

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

ROZBOR ELEKTROMECHANICKÝCH PARAMETRŮ HISTORICKÉHO ASYNCHRONNÍHO STROJE A JEJICH SROVNÁNÍ SE STROJEM MODERNÍM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

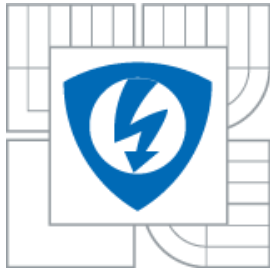
VOJTĚCH MUCZKA

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY

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

ROZBOR ELEKTROMECHANICKÝCH PARAMETRŮ HISTORICKÉHO ASYNCHRONNÍHO STROJE A JEJICH SROVNÁNÍ SE STROJEM MODERNÍM

ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL PARAMETERS OF A HISTORICAL INDUCTION
MACHINE AND THEIR COMPARISON TO A MODERN MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

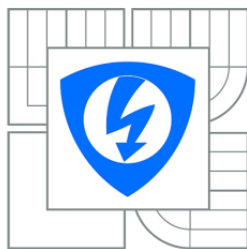
VOJTĚCH MUCZKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL VOREL, Ph.D.

BRNO, 2015



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: Vojtěch Muczka

ID: 155202

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Rozbor elektromechanických parametrů historického asynchronního stroje a jejich srovnání se strojem moderním

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na základě výpočtů a měření zjistěte zastoupení jednotlivých dominantních ztrát (v železe statoru, ve vinutí statoru a ve vinutí rotoru) u porovnávaného historického a moderního motoru.
2. Identifikujte přibližně parametry náhradního schématu historického motoru při chodu s kotvou nakrátko a výpočtem ověřte, zda jeho jmenovité štítkové mechanické údaje odpovídají pracovnímu bodu s maximální účinností.
3. Srovnajte elektromagnetické návrhy obou strojů s ohledem na míru přesycení magnetického obvodu.
4. Na základě dynamometrických měření srovnajte parametry moment/hmotnost a účinnost obou strojů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] P. Vorel, P. Procházka: Řídicí členy v elektrických pohonech (skriptum VUT Brno)
[2] M. Patočka: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 2.6.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Vorel, 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá renovací historického asynchronního motoru a porovnáním jeho parametrů s moderním ekvivalentem. První část seznamuje čtenáře s principem činnosti tohoto stroje. Následující část je pak věnována renovaci motoru, měření a výpočtu jeho parametrů a následnému zhodnocení odlišností od parametrů moderního motoru.

Abstract

This theses is related to a renovation of a historical induction motor and parameter comparison with modern equivalent. The first part describes the working principal of an induction motor. The next part is dedicated to the process of renovation of this motor, measurements and calculations of its parameters, followed by evaluation of parameter differences between historical and modern motor.

Klíčová slova

Asynchronní motor, momentová charakteristika, porovnání parametrů, výkonové ztráty, účinnost

Keywords

Induction motor, torque characteristics, parameter comparison, power losses, efficiency

Bibliografická citace

MUCZKA, V. *Rozbor elektromechanických parametrů historického asynchronního stroje a jejich srovnání se strojem moderním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Rozbor elektromechanických parametrů historického asynchronního stroje a jejich srovnání se strojem moderním 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

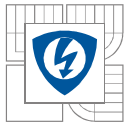
Podpis autora

Poděkování

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

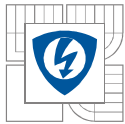
V Brně dne

Podpis autora



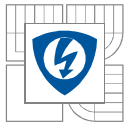
Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 PRINCIP ČINNOSTI	14
1.1 STATOROVÝ TOK A MAGNETIZAČNÍ PROUD	14
1.2 NAPĚTÍ INDUKOVANÉ V ROTORU	17
1.3 PROUD ROTORU, TVORBA MOMENTU	18
1.4 VÝKONOVÉ ZTRÁTY V MOTORU.....	24
1.5 POČET PÓLŮ STROJE.....	26
1.6 OPTIMUM ÚČINNOSTI.....	27
2 POPIS POROVNÁVANÝCH MOTORŮ	29
3 RENOVAČE MOTORU.....	31
4 ANALÝZA PARAMETRŮ POROVNÁVANÝCH MOTORU	34
4.1 ZTRÁTY V ROTORU OBOU MOTORŮ	34
4.2 ODPOR ROTOROVÉHO VINUTÍ KROUŽKOVÉHO MOTORU KLÍMA	35
4.3 PŘECHODOVÝ ODPOR NA KROUŽCÍCH MOTORU KLÍMA.....	36
4.4 ODPOR A ZTRÁTY STATOROVÉHO VINUTÍ OBOU MOTORŮ.....	37
4.5 MECHANICKÉ ZTRÁTY OBOU MOTORŮ	38
4.6 ZTRÁTY V ŽELEZE STATORU OBOU MOTORŮ.....	38
4.7 VLASTNÍ (MAGNETIZAČNÍ) INDUKČNOST STATOROVÉHO VINUTÍ.....	40
4.8 MĚŘENÍ ROZPTYLOVÉ INDUKČNOSTI A ROTOROVÉHO ODPORU	43
4.9 VÝPOČET ÚČINÍKU MOTORU A ÚČINNOSTI PŘI JMENOVITÉM CHODU	45
4.10 MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI ÚČINNOSTI NA VÝKONU	46
4.11 MĚŘENÍ ÚČINNOSTI V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	48
5 SROVNÁNÍ PARAMETRŮ HISTORICKÉHO A NOVODOBÉHO MOTORU	51
ZÁVĚR.....	53
LITERATURA	55



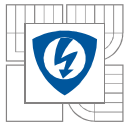
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1: Grafické znázornění vztahu (1.5)</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 1-2: Magnetický tok v jádru bez mezery a tok v jádru se vzduchovou mezerou</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 1-3: Průběh momentu v závislosti na elektrické frekvenci rotoru – bez uvažování vlivu rozptylu.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 1-4: Průběh momentu v závislosti na elektrické frekvenci rotoru – s uvažováním vlivu rozptylové indukčnosti.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 1-5: Závislost momentu na hřídeli v závislosti na elektrickém kmitočtu rotoru.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 1-6: Momentová charakteristika asynchronního motoru v závislosti na otáčkách rotoru</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 1-7: Řízení otáček motoru s kroužkovou kotvou připojením odporů (převzato z [1]).....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 1-8 a Obr. 1-9: Regulace točivého momentu a rozběhového proudu motoru s kroužkovou kotvou třístupňovým rozběhovým odporem (převzato z [1]).....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 1-10: Závislost jmenovitého momentu na počtu pólů stroje při použití stejného statorového paketu, stejné proudové hustoty a stejného činitele plnění drážek.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 1-11: Závislost výsledného rotorového kmitočtu na velikosti sycení při konstantní zátěži ...</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 1-12: Závislost celkových ztrát na rotorovém kmitočtu pro různé zatížení a otáčky.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 2-1: Štítek motoru Klíma.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-1: Rotor se sběracími kroužky a mosazné držáky s uhlíky</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3-2 a Obr. 3-3: Litinový kryt po nanesení první (vlevo) a druhé (vpravo) vrstvy tmelu</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3-4 a Obr. 3-5: Litinové kryty před (vlevo) a po (vpravo) nástřiku barvy.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3-6: Složený motor na pracovišti pro měření odporů a indukčností</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4-1: Schéma pro měření odporů rotorového vinutí</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4-2: Schéma pro měření přechodových odporů na kroužcích rotoru</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4-3: Velikosti napětí na přechodovém odporu kroužků v závislosti na procházejícím proudu</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4-4: Schéma zapojení pro měření odporů statorového vinutí.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-5: Náhradní schéma motoru při rozpojení svorek rotoru (jedna fáze).....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4-6: Srovnání magnetizačních indukčností motorů v závislosti na velikosti fázového napětí</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4-7: Náhradní schéma jedné fáze motoru při měření rozptylové indukčnosti.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 4-8: Závislost účinnosti motorů na momentu (výkonu).....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 4-9: Závislost účinnosti motorů Klíma 1930 a EMP 2012 na velikosti napájecího napětí při konstantním zatěžovacím momentu 5Nm.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 4-10: Závislost účinnosti motorů Klíma 1930 a EMP 2012 na velikosti napájecího napětí při konstantním zatěžovacím jmenovitým momentu 20Nm</i>	<i>50</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1: Štítkové parametry srovnávaných motorů</i>	30
<i>Tab. 4-1: Ohmické ztráty v rotoru</i>	34
<i>Tab. 4-2: Naměřené a vypočtené hodnoty při měření odporů vinutí rotoru</i>	35
<i>Tab. 4-3: Naměřené a vypočtené hodnoty při měření přechodových odporů kroužků rotoru</i>	36
<i>Tab. 4-4: Srovnání odporů vinutí a ztrát motorů</i>	37
<i>Tab. 4-5: Naměřené mechanické + ventilační ztráty</i>	38
<i>Tab. 4-6: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno s rotorem nakrátko – motor Klíma</i>	39
<i>Tab. 4-7: Naměřené hodnoty napětí a proudu při zkoušce naprázdno – motor Slavkov</i>	39
<i>Tab. 4-8: Vypočtená hodnota odporu charakterizující ztráty v železe při zkoušce naprázdno pro jmenovitou hodnotu napájení – motor Slavkov</i>	40
<i>Tab. 4-9: Ztráty v železe při jmenovitém napájení</i>	40
<i>Tab. 4-10: Magnetizační indukčnosti motorů při různých hodnotách fázového napětí</i>	41
<i>Tab. 4-11: Naměřené a vypočtené hodnoty motoru Klíma pro napájecí napětí 60V</i>	44
<i>Tab. 4-12: Naměřené a vypočtené hodnoty motoru EMP Slavkov pro napájecí napětí 57,5V</i>	44
<i>Tab. 4-13: Účinník a účinnost motorů při jmenovitém zatížení</i>	45
<i>Tab. 4-14: Naměřené veličiny při zatěžování momentem od 2 do 20 Nm – Klíma 1930</i>	46
<i>Tab. 4-15: Naměřené veličiny při zatěžování momentem od 2 do 20 Nm – EMP 2012</i>	46
<i>Tab. 4-16: Naměřené veličiny motoru Klíma při zatěžování momentem 5 N.m</i>	48
<i>Tab. 4-17: Naměřené veličiny motoru EMP Slavkov při zatěžování momentem 5 N.m</i>	48
<i>Tab. 4-18: Naměřené veličiny motoru Klíma při zatěžování momentem 20 N.m</i>	49
<i>Tab. 4-19: Naměřené veličiny motoru EMP Slavkov při zatěžování momentem 20 N.m</i>	49
<i>Tab. 5-1: Tabulka štítkových hodnot a vypočítaných ztrát historického i novodobého motoru</i>	51
<i>Tab. 5-2: Srovnání jednotlivých ztrát obou motorů</i>	52
<i>Tab. 5-3: Srovnání vypočtené a průměrné měřené účinnosti při jmenovitém napájení</i>	52
<i>Tab. 5-4: Srovnání vypočteného a průměrného měřeného účinníku při jmenovitém napájení</i>	52



ÚVOD

Asynchronní motory jsou nejvíce rozšířenými elektromotory díky jejich jednoduché konstrukci, levné výrobě, malým nárokům na údržbu a provozní spolehlivosti.

