0,065	387	3,262	392	2,036
I_{in} [A]	3,551	3,842	-8,194	3,756	-5,759	3,486	1,830	3,497	1,521
pf [-]	0,749	0,706	5,802	0,695	7,254	0,794	-5,955	0,778	-3,858
n [min^{-1}]	2896	2850	1,575	2928	-1,120	2885	0,366	2893	0,090
M [Nm]	4,980	5,030	-0,923	4,890	1,847	5,000	-0,402	4,99	-0,181
ΔP_{j1} [W]	142,8	184,1	-28,99	177,7	-24,51	131,6	7,803	133,1	6,762
ΔP_{j2} [W]	54,45	73,70	-35,35	36,88	32,27	62,56	-14,89	58,93	-8,217
ΔP_{Fe} [W]	91,01	89,84	1,288	92,37	-1,491	89,35	1,818	59,78	34,32
ΔP_{fw} [W]	32,83	30,34	7,592	32,83	0,000	47,07	-43,36	44,23	-34,73
ΔP_T [W]	336,6	378,0	-12,29	322,5	4,190	349,2	-3,715	344,4	-2,306

Tab. 6.4 Srovnání sinusového a PWM průběhu napětí při 50Hz včetně analytického výpočtu

	měřeno 60Hz	RMXprt 60Hz	Procentní srovnání (měř. - RMXprt)
P_1 [W]	2212	2181	1,407
P [W]	1823	1823	-0,015
η [%]	82,41	83,60	-1,442
U_1 [V]	480	480	0,096
I_{in} [A]	3,684	3,805	-3,282
pf [-]	0,737	0,684	7,258
n [min^{-1}]	3495	3528	-0,952
M [Nm]	4,980	4,930	1,006
ΔP_{j1} [W]	147,2	182,5	-23,94
ΔP_{j2} [W]	55,77	36,97	33,72
ΔP_{Fe} [W]	126,2	118,9	5,780
ΔP_{fw} [W]	51,90	51,90	0,000
ΔP_T [W]	394,1	357,7	9,235

Tab. 6.5 Srovnání měření a simulovaných hodnot sinusového průběhu napětí při 60Hz

Z Tab. 6.1 a 6.2 je vidět, že při sinusovém průběhu napětí s rostoucí frekvencí rostou také celkové ztráty, a to jak u měřených hodnot, tak i u simulovaných hodnot v programu RMXprt. Růst celkových ztrát byl ovlivněn nejvíce ztrátami v železe motoru. Ztráty ve vinutí statoru a rotoru nebyly ovlivněny takovou mírou při rostoucí frekvenci jako ztráty v železe. Při změně frekvence se k dodržení sycení motoru měnilo napětí úměrně frekvenci k dodržení sycení motoru. Při této změně napájecího napětí byl udržován konstantní jmenovitý moment, a tudíž mechanický výkon na hřídeli vzrůstal s rostoucím napětím. Současně se zvedal jeho příkon a nepatrně i jeho celková mechanická účinnost.

Podle výsledků měření z Tab. 6.3 a 6.4, kde jsou srovnány sinusové a modulované průběhy napájecího napětí, plyne, že s rostoucí frekvencí modulace celkové i ztráty v železe klesají. Rovněž s rostoucí frekvencí modulace klesá i příkon motoru, ale za téměř stejného mechanického výkonu motoru. V Tab. 6.4 při měření 50Hz průběhu napětí, byly ztráty v železe při modulaci nad očekávání ještě menší než při sinusovém průběhu napětí. Pravděpodobně to zapříčinil fakt, že měření modulovaného průběhu napětí bylo provedeno na přesnější měřící soustavě než při sinusovém průběhu napětí.

Během analytického výpočtu se vyskytla odchylka, která ovlivnila výsledek magnetizačního proudu. Tato odchylka byla způsobena koeficientem k_E , který se určoval z grafu podle [14] během výpočtu magnetického toku. Díky tomu vyšel nepatrně vyšší magnetický tok a následně díky mocninným závislostem se tato odchylka dále zvětšila. Ostatní hodnoty však vyšly relativně přesně s hodnotami naměřenými.

Srovnáním hodnot ztrát nasimulovaných v programu RMXprt a naměřených hodnot, pak lze zjistit, že hodnoty z programu RMXprt sice lišily více či méně od hodnot naměřených a vypočtených, ale výsledná hodnota celkových ztrát se příliš nelišila. Samozřejmě je to dáno tím, že se jedná pouze o simulaci, a také tím, že při zadávání hodnot byly některé rozměry vedlejších prvků motoru zadány na automatický výpočet (např. izolace vedení statoru, atd.).

V tabulce 6.5 jsou srovnány už jen hodnoty sinusového průběhu s hodnotami z programu RMXprt, protože (jak už se kapitola 5.6 zmiňuje) nebylo možné díky frekvenčnímu měniči získat vyšší napětí než 400V a tudíž by nebylo dodrženo ani sycení motoru ani norma ČSN EN 60034-2-1, během které by napětí zkoušky naprázdno mělo dosahovat 150% jmenovité hodnoty.

7 ZÁVĚR

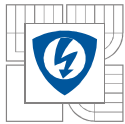
V úvodu této práce byl popsán samotný asynchronní motor a rozebrány ztráty v železe, včetně jejich závislosti vzhledem k průběhu napájecího napětí. Další část práce srovnává různé typy postupů při analýze těchto ztrát a vůbec celkových ztrát v asynchronních motorech, a sice analytickým výpočtem dodané dokumentace motoru, měřením při různých průbězích napájecího napětí a simulací motoru v programu RMXprt.