Cílem této práce bude porovnat parametry historického motoru od firmy Hubert Klíma z roku 1930 a novodobého motoru firmy Slavkov EMP z roku 2012. Oba motory jsou čtyřpólové se jmenovitým výkonem 3 kW.

Motor Klíma má kroužkovou kotvu a jeho provedení je otevřené bez ventilátoru na hřídeli, takže vzduch proudí volně kolem čel vinutí a mezerou mezi statorovým paketem a pláštěm. Kryty jsou tvořeny z litiny a rotor je upevněn nezapouzdřenými kuličkovými ložisky v uzavřených domcích se Staufferovými maznicemi. Motor je konstruován na starší napájecí síť se jmenovitým fázovým napětím 220V.

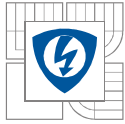
Motor EMP Slavkov je standardní moderní motor s kotvou nakrátko v běžném uzavřeném provedení, kdy je statorový paket nalisován do hliníkového pláště s chladíci žebry. Rotorová klec je tvořena z hliníku a na hřídeli je umístěn ventilátor pro lepší chlazení.

V první části této práce se nejprve seznámíme s obecným principem činnosti asynchronního motoru. Druhá část je zaměřena na samotnou renovaci historického motoru, kdy bylo třeba motor rozebrat, vyčistit, vysušit vinutí a obnovit do provozuschopného stavu. Ve třetí části bylo provedeno měření parametrů obou motorů a následně pak vypočítány jednotlivé ztráty, účinnosti při různých velikostech napájecího napětí a různých velikostech zatížení. Také byly vypočítány hodnoty parametrů náhradního schématu obou motorů. Na závěr byly všechny zjištěné hodnoty porovnány.

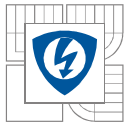


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název veličiny	Jednotka
Φ_s	Okamžitá hodnota magnetického indukčního toku	Wb
N	Počet závitů statorové cívky	-
u_s	Okamžitá hodnota napětí na statorové cívce	V
S_{Fe}	Plocha, kterou prochází magnetický indukční tok	m ²
B_s	Sycení magnetického obvodu (Magnetická indukce)	T
T	Perioda napájecího napětí	s
f	Frekvence napájecího napětí	Hz
U_s	Amplituda napájecího napětí	V
L	Indukčnost cívky	H
Ψ_{max}	Maximální hodnota spřaženého magnetického toku	Wb
A	Magnetická vodivost	H
l_m	Střední délka dráhy magnetického toku	m
R_m	Magnetický odpor	H ⁻¹
R_{Fe}	Magnetický odpor železného jádra	H ⁻¹
R_V	Magnetický odpor vzduchové mezery	H ⁻¹
$f_{rot,el}$	Elektrický kmitočet v rotoru	Hz
f_s	Frekvence točivého magnetického pole statoru	Hz
n	Mechanické otáčky rotoru	min ⁻¹
p	Počet pól-párů motoru	-
n_s	Otáčky točivého magnetického pole statoru	min ⁻¹
s	Skluz	%
$\Phi_{s,max}$	Maximální magnetický tok statoru	Wb
$\Phi_{rot}(t)$	Magnetický tok rotoru	Wb
R_{rot}	Odpor rotoru	Ω
I_{rot}	Proud v rotoru	A
F	Síla vznikající na vodiči v magnetickém poli, který je protékán proudem	N
B	Magnetická indukce pole	T
l	Délka vodiče	m
r	Poloměr rotoru	m



M	Moment vytvořený silou F ve vzdálenosti r od osy otáčení	N.m
L_δ	Rozptylová indukčnost	H
P_1	Příkon motoru	W
P_2	Výkon na hřídeli rotoru	W
ω	Úhlový kmitočet otáčení hřídele	rad/s
ΔP_{j1}	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru	W
ΔP_{j2}	Jouleovy ztráty v rotoru	W
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe	W
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty (ventilace, tření,...)	W
ΔP_d	Dodatečné ztráty (např. vyšší harmonické)	W
R_S	Odpor fáze vinutí statoru	Ω
I_f	Proud statorového vinutí jednou fází (efektivní hodnota)	A
$R_{kroužky}$	Odpor rezistorů připojených na kroužky	Ω
$\omega_{rot,el}$	Elektrický úhlový (skluzový) kmitočet rotoru	rad/s
ΔP_h	Hysterezní ztráty v železe	W
ΔP_v	Ztráty v železe vířivými proudy	W
W	Energie potřebná k proběhnutí jedné periody střídavého magnetování	J
U_{ef}	Efektivní hodnota napětí	V
R_{ekv}	Ekvivalentní odpor zastupující ztráty vířivými proudy	Ω
f_n	Jmenovitá frekvence napájecího napětí	Hz
n_n	Jmenovité otáčky	min^{-1}
M_n	Jmenovitý moment	N.m
$P_{2,n}$	Jmenovitý výkon na hřídeli motoru	W
$\Delta P_{j2,n}$	Jmenovité ohmické ztráty v rotoru	W
μ_0	Permeabilita vakua	H.m^{-1}
μ_r	Relativní permeabilita	-
U_1, U_2, U_3	Napětí na odporech vinutí rotoru	V
$R_{rot1}, R_{rot2}, R_{rot3}$	Fázové odpory vinutí rotoru	Ω
R_{p2}, R_{p3}	Přechodové odpory na druhém a třetím kroužku rotoru	Ω
U_{p2}, U_{p3}	Napěťový úbytek na druhém a třetím kroužku rotoru	V
$R_{p,avg}$	Průměrná hodnota odporu rotorových kroužků	Ω
$\Delta P_{j1,n}$	Jmenovité ztráty ve vinutí statoru	W



$I_{f,n}$	Jmenovitý fázový proud ze štítu motoru	A
R_{Fe}	Odpor charakterizující ztráty v železe motoru (jedné fáze)	Ω
L_S	Magnetizační indukčnost jedné fáze statorového vinutí	H
Q_I	Jalová složka příkonu motoru	VAr
S_I	Zdánlivý příkon	VA
P_I	Činná složka příkonu motoru	W
φ	Fázový posuv mezi napětím a proudem	°
P_{RR}	Výkonové ztráty jedné fáze rotorového odporu	W
Q_{LS}	Výkonové ztráty na statorové magnetizační indukčnosti	VAr
$Q_{L\sigma}$	Výkonové ztráty na rozptylové indukčnosti	VAr
$S_{L\sigma+RR}$	Zdánlivé ztráty na rotorovém odporu a rozptylové indukčnosti	VA
R_R	Odpor jedné fáze rotoru	Ω
L_σ	Rozptylová indukčnost jedné fáze	H
$U_{f,n}$	Jmenovité fázové napětí ze štítu motoru	V
ΔP_n	Jmenovité celkové ztráty stroje	W
$P_{2,n}$	Jmenovitý příkon motoru	W

1 PRINCIP ČINNOSTI

Asynchronní motor se chová jako napěťový transformátor pracující na skluzovém (rotorovém elektrickém) kmitočtu. Pojmeme „napěťový transformátor“ myslíme transformátor napájený na primární straně (ve statoru) z tvrdého zdroje harmonického napětí (s teoreticky nulovým vnitřním odporem). Vnucované svorkové napájecí napětí je v takovém případě nezávislé na odebíraném proudu.

1.1 Statorový tok a magnetizační proud

Pro přehlednou demonstraci principů budeme na statorové vinutí nyní pohlížet jako na jednoduchou cívku. Magnetický tok statorového vinutí je principiálně přímo úměrný časovému integrálu napětí na statorové cívce[2],[3]:

$$\Phi_s(t) = \frac{1}{N} \cdot \int u_s(t) dt \quad (1.1)$$

Φ_s ... Okamžitá hodnota magnetického indukčního toku [Wb]

N ... Počet závitů statorové cívky [-]

u_s ... Okamžitá hodnota napětí na statorové cívce [V]

Můžeme vyjádřit sycení magnetického obvodu jako plošnou hustotu magnetického toku, jež v případě homogenního pole bude[2]:

$$B_s(t) = \frac{\Phi_s(t)}{S_{Fe}} \quad (1.2)$$

S_{Fe} ... Plocha, kterou prochází magnetický indukční tok [m²]

B_s ... Sycení magnetického obvodu (Magnetická indukce) [T]

Po dosazení vztahu (1.1) do (1.2) získáme:

$$B_s(t) = \frac{1}{N \cdot S_{Fe}} \cdot \int u_s(t) dt \quad (1.3)$$

Jelikož je sycení magnetického obvodu úměrné integrálu napájecího napětí, můžeme si jej představit jako plochu pod křivkou napětí. Pro maximální sycení poté platí [2]:

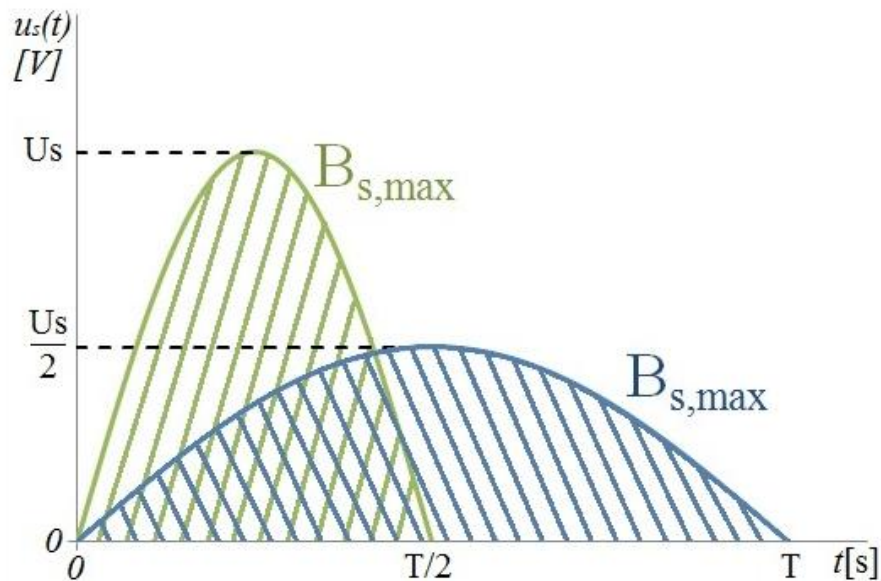
$$B_{s,max} = \frac{1}{N \cdot S_{Fe}} \cdot \max \int u_s(t) dt \sim U_s \cdot T \sim \frac{U_s}{f} \quad (1.4)$$

$$B_{s,max} \sim \frac{U_s}{f} \quad (1.5)$$

T ... Perioda napájecího napětí [s]

f ... Frekvence napájecího napětí [Hz]

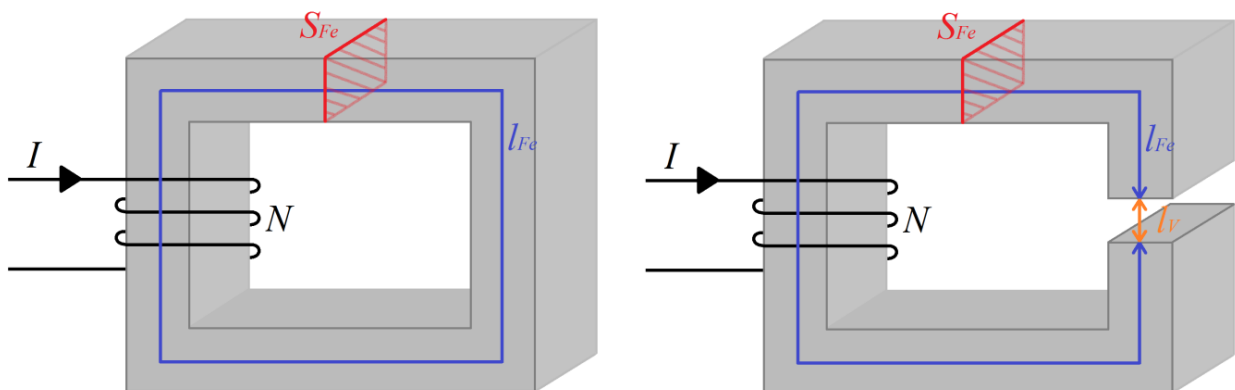
U_s ... Amplituda napájecího napětí [V]



Obr. 1-1: Grafické znázornění vztahu (1.5)

Změnou poměru U_s/f tedy měníme sycení (amplitudu magnetické indukce). Při odbuzení se snižuje maximální moment, který může motor vyvinout a při přebuzení dochází k přesycení magnetického obvodu a tím ke strmému nárůstu magnetizačního proudu statorového vinutí, který může vést k přehřátí vinutí [2].

Díky existenci tří fázových vinutí s vzájemným prostorovým posunem o 120° (360° pak odpovídá jednomu pólpáru) a dále díky vzájemnému fázovému posunu tří harmonických fázových proudů o 120° vzniká podél vzduchové mezery výsledné magnetické pole s konstantní velikostí (tj. neměnnou v čase), ovšem s harmonickým rozložením podél mezery v rámci délky jednoho pólpáru. V čase se pak toto pole podél mezery rovnoměrně otáčí (točivé pole). Pro velikost indukce tohoto točivého pole pak stále platí úměra (1.5)[2].

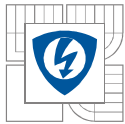


Obr. 1-2: Magnetický tok v jádru bez mezery a tok v jádru se vzduchovou mezerou

Pro napětí cívky lze napsat:

$$u = N \cdot \frac{d\Phi_s}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (1.6)$$

L ... Indukčnost cívky [H]



Zintegrováním rovnice (1.6) obdržíme:

$$\underbrace{N \cdot \Phi_s(t)}_{\substack{\text{dáno pouze} \\ \text{napájením}}} = L \cdot i(t) \quad (1.7)$$

Pro maximální hodnoty veličin poté můžeme napsat:

$$\underbrace{N \cdot \Phi_{s,max}}_{\Psi_{max}} = L \cdot I_{max} \quad (1.8)$$

$\Phi_{s,max}$... Maximální magnetický tok statoru [Wb]

Ψ_{max} ... Maximální hodnota spřaženého magnetického toku [Wb]

Mluvíme-li o vinutí motoru nebo transformátoru, představuje proud v rovnici (1.8) proud magnetizační. Pro indukčnost cívky pak podle [2],[3] platí:

$$L = N^2 \cdot \Lambda \quad (1.9)$$

Λ ... Magnetická vodivost [H]

Pro výpočet magnetické vodivosti podle [2],[3] platí vztah:

$$\Lambda = \mu_r \mu_0 \cdot \frac{S}{l_m} = \frac{1}{R_m} \quad (1.10)$$

l_m ... Střední délka dráhy magnetického toku [m]

R_m ... Magnetický odpor [H^{-1}]

Celkový magnetický odpor je roven součtu magnetického odporu jádra a vzduchové mezery. Jelikož průřez jádra S_{Fe} i vzduchové mezery S_V je stejný a relativní permeabilita vzduchu se blíží jedné, můžeme napsat:

$$R_m = \frac{1}{\mu_r \mu_0 \cdot \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}}} + \frac{1}{\mu_0 \cdot \frac{S_{Fe}}{l_V}} = \frac{l_{Fe} + \mu_r \cdot l_V}{\mu_r \mu_0 \cdot S_{Fe}} \quad (1.11)$$

$$R_m = R_{Fe} + R_V \quad (1.12)$$

R_{Fe} ... Magnetický odpor železného jádra [H^{-1}]

R_V ... Magnetický odpor vzduchové mezery [H^{-1}]

Z předchozí rovnice vidíme, že při vzrůstající délce vzduchové mezery klesá magnetická vodivost. Podle rovnice pro indukčnost (1.9) zjistíme, že pokud dojde ke snížení magnetické vodivosti, sníží se i indukčnost. Poté podle rovnice (1.8) při snížení velikosti indukčnosti vzroste proud, protože špičkový magnetický tok musí zůstat neměnný, samozřejmě pokud zachováваме průběh napájecího napětí (tok je stále dán jeho časovým integrálem).

Z toho vyplývá, že čím větší je velikost vzduchové mezery, tím větší magnetizační proud bude vinutím protékat. To je důvodem, proč požadujeme v asynchronním stroji vzduchovou mezeru co nejmenší.

1.2 Napětí indukované v rotoru

Točivé pole generované státorem se uzavírá přes rotor. Rotor „cítí“ harmonické střídavé pole s amplitudou rovnou velikosti statorového točivého pole a s kmitočtem úměrným rozdílu rychlosti otáčení točivého pole a rotoru. Pokud se rotor otáčí otáčkami n a točivé pole otáčkami n_s (synchronní otáčky korespondující napájecímu kmitočtu a počtu pólů), pak kmitočet rotorového magnetického pole musí být:

$$f_{rot,el} = f_s - \frac{n}{60} \cdot p \quad (1.13)$$

$f_{rot,el}$... Elektrický kmitočet v rotoru [Hz]

f_s ... Frekvence točivého magnetického pole statoru [Hz]

n ... Mechanické otáčky rotoru [min^{-1}]

p ... Počet pól-párů motoru [-]

Kmitočet rotorového magnetického pole nazýváme elektrický skluzový kmitočet. Skluzem se rozumí fakt, že otáčky motoru jsou nižší než synchronní. Skluz je pak definován:

$$s_{[\%]} = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\% \quad (1.14)$$

n_s ... Otáčky točivého magnetického pole statoru [min^{-1}]

s ... Skluz [%]

Rotorový magnetický tok můžeme zapsat jako [2]:

$$\Phi_{rot}(t) = \Phi_{s,max} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{rot,el} \cdot t) \quad (1.15)$$

$\Phi_{rot}(t)$... Magnetický tok rotoru [Wb]

Napětí indukované v rotoru musí být podle Faradayova indukčního zákona přímo úměrné časové derivaci rotorového toku:

$$u_{rot}(t) \sim \frac{d\Phi_{rot}(t)}{dt} = \underbrace{\Phi_{s,max} \cdot 2\pi \cdot f_{rot,el}}_{\text{amplituda rotorového napětí}} \cdot \cos(2\pi \cdot f_{rot,el} \cdot t) \quad (1.16)$$

Pro amplitudu rotorového napětí pak tedy platí:

$$U_{rot} \sim \Phi_{s,max} \cdot 2\pi \cdot f_{rot,el} \quad (1.17)$$

Při zatížení motoru klesají mechanické otáčky. Tím roste elektrická frekvence v rotoru a roste proto i amplituda napětí v rotoru, jelikož tok $\Phi_{s,max}$ se nemění (je vnučován státorem).

1.3 Proud rotoru, tvorba momentu

Uvažujme nejprve nulový rozptyl transformátoru představovaného statorovým a rotorovým vinutím. Z kap. 1.2 je již zřejmé, že tento transformátor pracuje na skluzovém kmitočtu.

Jelikož rotorové vinutí je spojeno nakrátko, bude jím při nulovém rozptylu procházet harmonický proud, jehož amplituda bude:

$$I_{rot} = \frac{U_{rot}}{R_{rot}} \quad (1.18)$$

R_{rot} ... Odpor rotoru [Ω]

I_{rot} ... Proud v rotoru [A]

Tento proud při průchodu vodičem v magnetickém poli o magnetické indukci B bude způsobovat sílu působící na vodič. V případě jednoduchého přímého vodiče umístěného v homogenním poli kolmo na směr siločar se jedná o sílu:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (1.19)$$

F ... Síla vznikající na vodiči v magnetickém poli, který je protékán proudem [N]

B ... Magnetická indukce pole [T]

l ... Délka vodiče [m]

V případě našeho rotoru bude tedy síla také přímo úměrná součinu magnetické indukce a rotorového proudu:

$$F \sim B_{s,max} \cdot I_{rot} \quad (1.20)$$

Pro velikost momentu pak platí vztah:

$$M = F \cdot r \sim F \sim B_{s,max} \cdot I_{rot} \quad (1.21)$$

r ... Poloměr rotoru [m]

M ... Moment vytvořený silou F ve vzdálenosti r od osy otáčení [N.m]

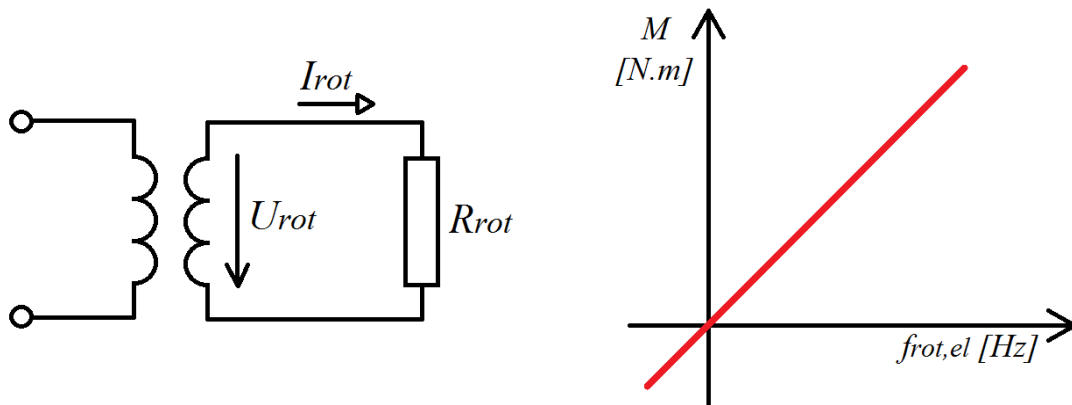
Dosadíme-li za I_{rot} podle (1.18) s uvažováním U_{rot} podle (1.17), obdržíme:

$$M = B_{s,max} \cdot \frac{U_{rot}}{R_{rot}} \sim \frac{B_{s,max}}{R_{rot}} \cdot \Phi_{s,max} \cdot 2\pi \cdot f_{rot,el} \quad (1.22)$$

Při uvážení $B_{s,max}$ a tedy i $\Phi_{s,max}$ konstantní (dáno vnuceným poměrem U_s/f ze statoru) je z (1.22) vidět, že moment bude přímo úměrný skluzovému kmitočtu:

$$M \sim f_{rot,el} \quad (1.23)$$

Tato situace je znázorněna na Obr. 1-3.