Analytický výpočet byl proveden podle [14] Kopylov, P. – Stavba elektrických strojů za předpokladu sinusového průběhu napětí při 50Hz. Během výpočtu se vyskytla odchylka, která je analyzována a okomentována v kapitole 6. I přes tuto odchylku se většina hodnot více či méně shodovala s naměřenými veličinami.

Simulace v programu RMXprt byly provedeny rovněž při sinusovém průběhu napětí, ale na rozdíl od analytického výpočtu (při 50 Hz) i při frekvencích 40Hz a 60Hz. Parametry motoru zadávané do programu byly určeny podle dodané výkresové dokumentace motoru [11]. Program RMXprt je, jak se ukázalo, výborným pomocníkem při konstruování motorů, tak při rychlém ověřování jaké konkrétní parametry motoru ovlivňují jeho výsledné hodnoty. Samozřejmě se výsledky tohoto programu neshodují striktně s reálnými hodnotami, ale pro rychlý přehled je tento program více než dostačující.

Na přiloženém motoru TM90-2S bylo měřením dokázáno, že ztráty v železe závisí na frekvenci. S rostoucí hodnotou frekvence napájecího napětí při stejném momentu motoru 5Nm se ztráty v železe i celkové ztráty motoru zvětšovaly. S rostoucí frekvencí rovněž rostly i hodnoty příkonu a mechanického výkonu a dle výsledků měření se nepatrně zvětšovala i celková mechanická účinnost motoru.

Měřením při pulzní šířkové modulaci napájecího napětí bylo rovněž ověřeno, že s rostoucím modulačním kmitočtem klesají ztráty v železe, celkové ztráty i příkony motoru při relativně stejných mechanických výkonech. Srovnáním celkových ztrát motoru během pulzní šířkové modulace vstupního napětí a sinusového průběhu lze zjistit, že při sinusovém průběhu napájecího napětí byly celkové ztráty motoru nejmenší nezávisle na frekvenci.



LITERATURA

- [1] PETROV, G.N. *Elektrické stroje* 2. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1982, 732 s. ISBN 509-21-857.
- [2] ING. KOČMAN, S. *Asynchronní stroje*, Ostrava: Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB-TU, 2002, 27 s.
- [3] ING. BRÁZDA, M. a ING. STAŇA, R. *Výpočet asynchronního motoru*, 1. vyd. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů, 1973, 224 s.
- [4] Doc. Ing. ONDRUŠEK, Č., CSc. *Elektrické stroje*, skriptum Vysoké Učení Technické v Brně, 103 s.
- [5] Non oriented electrical steel. Sura [online]. 2011 [cit. 2013-11-25]. Dostupné z: <http://www.sura.se/>
- [6] Doc. Ing. JIRÁK, J. CSc. a spol. *Materiály a technická dokumentace*, Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, 2002, 129 s.
- [7] IEC 600034-2-1:2007, *Točivé elektrické stroje – standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek*, 2.vyd, 2008 63 s.
- [8] AHMED, M.S., *Effect of harmonics on iron losses*, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2007, 70 s.
- [9] BELKASIM, M.A., *Identification of loss models from measurements of the magnetic properties of electrical steel sheets*, Espoo: Helsinki University of Technology, 2008, 97 s.
- [10] Asynchronní motor. *Pohonná technika* [online]. 2008 [cit. 2013-10-30]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz>
- [11] STRATIL, J. ,HÁJEK, V. *Výkresová dokumentace motoru TM90-2S*, Slavkov: EMP Slavkov, 2009, 15 s.
- [12] Kennedy, R. *Electrical Installations*, 2. vyd. London: Caxton, 1909, 203 s.
- [13] Čez. *Skupina Čez: Statistika* [online]. 2013 [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/>
- [14] KOPYLOV, P. *Stavba elektrických strojů*. Praha 1: 1988, Nakladatelství technické literatury. ISBN 04-531-88
- [15] BOLDEA, I. a S. A. NASAR. *The Induction Machine Handbook*. Florida: CRC, 2001. ISBN 0-8493-0004-5

PŘÍLOHY

Příloha A Měření ztrát při sinusovém průběhu napájecího napětí o frekvenci 40 Hz

Zkouška při zatížení

U_{ef1} [V]	U_{ef2} [V]	U_{ef3} [V]	U_{ef} [V]	I_{ef1} [A]	I_{ef2} [A]	I_{ef3} [A]	I_{ef} [A]	$P_{1,1}$ [W]	$P_{2,1}$ [W]
319,21	320,02	321,32	320,1833	4,727	4,727	4,592	4,6820	1508,1	717,0
319,25	320,09	321,34	320,2267	4,131	4,142	4,001	4,0913	1315,7	557,4
319,28	320,10	321,37	320,2500	3,541	3,566	3,421	3,5093	1118,1	382,6
319,17	320,26	321,35	320,2600	3,152	3,192	3,042	3,1287	976,0	243,2
319,24	320,21	321,38	320,2767	2,827	2,878	2,729	2,8113	841,9	103,6
319,25	320,25	321,36	320,2867	2,524	2,591	2,446	2,5203	699,2	-32,7
319,27	320,24	321,41	320,3067	2,366	2,441	2,305	2,3707	599,9	-132,9
319,28	320,21	321,43	320,3067	2,397	2,445	2,304	2,3820	599,5	-134,4

Tab. A První část naměřených hodnot během zkoušky při zatížení

P_1 [W]	pf [-]	n [min ⁻¹]	M [Nm]	P_m [W]	η [%]	ΔP_s [W]	ΔP_r [W]
2225,1	0,857	2235	7,455	1744,832	78,416	247,3591	82,8242
1873,1	0,826	2259	6,292	1488,447	79,464	188,8838	62,9089
1500,7	0,771	2294	5,031	1208,582	80,535	138,9678	40,7705
1219,2	0,703	2310	4,042	977,770	80,198	110,4545	30,3570
945,5	0,606	2342	3,049	747,778	79,088	89,1846	16,8367
666,5	0,477	2354	2,010	495,486	74,341	71,6772	10,9537
467,0	0,355	2379	1,256	312,905	67,003	63,4170	4,2040
465,0	0,353	2370	1,244	308,743	66,396	64,0248	5,9931

Tab. B Druhá část naměřených a vypočtených hodnot během zkoušky při zatížení

Zkouška naprázdno

U_{ef1} [V]	U_{ef2} [V]	U_{ef3} [V]	U_{ef} [V]	I_{ef1} [A]	I_{ef2} [A]	I_{ef3} [A]	I_{ef} [A]	$P_{1,1}$ [W]	$P_{2,1}$ [W]
359,47	360,43	361,83	360,5767	3,953	4,104	3,930	3,9957	885,4	-571,5
319,65	320,57	321,78	320,6667	2,342	2,442	2,307	2,3637	468,9	-309,0
279,86	280,67	281,73	280,7533	1,447	1,509	1,416	1,4573	260,8	-161,2
239,87	240,63	241,51	240,6700	1,046	1,080	1,024	1,0500	164,5	-93,4
199,91	200,54	201,28	200,5767	0,797	0,819	0,781	0,7990	109,1	-52,6
159,96	160,48	161,05	160,4967	0,619	0,628	0,603	0,6167	72,5	-25,5
120,02	120,40	120,84	120,4200	0,481	0,486	0,464	0,4770	47,1	-7,7
80,05	80,33	80,61	80,3300	0,402	0,403	0,387	0,3973	30,1	3,8
64,12	64,37	64,58	64,3567	0,407	0,407	0,393	0,4023	25,4	6,6

Tab. C První část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

P_1 [W]	pf [-]	n [min ⁻¹]	M [Nm]	P_m [W]	η [%]
313,9	0,126	2399	0,036	9,044	2,881
159,8	0,122	2391	0,037	9,264	5,797
99,6	0,141	2402	0,036	9,055	9,092
71,1	0,163	2397	0,037	9,287	13,063
56,5	0,204	2394	0,037	9,276	16,417
47,0	0,275	2387	0,037	9,249	19,678
39,4	0,396	2386	0,037	9,245	23,464
33,9	0,613	2367	0,037	9,171	27,054
32,0	0,714	2342	0,038	9,320	29,124

Tab. D Druhá část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

ΔP_k [W]	ΔP_{s0} [W]	ΔP_k [W]	U_0^2 [V]	ΔP_{fe} [W]
5180,326	189,9749	123,9251	130015,5325	96,0734
5197,528	66,4799	93,3201	102827,1111	65,4684
5213,289	25,2718	74,3282	78822,4342	46,4765
5225,190	13,1189	57,9811	57922,0489	30,1294
5245,132	7,5965	48,9035	40230,9992	21,0518
5255,510	4,5250	42,4750	25759,1800	14,6233
5265,870	2,7074	36,6926	14500,9764	8,8409
5275,684	1,8786	32,0214	6452,9089	4,1697
5294,328	1,9261	30,0739	4141,7805	2,2221

Tab. E Vypočtené hodnoty u zkoušky naprázdno

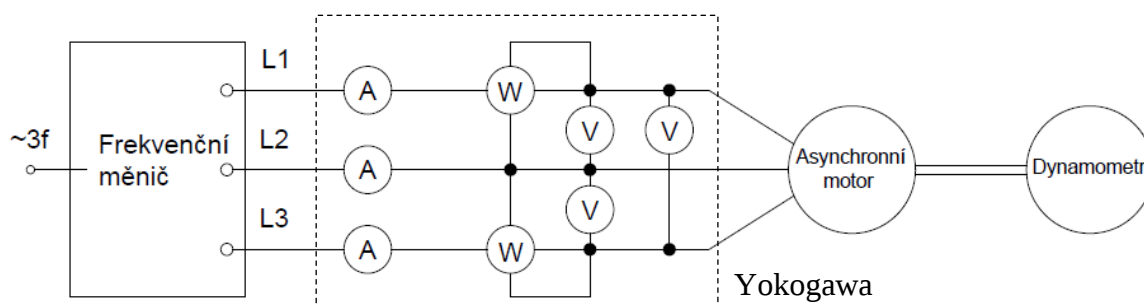
Ochlazovací charakteristika po zkoušce naprázdno

t [s]	R [Ω]
70	7,327
90	7,184
110	7,142
130	7,109
160	7,067
210	7,012
250	6,975
300	6,942
360	6,911
420	6,886
510	6,861
600	6,839

Tab. F Měření ochlazovací charakteristiky

Příloha B Měření ztrát při 3kHz PWM. napětí o frekvenci 40Hz

Zkouška při zatížení



Obr. A Zapojení motoru při pulzní šířkové modulaci napájecího napětí během zkoušky při zatížení