Obr. 1-3: Průběh momentu v závislosti na elektrické frekvenci rotoru – bez uvažování vlivu rozptylu

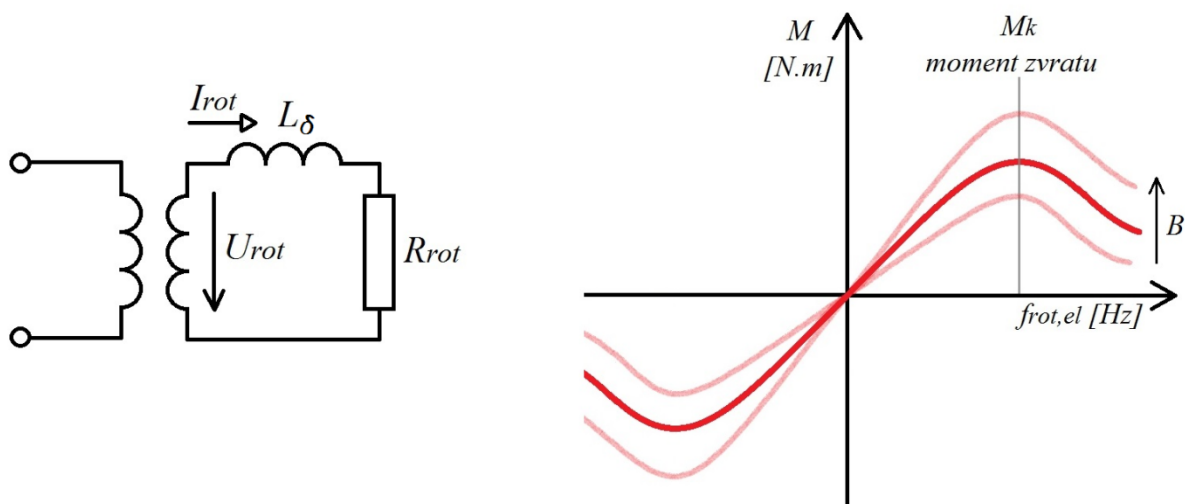
Nyní přistoupíme k zohlednění vlivu rozptylu. Situace je patrná z Obr. 1-4. Rozptyl modelujeme představou sekundární rozptylové indukčnosti myšleného transformátoru pracujícího na skluzovém kmitočtu. Pak můžeme amplitudu rotorového proudu vyjádřit vzorcem:

$$I_{rot} = \frac{U_{rot}}{\sqrt{R_{rot}^2 + (2\pi \cdot f_{rot,el} \cdot L_{\sigma})^2}} \quad (1.24)$$

L_{σ} ... Rozptylová indukčnost [H]

Z Obr. 1-4 vidíme, že pro nízkou elektrickou frekvenci rotoru je charakteristika přibližně lineární, jelikož reaktance rozptylové indukčnosti L je malá. S rostoucí frekvencí roste rozptylová reaktance a dochází tak k limitaci velikosti proudu (stagnace jeho nárůstu, zatímco napětí rotoru stále roste přímo úměrně rotorovému kmitočtu). Přitom ale stále roste fázový posuv mezi napětím rotoru a proudem a proto moment nestagnuje, ale dokonce klesá. Úměra (1.20) totiž předpokládala nulový resp. konstantní fázový posuv mezi napětím a proudem rotoru, ovšem fázový posuv způsobuje pokles momentu.

Díky popsanému jevu vykazuje závislost momentu na rotorovém kmitočtu lokální maximum – tzv. moment zvratu. Velikost momentu zvratu můžeme ovlivnit velikostí magnetické indukce, viz Obr. 1-4.



Obr. 1-4: Průběh momentu v závislosti na elektrické frekvenci rotoru – s uvažováním vlivu rozptylové indukčnosti

Z Obr. 1-4 je patrné, že pro danou hodnotu sycení závisí moment již pouze na rotorovém (skluzovém) kmitočtu). Budeme-li motor napájet ze sítě tj. ze zdroje s konstantní amplitudou i kmitočtem harmonického napětí, pak z charakteristiky na Obr. 1-4 přímo vyplyne známá momentová charakteristika asynchronního motoru s kotvou nakrátko.

Ze vztahu (1.2) si můžeme vyjádřit úměru pro maximální hodnotu magnetické indukce a magnetického toku:

$$B_{s,max} = \frac{\Phi_{s,max}}{S_{Fe}} \sim \Phi_{s,max} \quad (1.25)$$

U rotoru platí, že moment je úměrný druhé mocnině magnetické indukce statorového pole. Toto tvrzení si můžeme ověřit, pokud budeme předpokládat, že průřez magnetického jádra se nemění a dosadíme do rovnice (1.22) úměru (1.25). Obdržíme vztah:

$$M \sim \frac{B_{s,max}}{R_{rot}} \cdot \Phi_{s,max} \cdot 2\pi \cdot f_{rot,el} \sim \frac{B_{s,max}^2}{R_{rot}} \cdot f_{rot,el} \quad (1.26)$$

Ze vztahu (1.26) vidíme, že pokud bude na kroučcích rotoru konstantní odpor a zanedbáme ohřev vinutí (a tím proměnný odpor) průchodem proudem, můžeme napsat:

$$M \sim B_{s,max}^2 \cdot f_{rot,el} \quad (1.27)$$

Toto platí ale pouze pro případ, kdy zanedbáváme rozptylovou indukčnost. Pokud rozptyl nezanedbáme, tak pro nízké kmitočty rotoru bude platit vztah (1.26). Pro vyšší kmitočty bude rozptylová reaktance nabývat větších hodnot než odpor rotoru a proto odpor pro zjednodušení zanedbáme. Pro rotorový proud bude platit (1.24), což dosadíme do rovnice (1.21) a dostaneme:

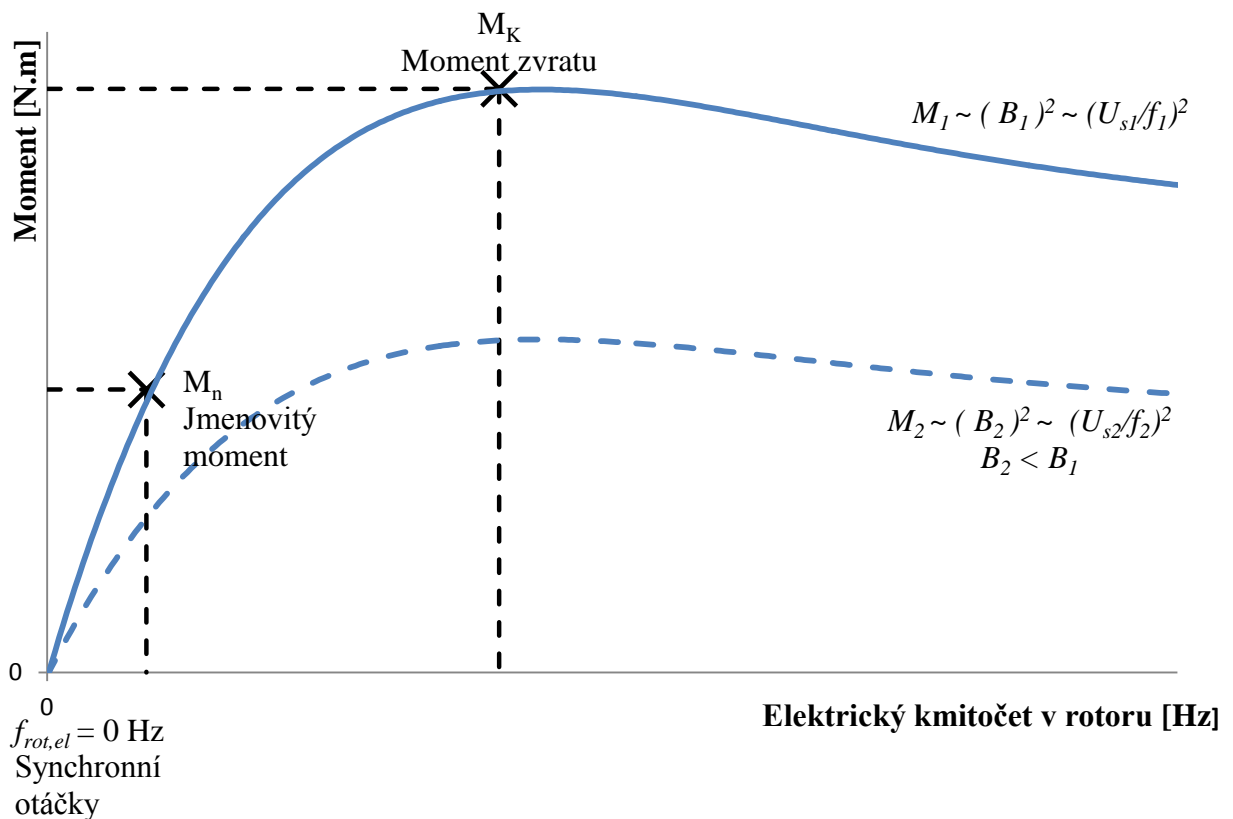
$$M \sim B_{s,max} \cdot I_{rot} \sim B_{s,max} \cdot \frac{U_{rot}}{\sqrt{R_{rot}^2 + (2\pi \cdot f_{rot,el} \cdot L_{\sigma})^2}} \sim B_{s,max} \cdot \frac{U_{rot}}{f_{rot,el} \cdot L_{\sigma}} \quad (1.28)$$

Po dosazení (1.17) za rotorové napětí U_{rot} a dosazení úměry (1.25) vyjde:

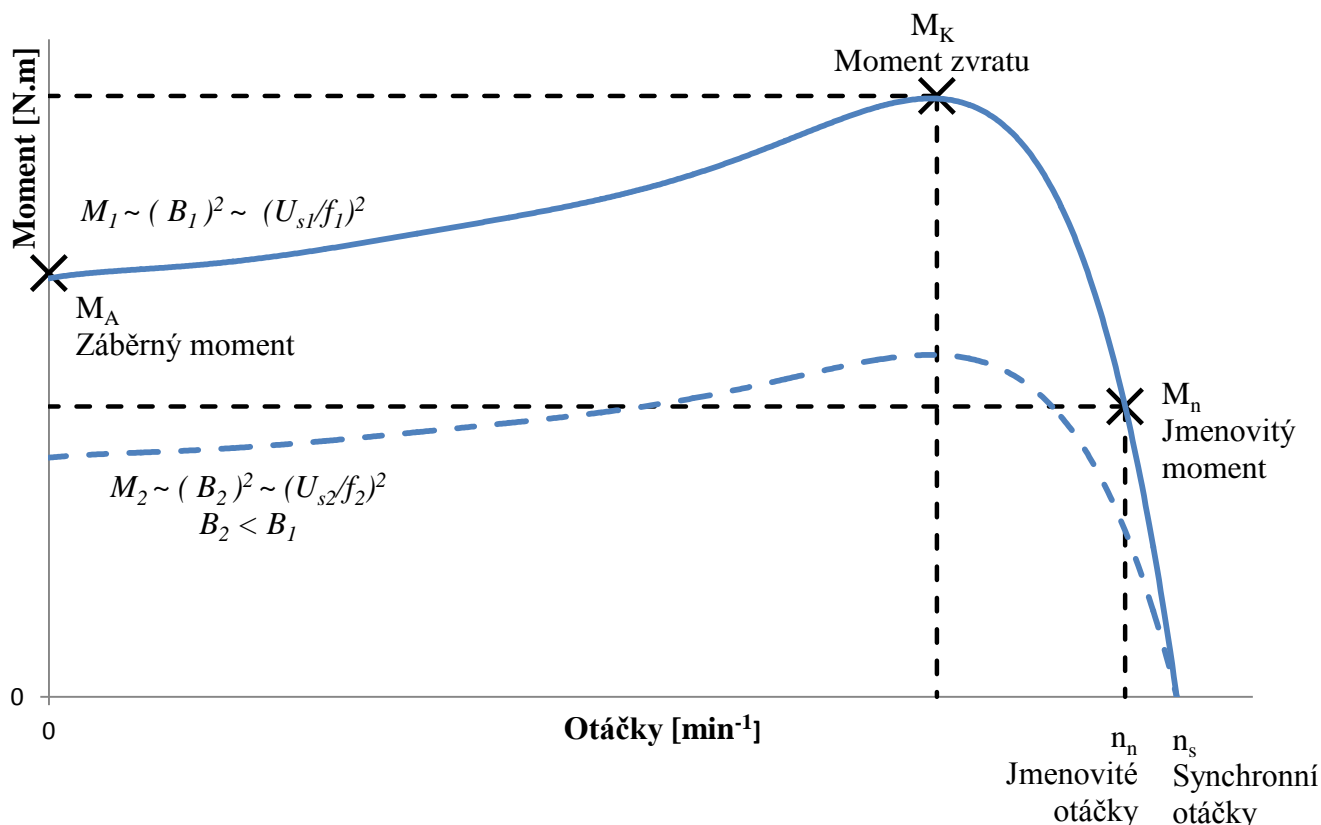
$$M \sim B_{s,max} \cdot \frac{B_{s,max} \cdot 2\pi \cdot f_{rot,el}}{f_{rot,el} \cdot L_\sigma} \sim B_{s,max}^2 \quad (1.29)$$

Z tohoto vztahu vidíme, že momentová charakteristika by měla být pro vyšší rotorové kmitočty téměř konstantní s velikostí úměrnou kvadrátu sycení, pokud bude konstantní i amplituda magnetické indukce. Avšak díky rostoucímu vzájemnému fázovému posunu napětí a proudu rotoru vlivem rostoucí rozptylové reaktance vykazuje závislost momentu na rotorovém kmitočtu lokální maximum (moment zvratu) a dále při růstu rotorového kmitočtu klesá. Výsledná závislost je na Obr. 1-5.

Ze závislosti momentu na rotorovém kmitočtu lze sekundárně odvodit známou momentově-otáčkovou charakteristiku motoru, platnou ovšem pouze za předpokladu konstantní amplitudy a kmitočtu napájecího napětí (obvykle síť 50 Hz), viz Obr. 1-6.



Obr. 1-5: Závislost momentu na hřídeli v závislosti na elektrickém kmitočtu rotoru



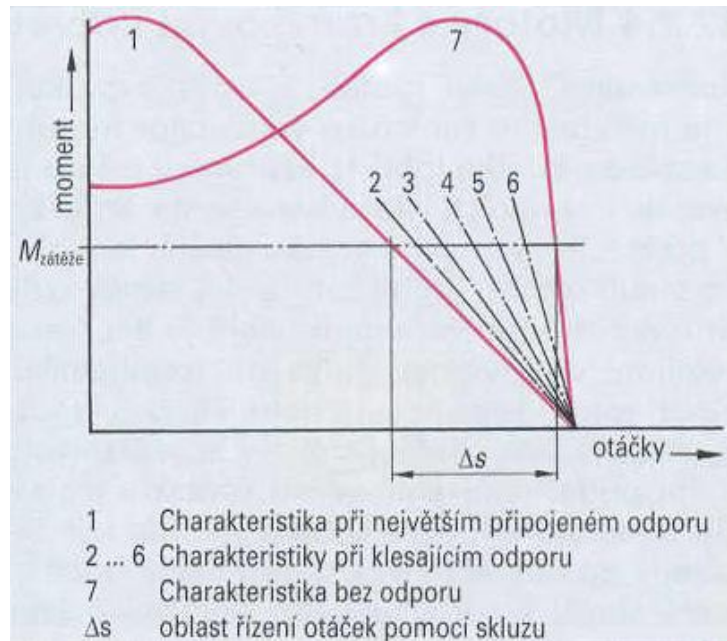
Obr. 1-6: Momentová charakteristika asynchronního motoru v závislosti na otáčkách rotoru

Regulaci výstupního momentu na hřídeli motoru můžeme provádět měničem, který je schopen měnit hodnotu frekvence napájecího napětí a zároveň udržovat konstantní sycení změnou amplitudy napájecího napětí (zachování poměru U_s/f).

Pokud budeme pracovat stále ve jmenovitém bodě z Obr. 1-5 tj. při konstantním rotorovém kmitočtu **nezávisle na otáčkách**, bude **moment stroje na otáčkách zcela nezávislý**. V tomto režimu musí měnič měřit otáčky rotoru a následně regulovat frekvenci napájecího napětí tak, aby rotorová frekvence byla konstantní.

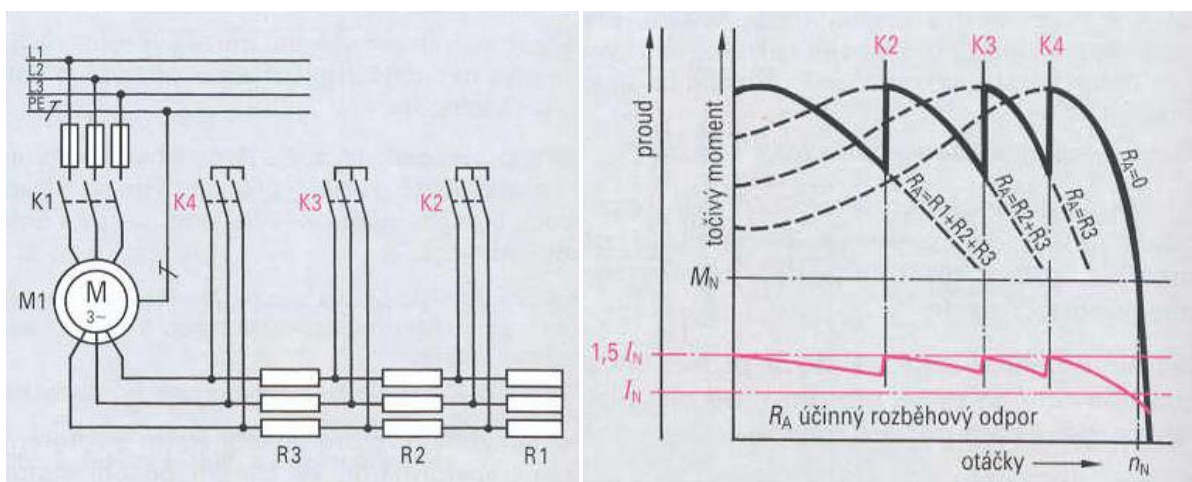
Řízení otáček můžeme provést i ztrátově, a to změnou velikostí odporů připojených na kroužcích rotoru. Tím se zvýší celkový odpor rotoru a tedy daného proudu rotoru (momentu) pak bude dosaženo až při větším napětí rotoru tedy při větším rotorovém kmitočtu – a tedy při nižších otáčkách rotoru. Toto provedení je ale pro dlouhodobé používání neekonomické, jelikož výkon motoru se zmenší o tepelné ztráty na odporech.

Výhoda ale spočívá v tom, že motor s kroužkovou kotvou a připojenými odpory dokáže vyvinout velký rozběhový moment při malém proudu (moment zvratu posunut k nulovým otáčkám tzn. vyšší záběrový moment a proud snížen odporem rotoru), takže může být spouštěn zatížený. Po rozběhnutí motoru jsou uhlíkové kartáče zvednuty, aby nedocházelo k opotřebení, a kroužky jsou zkratovány. Z Obr. 1-7 je zřejmé, že při zvyšování hodnoty odporu se momentová charakteristika posouvá vlevo, což má za následek větší kolísání otáček při změně zatížení, jelikož křivka s vyšším odporem není příliš strmá a naroste skluz.



Obr. 1-7: Řízení otáček motoru s kroužkovou kotvou připojením odporů (převzato z [1])

Pro plynulé rozbíhání motoru lze použít odporovou kaskádu, která napomáhá udržet velký rozběhový moment a malý odebíraný proud pro větší rozsah otáček. Toho je docíleno několika odpory, které jsou při rozběhu motoru připojeny na kroužky rotoru a při určitých otáčkách dochází k jejich postupnému odpojování. Výsledný průběh momentu a proudu můžeme vidět na Obr. 1-8.



Obr. 1-8 a Obr. 1-9: Regulace točivého momentu a rozběhového proudu motoru s kroužkovou kotvou třístupňovým rozběhovým odporem (převzato z [1])

1.4 Výkonové ztráty v motoru

Pro příkon motoru lze napsat:

$$P_1 = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) = 3 \cdot \frac{U_S}{\sqrt{3}} \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) \quad (1.30)$$

P_1 ... Příkon motoru [W]

A pro výkon motoru:

$$P_2 = M \cdot \omega = P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{j2} - \Delta P_{mech} - \Delta P_d \quad (1.31)$$

P_2 ... Výkon na hřídeli rotoru [W]

M ... Zatěžovací moment na hřídeli [N.m]

ω ... Úhlový kmitočet otáčení hřídele [rad/s]

ΔP_{j1} ... Jouleovy ztráty ve vinutí statoru [W]

ΔP_{j2} ... Jouleovy ztráty v rotoru [W]

ΔP_{Fe} ... Ztráty v železe [W]

ΔP_{mech} ... Mechanické ztráty (ventilace, tření,...) [W]

ΔP_d ... Dodatečné ztráty (např. vyšší harmonické) [W]

Ztráty na vinutí statoru jsou rovny součinu velikosti odporu fáze vinutí a kvadrátu efektivní hodnoty procházejícího proudu.

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_S \cdot I_f^2 \quad (1.32)$$

R_S ... Odpor fáze vinutí statoru [Ω]

I_f ... Proud statorového vinutí jednou fází (efektivní hodnota) [A]

Pro rotorové vinutí platí obdobný vztah, ale jelikož v našem případě bereme motor s kroužkovou kotvou, je třeba přičíst i odpory rezistorů připojených na kroužky.