M [Nm]	n [min^{-1}]	I_{ef1} [A]	I_{ef2} [A]	I_{ef3} [A]	I_{ef} [A]	U_{ef1} [V]	U_{ef2} [V]	U_{ef3} [V]	U_{ef4} [V]
7,523	2212	4,757	4,773	4,775	4,768	393,5	393,5	393,7	313,700
6,251	2248	4,072	4,086	4,083	4,080	394,5	394,5	394,5	313,900
5,009	2280	3,486	3,494	3,491	3,490	395,4	395,6	395,6	314,200
3,997	2309	3,067	3,064	3,069	3,067	396,4	396,3	396,3	314,700
2,999	2327	2,684	2,686	2,685	2,685	397,6	397,8	397,7	315,000
2,001	2347	2,409	2,400	2,400	2,403	398,6	398,6	398,6	315,600
1,002	2367	2,263	2,252	2,261	2,259	399,6	399,7	399,7	316,300

Tab. G První část naměřených hodnot během zkoušky při zatížení

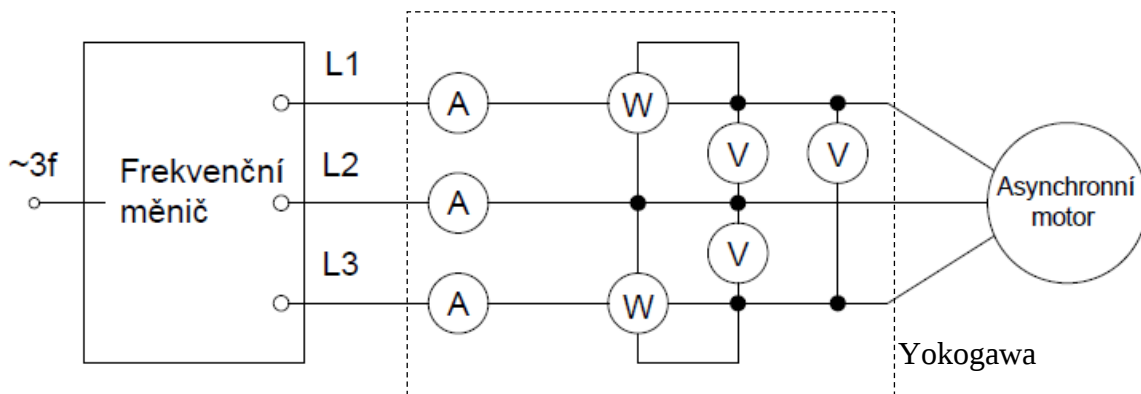
U_{ef} [V]	$P_{1,1}$ [W]	$P_{2,1}$ [W]	P_1 [W]	pf [-]	pf _{Bez f} [-]	f [Hz]
393,6	759	1502	2262	0,696	0,8731	39,880
394,5	581	1286	1867	0,670	0,8417	39,878
395,5	412	1092	1503	0,629	0,7913	39,897
396,3	276	941	1217	0,578	0,7280	39,886
397,7	144	797	941	0,509	0,6424	39,896
398,6	10	663	673	0,405	0,5123	39,881
399,7	-129	542	413	0,264	0,3337	39,880

Tab. H Druhá část naměřených hodnot během zkoušky při zatížení

P_m [W]	η [%]	ΔP_s [W]	ΔP_r [W]
1742,628	77,0393	247,7077	152,2124
1471,547	78,8188	181,3792	102,2495
1195,954	79,5711	132,7144	64,9565
966,466	79,4138	102,4931	39,5604
730,805	77,6626	78,5517	24,0685
491,800	73,0758	62,9180	11,9013
248,367	60,1373	55,6032	3,9358

Tab. I Vypočtené hodnoty během zkoušky při zatížení

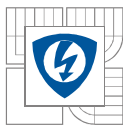
Zkouška naprázdno



Obr. B Zapojení motoru při pulzní šířkové modulaci napájecího napětí při zkoušce naprázdno

M [Nm]	n [min ⁻¹]	I_{ef1} [A]	I_{ef2} [A]	I_{ef3} [A]	I_{ef} [A]	U_{ef1} [V]	U_{ef2} [V]	U_{ef3} [V]	U_{ef4} [V]
0,026	2395	3,955	3,947	3,971	3,958	426,5	426,5	426,6	357,2
0,024	2389	2,969	2,956	2,976	2,967	413,8	414,0	414,0	337,3
0,024	2386	2,245	2,232	2,248	2,241	400,9	400,9	400,8	317,0
0,025	2386	1,776	1,766	1,776	1,773	389,1	389,3	389,3	297,0
0,022	2387	1,012	1,002	1,008	1,007	346,4	346,3	346,3	237,2
0,023	2386	0,779	0,776	0,778	0,778	316,9	317,0	317,0	197,9
0,025	2389	0,606	0,602	0,606	0,605	283,4	283,3	283,4	157,7
0,024	2384	0,465	0,462	0,465	0,464	245,4	245,4	245,4	117,8
0,022	2335	0,398	0,394	0,396	0,396	177,4	177,3	177,3	61,4

Tab. J První část naměřených hodnot při zkoušce zkoušky naprázdno



U_{ef} [V]	$P_{1,1}$ [W]	$P_{2,1}$ [W]	P_1 [W]	pf [-]	pf _{Bez} [-]	f [Hz]
426,5	-531	856	326	0,111	0,1331	39,881
413,9	-378	605	227	0,107	0,1310	39,876
400,9	-264	434	170	0,109	0,1382	39,884
389,2	-191	326	135	0,113	0,1480	39,879
346,3	-73	161	88	0,145	0,2127	39,874
317,0	-38	111	73	0,170	0,2737	39,879
283,4	-15	75	60	0,203	0,3631	39,884
245,4	0	49	50	0,251	0,5281	39,887
177,3	10	26	37	0,301	0,8786	39,875

Tab. K První část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

P_m [W]	η [%]	ΔP_{s0} [W]	ΔP_k [W]	U_0^2 [V]	ΔP_{fe} [W]
6,521	2,0003	170,6942	155,3058	127591,84	125,3206
6,004	2,6449	95,9184	131,0816	113771,29	101,0963
5,997	3,5276	54,7206	115,2794	100489,00	85,2942
6,247	4,6274	34,2519	100,7481	88209,00	70,7629
5,499	6,2489	11,0491	76,9509	56263,84	46,9657
5,747	7,8726	6,5952	66,4048	39164,41	36,4196
6,254	10,4233	3,9882	56,0118	24869,29	26,0266
5,992	11,9840	2,3459	47,6541	13876,84	17,6689
5,379	14,5378	1,7087	35,2913	3769,96	5,3061

Tab. L Vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno

Ochlazovací charakteristika po zkoušce naprázdno

t [s]	R [Ω]
20	7,224
30	7,204
45	7,177
60	7,156
75	7,125
100	7,091
120	7,065
150	7,031
180	7,002
215	6,973
240	6,958
290	6,930
300	6,924
360	6,901
420	6,883
480	6,868
540	6,855
600	6,844

Tab. M Měření ochlazovací charakteristiky

Příloha C Měření ztrát při 12kHz PWM. napětí o frekvenci 40Hz

Zkouška při zatížení

M [Nm]	n [min ⁻¹]	I _{ef1} [A]	I _{ef2} [A]	I _{ef3} [A]	I _{ef} [A]	U _{ef1} [V]	U _{ef2} [V]	U _{ef3} [V]	U _{ef4} [V]
7,498	2211	4,759	4,720	4,766	4,749	391,1	391,1	391,3	311,6
6,246	2254	4,070	4,040	4,081	4,064	393,1	393,1	393,3	312,0
4,990	2284	3,464	3,433	3,474	3,457	394,0	394,0	394,2	312,8
3,997	2313	3,043	3,012	3,051	3,035	394,6	394,6	394,7	313,6
2,999	2338	2,699	2,668	2,706	2,691	395,4	395,4	395,6	314,5
1,982	2356	2,427	2,402	2,436	2,422	396,9	397,0	397,1	315,5
1,003	2379	2,290	2,266	2,295	2,284	398,3	398,4	398,5	316,6

Tab. N První část naměřených hodnot během zkoušky při zatížení

U _{ef} [V]	P _{1,1} [W]	P _{2,1} [W]	P ₁ [W]	pf [-]	pf _{Bez f} [-]	f [Hz]
391,2	771	1474	2245	0,698	0,876	39,963
393,2	599	1263	1862	0,673	0,848	39,964
394,1	420	1067	1487	0,630	0,794	39,965
394,6	284	922	1206	0,581	0,732	39,966
395,5	145	786	931	0,505	0,635	39,964
397,0	4	655	659	0,396	0,498	39,962
398,4	-135	540	405	0,257	0,323	39,962

Tab. O Druhá část naměřených hodnot během zkoušky při zatížení

P _m [W]	η [%]	ΔP _s [W]	ΔP _r [W]
1736,052	77,3297	249,4362	152,2564
1474,295	79,1780	182,6680	98,3787
1193,507	80,2627	132,1764	62,4793
968,140	80,2769	101,8762	37,7716
734,259	78,8678	80,0908	20,3763
488,998	74,2030	64,8789	9,7528
249,876	61,6978	57,6962	2,4951

Tab. P Vypočtené hodnoty během zkoušky při zatížení

**Zkouška naprázdno**

M [Nm]	n [min ⁻¹]	I _{ef1} [A]	I _{ef2} [A]	I _{ef3} [A]	I _{ef} [A]	U _{ef1} [V]	U _{ef2} [V]	U _{ef3} [V]	U _{ef4} [V]
0,035	2398	3,846	3,837	3,871	3,852	424,1	424,2	424,2	357,8
0,031	2397	2,946	2,938	2,963	2,949	412,9	413,0	413,1	337,9
0,033	2392	2,203	2,186	2,209	2,200	400,3	400,4	400,5	317,7
0,032	2394	1,735	1,712	1,733	1,726	387,7	387,7	387,9	297,9
0,031	2396	1,447	1,422	1,438	1,436	373,8	373,7	374,0	278,1
0,032	2391	1,225	1,200	1,215	1,213	360,5	360,5	360,8	258,4
0,035	2396	1,024	1,001	1,016	1,014	346,3	346,1	346,4	238,2
0,033	2394	0,786	0,771	0,782	0,780	315,3	315,2	315,5	198,6
0,033	2386	0,617	0,604	0,617	0,612	282,3	282,2	282,4	158,5
0,035	2395	0,621	0,607	0,620	0,616	282,4	282,3	282,5	158,5
0,034	2386	0,483	0,473	0,486	0,481	244,7	244,5	244,7	119,0
0,033	2385	0,488	0,478	0,491	0,486	244,7	244,6	244,8	118,9
0,032	2367	0,398	0,392	0,405	0,398	199,2	199,0	199,1	79,1
0,032	2340	0,402	0,399	0,411	0,404	178,2	178,1	178,2	63,3