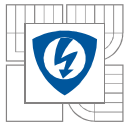
$$\Delta P_{j2} = 3 \cdot (R_{rot} + R_{kroužky}) \cdot I_{rot}^2 \quad (1.33)$$

$R_{kroužky}$... Odpor rezistorů připojených na kroužky [Ω]

Výkonové ztráty (skluzový výkon) ve vinutí rotoru můžeme také vyjádřit jako součin momentu na hřídeli a skluzového úhlového kmitočtu přepočítaného na mechanickou stranu (tj. musí se jednat o rozdíl úhlové rychlosti prostorového otáčení statorového pole a rotoru):

$$\Delta P_{j2} = M \cdot \frac{\omega_{rot,el}}{p} = M \cdot 2\pi \cdot \frac{f_{rot,el}}{p} \quad (1.34)$$

$\omega_{rot,el}$... Elektrický úhlový (skluzový) kmitočet rotoru [rad/s]



Ztráty v železe jsou dány součtem ztrát hysterézních a ztrát vířivými proudy:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v \quad (1.35)$$

ΔP_h ... Hysterézní ztráty v železe [W]

ΔP_v ... Ztráty v železe vířivými proudy [W]

Velikost hysterézních ztrát vychází z velikosti hysterézní křivky. Závisí také na čase jedné periody napájecího napětí, za kterou dojde k oběhnutí celé hysterézní smyčky dokola. Ztráty můžeme vyjádřit rovnicí[2]:

$$\Delta P_h = W \cdot f \sim B_{s,max}^2 \cdot f \sim \left(\frac{U_s}{f}\right)^2 \cdot f \sim \frac{U_s^2}{f} \quad (1.36)$$

W ... Energie potřebná k proběhnutí jedné periody střídavého magnetování (plocha uzavřená hysterézní křivkou [J])

Energie W je přímo úměrná kvadrátu sycení. Pokud budeme v režimu, kdy sycení je konstantní, můžeme vzorec upravit:

$$\Delta P_h \sim B_{s,max}^2 \cdot f \sim f \quad (1.37)$$

Můžeme vidět, že při konstantním sycení jsou hysterézní ztráty úměrné frekvenci napájecího napětí.

Bude-li naopak amplituda napájecího napětí konstantní, magnetická indukce pak bude nepřímo úměrná frekvenci (odbuzování) a pro hysterézní ztráty bude platit:

$$\Delta P_h \sim B_{s,max}^2 \cdot f \sim \frac{1}{f^2} \cdot f \sim \frac{1}{f} \quad (1.38)$$

Z těchto vztahů vidíme, že hysterézní ztráty jsou pro konstantní sycení úměrné frekvenci a pro konstantní amplitudu napájecího napětí nepřímo úměrné frekvenci napájecího napětí.

Pro ztráty vířivými proudy platí vztah[2]:

$$\Delta P_v = \frac{U_{ef}^2}{R_{ekv}} \sim U_{ef}^2 \quad (1.39)$$

U_{ef} ... Efektivní hodnota napětí [V]

R_{ekv} ... Ekvivalentní odpor zastupující ztráty vířivými proudy [Ω]

Pokud budeme uvažovat konstantní sycení, bude amplituda úměrná frekvenci napájecího napětí a vzorec můžeme upravit:

$$\Delta P_v \sim U_{ef}^2 \sim f^2 \quad (1.40)$$

Bude-li však motor odbuzován změnou frekvence při konstantní amplitudě napájecího napětí dostaneme, že vířivé ztráty budou mít konstantní hodnotu úměrnou druhé mocnině této amplitudy napětí.

$$\Delta P_v \sim U_{ef}^2 \sim konst. \quad (1.41)$$

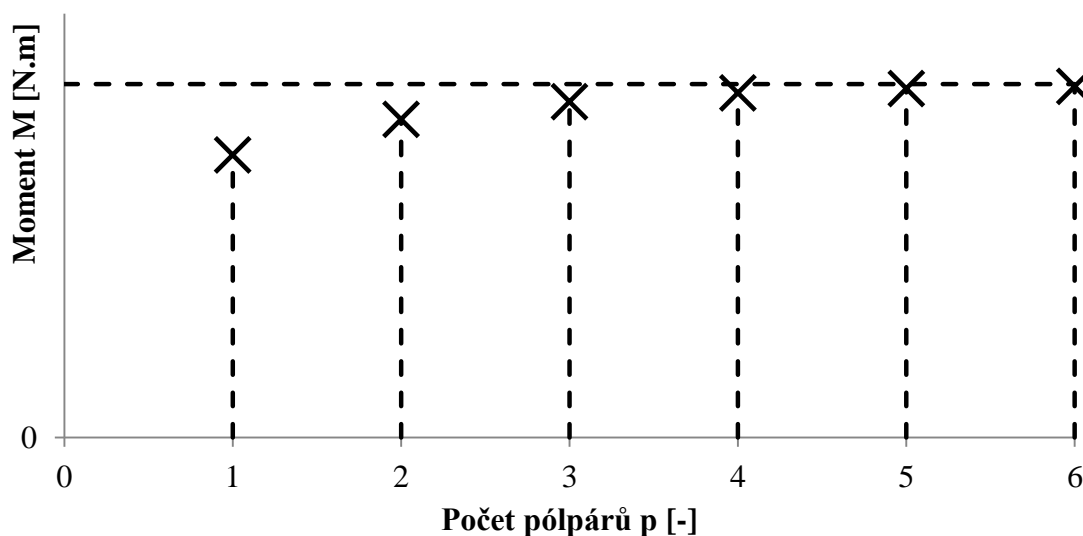
Pro ztráty vířivými proudy tedy platí, že při konstantním sycení jsou úměrné druhé mocnině frekvence napájecího napětí a pro odbuzovaný motor jsou konstantní – nezávislé na frekvenci (úměrné druhé mocnině amplitudy napájecího napětí).

1.5 Počet pólů stroje

Elektromagnetický a tepelný návrh stroje souvisí se jmenovitým momentem stroje.

- Určitého výkonu pak lze při daném jmenovitém momentu dosáhnout změnou otáček, tj. změnou frekvence (a napětí - při zachování sycení). Při možnosti měnit kmitočet odpadá tedy zdánlivá výhoda většího výkonu stroje s menším počtem pólů platná při klasickém síťovém napájení.
- Počet pólů nemá teoreticky vliv na poměr velikosti motoru ku jmenovitému momentu, pokud použijeme statorový paket stejných rozměrů. V praxi s rostoucím počtem pólů moment přesto poněkud roste (zvláště rozdíl mezi dvou- a čtyřpólovým strojem) a to díky lepšímu využití magnetického obvodu statoru.
- Rostoucí počet pólů při daném stejném výkonu a momentu znamená růst kmitočtu při stejném sycení. To představuje nárůst ztrát v železe statoru.

Při možnosti nastavit napájecí kmitočet měničem představuje volba počtu pólů technický kompromis mezi dosaženým momentem a ztrátami v železe a jeho řešením bývá obvykle použití čtyř- nebo šestipólového stroje (nejsou-li např. požadovány extrémně vysoké otáčky – pak by bylo nutno přistoupit na dvoupólový stroj, aby se zabránilo extrémním napájecím kmitočtům).



Obr. 1-10: Závislost jmenovitého momentu na počtu pólů stroje při použití stejného statorového paketu, stejné proudové hustoty a stejného činitele plnění drážek

1.6 Optimum účinnosti

Ztráty v motoru jsou funkcí skluzového kmitočtu a sycení. Na křivce závislosti účinnosti na skluzovém kmitočtu přitom existuje lokální minimum, jehož poloha se mění podle aktuálního momentu a otáček. Dále tuto skutečnost objasníme:

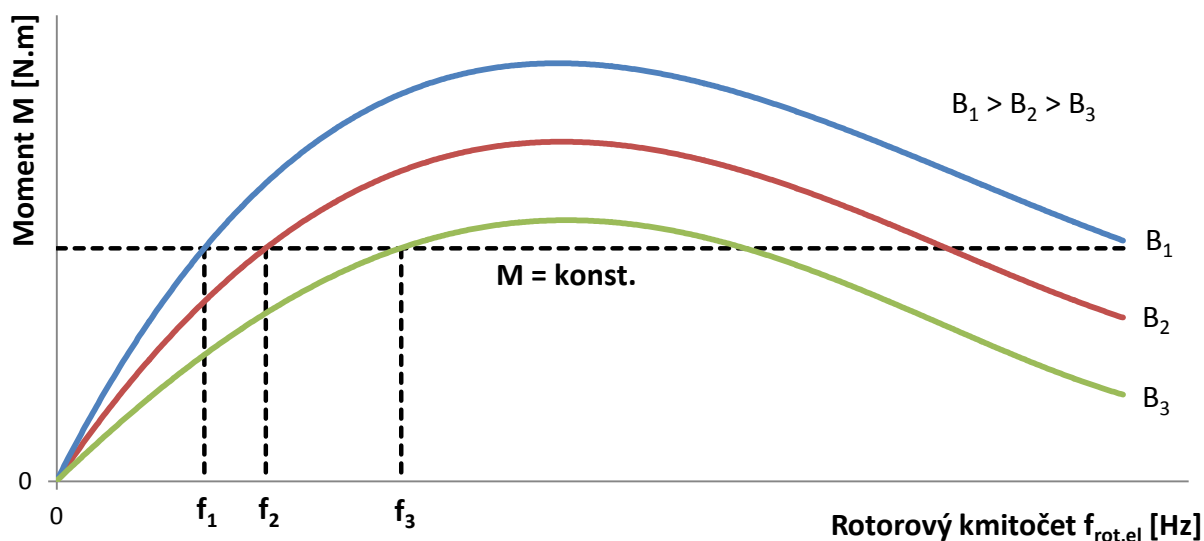
Nízké otáčky:

Při nízkých otáčkách bude satorový synchronní kmitočet jistě malý, a tedy ztráty v železe budou bez ohledu na velikost sycení nevýznamné.

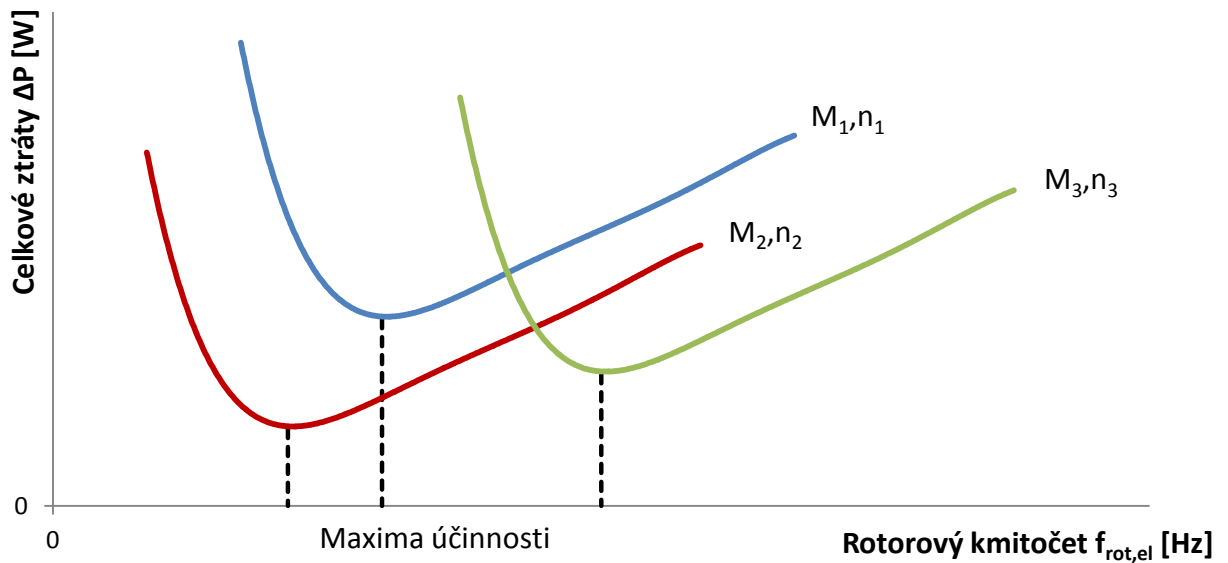
- Pokud je požadována menší hodnota momentu než jmenovitá, je vhodnější použít vyšší sycení a tedy malý skluzový kmitočet, abychom docílili malých ztrát v kleci rotoru, které při malých otáčkách dominují
- Při jmenovité hodnotě momentu je dobré stroj provozovat při jmenovitém sycení a skluzovém kmitočtu. Při použití malého skluzového kmitočtu ve snaze zredukovat ztráty v rotoru by hrozil velký nárůst magnetizačního proudu v důsledku potřeby velkého sycení.
- Momentové přetěžování stroje má za následek velké satorové ztráty vlivem magnetizačních proudů při vysokém sycení. Proto je dobré stroj více výrazně nepřesycovat a raději zvětšit skluzový kmitočet tak, aby byla docílena požadovaná hodnota momentu (tj. posunout se na charakteristice více k momentu zvratu).

Vysoké otáčky:

- Při nízkém momentu není vhodné volit jmenovité sycení, jelikož se výrazně projevují ztráty v železe. Je vhodnější poněkud stroj odsytit a zvýšit skluzový kmitočet – ztráty v rotoru sice vzrostou, ovšem v situaci s velkými otáčkami nebude jejich vliv významný.
- Pro velké momenty bude nutné sycení poněkud zvýšit.



Obr. 1-11: Závislost výsledného rotorového kmitočtu na velikosti sycení při konstantní zátěži



Obr. 1-12: Závislost celkových ztrát na rotorovém kmitočtu pro různé zatížení a otáčky

Z Obr. 1-11 můžeme vidět, že pokud navýšíme sycení při konstantním zatěžovacím momentu, klesá rotorový kmitočet. Tímto můžeme ovlivnit poměr ztrát v kleci rotoru a v železe a mědi statoru.

Obr. 1-12 ukazuje, že maximum účinnosti se pro různé hodnoty momentu a otáček vyskytuje při jiném rotorovém kmitočtu. Účinnost je nejvyšší v místě s nejmenšími celkovými ztrátami, kde nalevo od optima převažují ztráty v železe a mědi statoru. Napravo díky velkému rotorovému kmitočtu převažují ztráty v kleci rotoru. Je proto třeba pečlivě volit velikost sycení, jelikož při špatné hodnotě může účinnost výrazně klesat.

2 POPIS POROVNÁVANÝCH MOTORŮ



Obr. 2-1: Štítek motoru Klíma

Motor Klíma (rok výroby 1930) je trojfázový asynchronní motor s kroužkovou kotvou, vyroben tehdejší Brněnskou firmou Hubert Klíma a spol., která patřila ke známým předválečným podnikům vyrábějícím elektromotory pro pohon zemědělské techniky. Byl dodáván na převozním podvozku spolu s vypínačem, pojistkami a spouštěcím rotorovým reostatem. Hřídel byla osazena řemenicí pro dva průměry plochého koženého řemene.

Jeho provedení je otevřené a rotor neobsahuje ventilátor, takže vzduch volně proudí kolem čel vinutí. Mezi vnějším statorovým pakem a litinovým pláštěm motoru je mezera o tloušťce asi 2 cm, což zvyšuje celkový průměr stroje. Jelikož motor nemá nucenou ventilaci, je tato mezera poněkud zbytečná a navíc zabraňuje přestupu tepla vedením ze statorového paketu do pláště. Rotor je upevněn nezapouzdřenými kuličkovými ložisky v uzavřených domcích se Staufferovými maznicemi.

Ze štítku vidíme, že motor byl konstruován na starší napájecí síť, která distribuovala napětí 220/380V. Vzhledem k udaným otáčkám je jasné, že se jedná o čtyřpólový stroj ($p = 2$).

Motor EMP Slavkov (rok výroby 2012) typ TM2-100-4L B5 je standardní moderní asynchronní motor s kotvou nakrátko. Motor je v běžném uzavřeném provedení, kdy je statorový paket nalisován do hliníkového pláště s chladicími žebry a ten je ofukován ventilátorem rotoru. Rotorová klec je tvořena z hliníku.

Tab. 2-1: Štítkové parametry srovnávaných motorů

	Klíma 1930	EMP 2012
jmenovitý výkon	3 kW	3 kW
jmenovité otáčky	1400 ot/min	1445 ot/min
počet pólů	4	4
jmenovité satorové napětí	3x220 V / 50Hz Υ	3x 230 V / 50Hz Υ
jmenovitý fázový proud	6,6 A	6,6 A

Ze štítkových parametrů vidíme, že motory se liší jmenovitými otáčkami a napájecím napětím. Také jejich konstrukce je odlišná, jelikož historický motor Klíma má kroužkovou kotvu a motor EMP Slavkov má kotvu nakrátko (hliníková klec). Z rozměrů motorů již můžeme odhadnout, že ztráty v mědi budou vyšší u historického motoru Klíma.



Obrázek 2.1: Fotografie srovnávaných motorů – modrý EMP Slavkov a černý Klíma

3 RENOVACE MOTORU

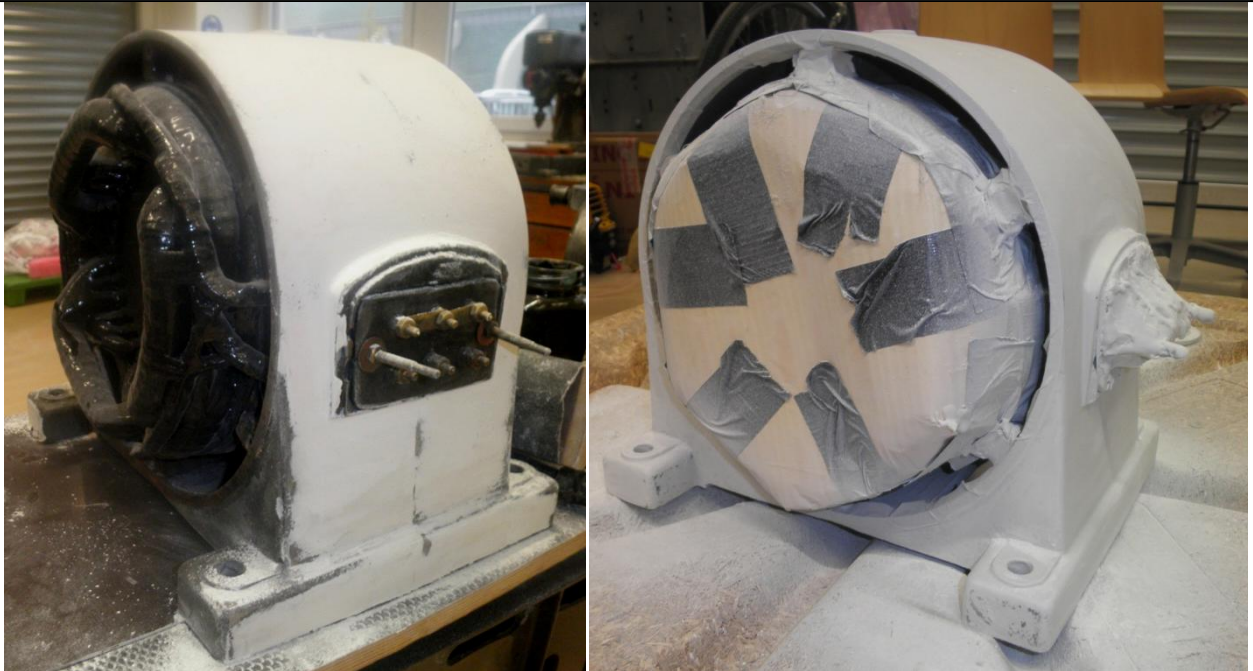
Po dlouhých letech nečinnosti byl motor ve špatném stavu a bylo jej třeba zrenovovat. Nejprve proběhlo jeho rozebrání a proměření kvůli možným svodům ve vinutí. Izolace vinutí je tvořena z textilního materiálu, a proto ji bylo třeba vysušit, jelikož vlhkost nasáknutá v textilií způsobovala svody. Vysoušení probíhalo průchodem proudu při napájení přibližně 80V (s vyjmutým rotorem - tedy s malou indukčností statoru neboli velkým magnetizačním proudem, jímž se vinutí ohřívalo). Jakmile vše uschlo, bylo provedeno vyfoukání a vyčištění vnitřního prostoru od prachu a nečistot. Poté se polyuretanovým lakem vinutí naimpregnovalo, aby se zabránilo dalšímu znečišťování a vlhnutí.

Ložiska byla vyčištěna od tuku, omyta benzínem a poté byl na ně nanesen nový tuk. Místo starého papírového těsnění ložisek bylo třeba vyrobit nové. Mosazné držáky, které slouží pro uchycení uhlíků, byly deoxidovány ve vodném roztoku kyseliny citrónové s přídavkem peroxidu vodíku. Samotné uhlíky poté byly také zbaveny povrchové oxidace. Povrch kroužků se nechal na soustruhu vybrousit kvůli hlubokým rýhám, které byly způsobeny dřívějším užíváním motoru. Na očištění šroubů, matek a podložek byl použit odrezovač a ocelový kartáč.