Tab. Q První část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

U _{ef} [V]	P _{1,1} [W]	P _{2,1} [W]	P ₁ [W]	pf [-]	pf _{Bez f} [-]	f [Hz]
424,2	-520	831	312	0,110	0,131	39,964
413,0	-379	599	220	0,104	0,127	39,964
400,4	-262	423	161	0,105	0,133	39,964
387,8	-188	316	128	0,110	0,144	39,965
373,8	-142	249	107	0,115	0,155	39,965
360,6	-107	200	93	0,122	0,171	39,965
346,3	-76	158	82	0,134	0,196	39,966
315,3	-41	108	67	0,156	0,250	39,968
282,3	-17	73	56	0,187	0,333	39,966
282,4	-18	73	56	0,184	0,331	39,966
244,7	-2	48	46	0,228	0,464	39,964
244,7	-2	49	46	0,226	0,460	39,962
199,1	8	31	39	0,281	0,715	39,974
178,2	10	27	36	0,293	0,813	39,973

Tab. R Druhá část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

P_m [W]	η [%]	ΔP_{s0} [W]	ΔP_k [W]	U_0^2 [V]	ΔP_{fe} [W]
8,79	2,82	164,11	147,89	128020,84	116,99
7,78	3,54	96,18	123,82	114176,41	92,92
8,27	5,13	53,53	107,47	100933,29	76,57
8,02	6,27	32,95	95,05	88744,41	64,15
7,78	7,27	22,81	84,19	77339,61	53,29
8,01	8,62	16,27	76,73	66770,56	45,83
8,78	10,71	11,37	70,63	56739,24	39,73
8,27	12,35	6,73	60,27	39441,96	29,37
8,25	14,72	4,14	51,86	25122,25	20,96
8,78	15,68	4,20	51,80	25122,25	20,90
8,50	18,47	2,56	43,44	14161,00	12,54
8,24	17,92	2,61	43,39	14137,21	12,49
7,93	20,34	1,75	37,25	6256,81	6,35
7,84	21,78	1,81	34,19	4006,89	3,29

Tab. S Vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno

Ochlazovací charakteristika po zkoušce naprázdno

t [s]	R [Ω]
25	7,279
45	7,224
60	7,187
75	7,151
90	7,125
100	7,101
135	7,059
155	7,036
180	7,010
210	6,980
240	6,958
270	6,939
300	6,921
360	6,895
420	6,876
480	6,859
540	6,845
600	6,832

Tab. T Měření ochlazovací charakteristiky

Příloha D Měření ztrát při 3kHz PWM. napětí o frekvenci 50Hz

Zkouška při zatížení

M [Nm]	n [min ⁻¹]	I _{ef1} [A]	I _{ef2} [A]	I _{ef3} [A]	I _{ef} [A]	U _{ef1} [V]	U _{ef2} [V]	U _{ef3} [V]	U _{ef4} [V]
7,501	2814	4,822	4,815	4,732	4,790	433,8	433,8	434,5	383,4
6,240	2851	4,135	4,060	4,100	4,099	437,8	437,5	437,0	385,5
5,000	2885	3,471	3,503	3,483	3,486	438,0	438,6	438,3	386,7
4,015	2915	3,112	3,039	3,029	3,060	440,6	440,3	440,8	389,2
2,986	2931	2,718	2,691	2,725	2,711	442,2	441,9	441,7	389,9
1,990	2954	2,429	2,447	2,417	2,431	444,2	444,6	444,1	392,5
0,991	2980	2,279	2,249	2,220	2,249	444,9	445,2	445,2	393,9

Tab. U První část naměřených hodnot během zkoušky při zatížení

U _{ef} [V]	P _{1,1} [W]	P _{2,1} [W]	P ₁ [W]	pf [-]	pf _{Bez f} [-]	f [Hz]
434,0	927	1846	2773	0,770	0,872	49,979
437,4	738	1568	2306	0,743	0,843	49,981
438,3	506	1347	1853	0,700	0,794	49,979
440,6	349	1155	1504	0,644	0,729	49,979
441,9	189	987	1176	0,567	0,642	49,982
444,3	-4	835	831	0,444	0,503	49,978
445,1	-171	677	506	0,292	0,330	49,978

Tab. V Druhá část naměřených hodnot během zkoušky při zatížení

P _m [W]	η [%]	ΔP _s [W]	ΔP _r [W]
2210,404	79,7116	248,4914	150,9796
1862,989	80,7888	181,9685	101,0557
1510,582	81,5209	131,6119	62,5613
1225,611	81,4901	101,4106	37,2083
916,503	77,9339	79,5975	23,1621
615,591	74,0783	64,0045	10,3905
309,256	61,1178	54,7797	2,4124

Tab. W Vypočtené hodnoty během zkoušky při zatížení

Zkouška naprázdno

M [Nm]	n [min ⁻¹]	I _{ef1} [A]	I _{ef2} [A]	I _{ef3} [A]	I _{ef} [A]	U _{ef1} [V]	U _{ef2} [V]	U _{ef3} [V]	U _{ef4} [V]
0,038	3000	2,261	2,250	2,251	2,254	448,1	448,2	447,7	396,2
0,039	2994	1,683	1,662	1,659	1,668	433,0	432,8	433,2	368,3
0,038	2998	1,086	1,079	1,070	1,079	396,2	396,3	396,0	308,0
0,040	2996	0,935	0,933	0,919	0,929	376,2	376,1	376,4	278,4
0,039	2991	0,790	0,786	0,777	0,784	355,1	355,1	355,1	248,4
0,038	2987	0,754	0,752	0,743	0,749	347,9	347,6	347,9	238,2
0,039	2988	0,622	0,619	0,609	0,617	317,5	317,5	317,5	198,4
0,039	2977	0,522	0,519	0,513	0,518	283,5	283,3	283,5	157,9
0,038	2968	0,454	0,451	0,447	0,451	245,2	245,1	245,1	118,0
0,037	2926	0,477	0,475	0,471	0,474	199,3	199,2	199,3	77,5

Tab. X První část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

U _{ef} [V]	P _{1,1} [W]	P _{2,1} [W]	P ₁ [W]	pf [-]	pf _{Bez f} [-]	f [Hz]
448,0	-336	546	210	0,120	0,136	49,980
433,0	-221	387	166	0,133	0,156	49,979
396,1	-104	225	121	0,164	0,210	49,980
376,2	-74	182	108	0,178	0,241	49,981
355,1	-46	145	99	0,205	0,293	49,977
347,8	-39	135	96	0,212	0,311	49,978
317,5	-15	100	85	0,251	0,401	49,980
283,4	1	74	75	0,294	0,529	49,980
245,1	12	53	65	0,341	0,705	49,981
199,3	17	39	57	0,346	0,896	49,983

Tab. Y Druhá část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

P _m [W]	η [%]	ΔP _{s0} [W]	ΔP _k [W]	U ₀ ² [V]	ΔP _{fe} [W]
11,938	5,6848	55,0235	154,9765	156974,44	107,9107
12,228	7,3663	30,1323	135,8677	135644,89	88,8019
11,930	9,8595	12,6091	108,3909	94864,00	61,3251
12,550	11,6204	9,3470	98,6530	77506,56	51,5872
12,215	12,3384	6,6569	92,3431	61702,56	45,2773
11,886	12,3813	6,0758	89,9242	56739,24	42,8584
12,203	14,3565	4,1230	80,8770	39362,56	33,8112
12,158	16,2107	2,9060	72,0940	24932,41	25,0282
11,811	18,1708	2,2029	62,7971	13924,00	15,7313
11,337	19,8895	2,4333	54,5667	6006,25	7,5009

Tab. Z Vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno

Ochlazovací charakteristika po zkoušce naprázdno

t [s]	R [Ω]
30	7,158
79	7,089
90	7,060
105	7,041
120	7,024
135	7,007
150	6,991
170	6,975
195	6,955
225	6,934
255	6,919
300	6,899
360	6,877
420	6,860
540	6,837
600	6,826

Tab. AA Měření ochlazovací charakteristiky

Příloha E Měření ztrát při 12kHz PWM. napětí o frekvenci 50Hz

Zkouška při zatížení

M [Nm]	n [min^{-1}]	I _{ef1} [A]	I _{ef2} [A]	I _{ef3} [A]	I _{ef} [A]	U _{ef1} [V]	U _{ef2} [V]	U _{ef3} [V]	U _{ef4} [V]
7,512	2823	4,809	4,710	4,766	4,762	436,6	436,0	436,6	388,9
6,275	2853	4,142	4,080	4,100	4,107	437,8	437,3	437,9	389,6
4,989	2893	3,486	3,463	3,540	3,497	439,5	439,8	439,3	391,6
4,001	2910	3,147	3,083	3,076	3,102	440,5	440,2	441,1	392,3
3,000	2933	2,757	2,713	2,822	2,764	442,5	442,2	441,9	394,5
1,981	2955	2,444	2,473	2,480	2,466	443,0	443,6	443,4	394,9
1,010	2981	2,391	2,350	2,380	2,374	445,9	445,5	446,0	397,9

Tab. BB První část naměřených hodnot během zkoušky při zatížení



U_{ef} [V]	$P_{1,1}$ [W]	$P_{2,1}$ [W]	P_1 [W]	pf [-]	pf _{Bez} [-]	f [Hz]
436,4	936	1830	2765	0,768	0,862	49,970
437,6	717	1586	2303	0,740	0,831	49,969
439,5	505	1340	1845	0,693	0,778	49,971
440,6	333	1174	1507	0,636	0,715	49,971
442,2	178	988	1166	0,551	0,617	49,971
443,3	-12	837	825	0,436	0,489	49,972
445,8	-184	699	515	0,281	0,315	49,970

Tab. CC Druhá část naměřených hodnot během zkoušky při zatížení

P_m [W]	η [%]	ΔP_s [W]	ΔP_r [W]
2220,726	80,3156	246,8086	145,0464
1874,753	81,4048	183,5824	100,9224
1511,438	81,9208	133,0984	58,9258
1219,242	80,9052	104,7286	40,2748
921,429	79,0248	83,1491	22,8486
613,014	74,3047	66,1862	10,4855
315,291	61,2216	61,3399	2,4946

Tab. DD Vypočtené hodnoty během zkoušky při zatížení

Zkouška naprázdno

M [Nm]	n [min ⁻¹]	I _{ef1} [A]	I _{ef2} [A]	I _{ef3} [A]	I _{ef} [A]	U _{ef1} [V]	U _{ef2} [V]	U _{ef3} [V]	U _{ef4} [V]
0,039	2997	2,355	2,330	2,394	2,360	449,7	449,7	449,6	401,3
0,038	2990	1,748	1,720	1,748	1,739	431,5	431,6	431,6	370,6
0,039	2993	1,347	1,322	1,339	1,336	412,5	412,3	412,6	338,2
0,037	2989	1,110	1,080	1,098	1,096	392,9	392,9	393,1	308,1
0,035	2988	0,938	0,918	0,931	0,929	373,3	373,2	373,4	278,2
0,036	2990	0,811	0,789	0,803	0,801	353,6	353,4	353,7	248,5
0,038	2994	0,757	0,740	0,750	0,749	345,5	345,6	345,8	238,0
0,038	2984	0,637	0,623	0,636	0,632	315,8	315,6	315,8	198,7
0,038	2983	0,519	0,513	0,523	0,518	282,1	282,1	282,2	158,6
0,038	2973	0,455	0,448	0,462	0,455	244,3	244,0	244,1	119,1
0,035	2929	0,467	0,460	0,471	0,466	198,3	198,0	198,2	79,0

Tab. EE První část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

U_{ef} [V]	$P_{1,1}$ [W]	$P_{2,1}$ [W]	P_1 [W]	pf [-]	pf _{Bez f} [-]	f [Hz]
449,7	-348	561	213	0,116	0,130	49,971
431,6	-232	396	164	0,126	0,147	49,971
412,5	-156	286	130	0,137	0,166	49,970
393,0	-108	220	112	0,150	0,191	49,972
373,3	-75	174	99	0,165	0,221	49,972
353,6	-50	140	90	0,184	0,261	49,971
345,6	-40	129	88	0,197	0,285	49,969
315,7	-19	97	77	0,224	0,354	49,972
282,1	-1	70	69	0,271	0,485	49,969
244,1	10	51	61	0,315	0,650	49,963
198,2	16	38	54	0,336	0,847	49,973

Tab. FF Druhá část naměřených hodnot při zkoušce naprázdno

P_m [W]	η [%]	ΔP_{s0} [W]	ΔP_k [W]	U_0^2 [V]	ΔP_{fe} [W]
12,240	2,1818	60,6186	152,3814	161041,69	108,1484
11,898	3,0045	32,9140	131,0860	137344,36	86,8530
12,224	4,2741	19,4265	110,5735	114379,24	66,3405
11,581	5,2641	13,0738	98,9262	94925,61	54,6932
10,952	6,2943	9,3932	89,6068	77395,24	45,3738
11,272	8,0514	6,9831	83,0169	61752,25	38,7839
11,914	9,2357	6,1058	81,8942	56644,00	37,6612
11,874	12,2412	4,3473	72,6527	39481,69	28,4197
11,870	16,9571	2,9204	66,0796	25153,96	21,8466
11,831	23,1980	2,2532	58,7468	14184,81	14,5138
10,735	28,2500	2,3635	51,6365	6241,00	7,4035

Tab. GG Vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno

Ochlazovací charakteristika po zkoušce naprázdno

t [s]	R [Ω]
25	7,196
45	7,150
60	7,120
75	7,098
90	7,076
120	7,035
150	7,001
180	6,970
225	6,940
270	6,917
330	6,892
375	6,874
420	6,863
480	6,849
540	6,836
600	6,826

Tab. HH Měření ochlazovací charakteristiky

Příloha F Tabulky použitých měřicích přístrojů

přístroj	typ, parametry	výr./inv. Číslo
multimetr Yokogawa	WT1800	91N511405
multimetr Keithley	2000	800223
multimetr Keithley	2000	-
multimetr Metex	M3650D	E6E6749936
dynamometr VUES Brno	10kW 127Hz	313095-0000
řídící jednotka dynamometru	M350, 230V, 50Hz, 30VA	35911

Tab. II Použité měřicí přístroje při měření s napájecím napětím o frekvenci 50Hz

přístroj	typ, parametry	výr./inv. Číslo
multimetr Yokogawa	WT1800	91N511405
multimetr Keithley	2000,00	800223,00
multimetr Keithley	2000,00	-
multimetr Metex	M3650D	E6E6749936
dynamometr VUES Brno	10kW 127Hz	313095-0000
řídící jednotka dynamometru	M350, 230V, 50Hz, 30VA	35911,00
napěťový zdroj California Instruments 5001iX	5kVA	-

Tab. JJ Použité měřicí přístroje při měření s napájecím napětím o frekvenci 60Hz

přístroj	typ, parametry	výr./inv. Číslo
multimetr Yokogawa	WT1600	760101-S15
mikrometr CROPICO	DO5001	-
dynamometr Magtrol SA	12kW, 20Nm, 5730 min ⁻¹	2WB65-HS
řídící jednotka dynamometru Magtrol	DSP 6001	-
napěťový zdroj California Instruments 5001iX	5kVA	-

Tab. KK Použité měřicí přístroje při měření s napájecím napětím o frekvenci 40Hz

přístroj	typ, parametry	výr./inv. Číslo
multimetr Yokogawa	WT1800	91N511405
mikrometr CROPICO	DO5001	-
dynamometr Magtrol SA	12kW, 20Nm, 5730 min ⁻¹	2WB65-HS
řídící jednotka dynamometru Magtrol	DSP 6001	-
měníč Control Techniques	Comander GP, UNI2401	3275321012

Tab. LL Použité měřicí přístroje při měření s PWM modulovaným napájecím napětím o frekvenci 40, 50, 60Hz