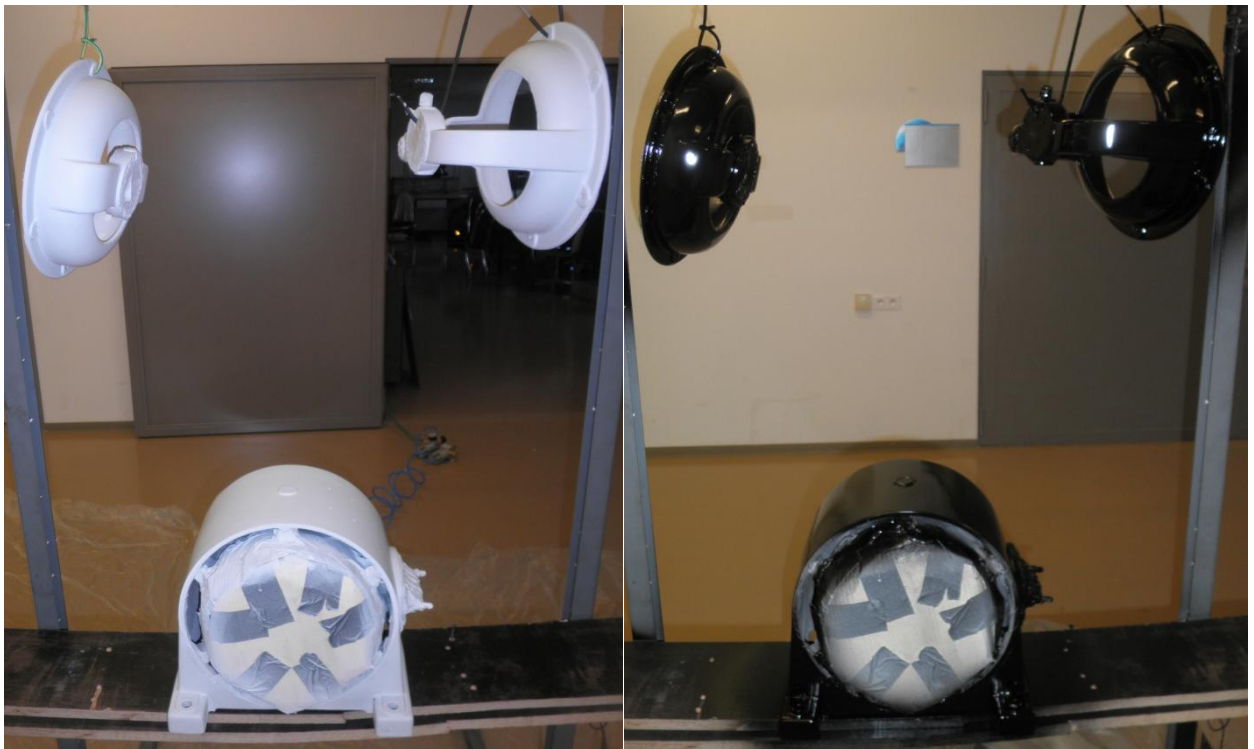
Obr. 3-1: Rotor se sběracími kroužky a mosazné držáky s uhlíky

Litínový kryt statoru, čela motoru a kryty ložisek byly nejprve očištěny vrtačkou s brusným kartáčem od hrubých nečistot, zbytků barvy a rzi. Poté bylo třeba ručním ocelovým kartáčem vyčistit špatně přístupná místa. Nakonec bylo třeba použít odrezovač a odmašťovač, aby byl vytvořen optimální povrch pro další ošetření a povrchové úpravy. Dráty ve svorkovnici byly nahrazeny, kvůli jejich špatnému stavu, novými.



Obr. 3-2 a Obr. 3-3: Litinový kryt po nanesení první (vlevo) a druhé (vpravo) vrstvy tmelu

Kvůli drsnosti a nerovnostem litinového povrchu bylo třeba nanést vrstvu stříkacího polyesterového tmelu. Ten se nechal zaschnout a následně byl vybroušen do hladka smirkovým papírem. Pro docílení velmi hladkého povrchu byla nanesena a vybroušena ještě jedna vrstva tmelu. Dalším krokem byl nástřik polyuretanové černé polomatné barvy.



Obr. 3-4 a Obr. 3-5: Litinové kryty před (vlevo) a po (vpravo) nástřiku barvy

Nerovnosti nanesené barvy byly vyhlazeny velmi jemným smirkovým papírem. Všechny součásti motoru byly poté složeny dohromady a motor byl připraven na měření.



Obr. 3-6: Složený motor na pracovišti pro měření odporů a indukčnosti

4 ANALÝZA PARAMETRŮ POROVNÁVANÝCH MOTORŮ

4.1 Ztráty v rotoru obou motorů

S pomocí štítkových údajů (viz Tab. 2-1) lze určit následující parametry obou motorů.

Jmenovitý rotorový (skluzový) elektrický kmitočet:

$$f_{rot,el} = f_n - \frac{n_n}{60} \cdot p \quad (4.1)$$

f_n ... Jmenovitá frekvence napájecího napětí [Hz]

n_n ... Jmenovité otáčky [min^{-1}]

Jmenovitý moment:

$$M_n = \frac{60 \cdot P_{2,n}}{2\pi \cdot n_n} \quad (4.2)$$

M_n ... Jmenovitý moment [N.m]

$P_{2,n}$... Jmenovitý výkon na hřídeli motoru [W]

Jmenovité ztráty v rotoru (rotor nakrátko):

$$\Delta P_{j2,n} = M_n \cdot \frac{\omega_{rot,el}}{p} \quad (4.3)$$

$\Delta P_{j2,n}$... Jmenovité ohmické ztráty v rotoru [W]

Tab. 4-1: Ohmické ztráty v rotoru

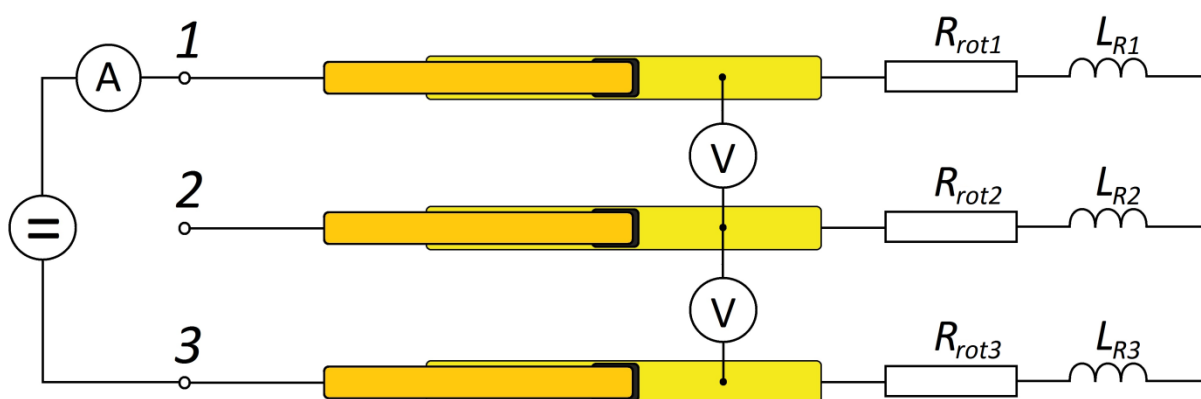
	Klíma 1930	EMP 2012
skluzový el. kmitočet [Hz]	3,3	1,8
jmenovitý moment [Nm]	20,5	19,8
ohmické ztráty v rotoru [W]	214	114

Výsledné hodnoty jsou zapsány pro srovnání do

Tab. 4-1. Vidíme, že motor Klíma má téměř 2x vyšší ztráty v rotoru, což je způsobeno nižším jmenovitým sycením, než má moderní ekvivalent.

4.2 Odpor rotorového vinutí kroužkového motoru Klíma

Hodnota odporu byla měřena Ohmovou metodou. Na dvě svorky rotoru byl připojen stejnosměrný zdroj o daném proudu. Jelikož je vinutí zapojeno do hvězdy, proud protékal dvěma vinutími sériově a voltmetrem bylo měřeno napětí na kroužcích vždy tak, že jedna svorka voltmetru byla připojena na počátek vinutí, kterým neprotékal proud a druhá svorka na začátek vinutí, kterým proud protékal. Tím bylo změřeno napětí přímo na jedné fázi vinutí.



Obr. 4-1: Schéma pro měření odporů rotorového vinutí

Indukčnosti vinutí se při měření neprojeví, jelikož vinutí napájíme stejnosměrným proudem.

V situaci na Obr. 4-1 odporem R_{rot2} neprotéká proud, nevzniká na něm úbytek a tím pádem voltmetr měří pouze napětí jednoho vinutí. Voltmetr byl připojován přímo na kroužky rotoru, abychom vyloučili zkreslení výsledků přechodovým odporem mezi uhlíkem a kroužkem.

Tab. 4-2: Naměřené a vypočtené hodnoty při měření odporů vinutí rotoru

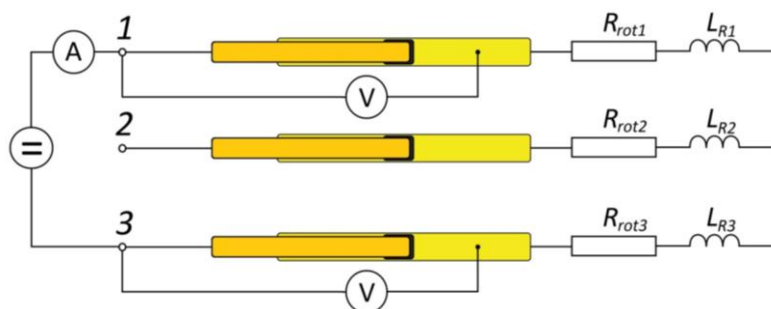
I	U_1	U_2	U_3	R_{rot1}	R_{rot2}	R_{rot3}
[A]	[V]	[V]	[V]	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]
20	1,5	1,5	1,5	75	75	75

$U_1, U_2, U_3 \dots$ Napětí na odporech vinutí rotoru [V]

$R_{rot1}, R_{rot2}, R_{rot3} \dots$ Odpory vinutí rotoru vypočtené ze změřených napětí a napájecího proudu [Ω]

4.3 Přechodový odpor na kroužcích motoru Klíma

Měření probíhá podobným způsobem jako při měření odporu vinutí. Na svorky připojíme stejnosměrný zdroj a měříme úbytek napětí přechodového odporu. Obvod byl napájen různými hodnotami proudu, abychom zjistili, jestli je hodnota přechodového odporu konstantní.



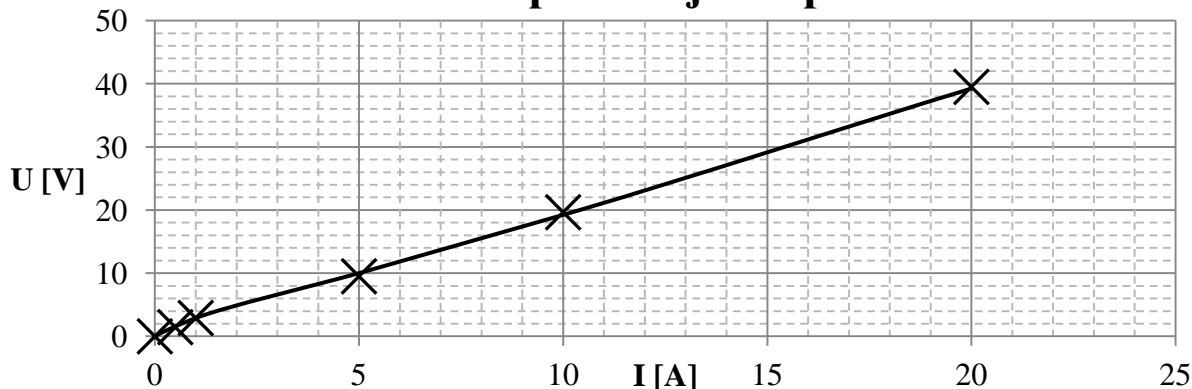
Obr. 4-2: Schéma pro měření přechodových odporů na kroužcích rotoru

Tab. 4-3: Naměřené a vypočtené hodnoty při měření přechodových odporů kroužků rotoru

I	U_{p2}	U_{p3}	R_{p2}	R_{p3}	$R_{p,avg}$
[A]	[mV]	[mV]	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]
20	36	43	1,8	2,2	2
10	17,5	21,8	1,8	2,2	2
5	10	9	2	1,8	1,9
1	2,2	3,6	2,2	3,6	2,9
0,5	1,1	1,8	2,2	3,6	2,9

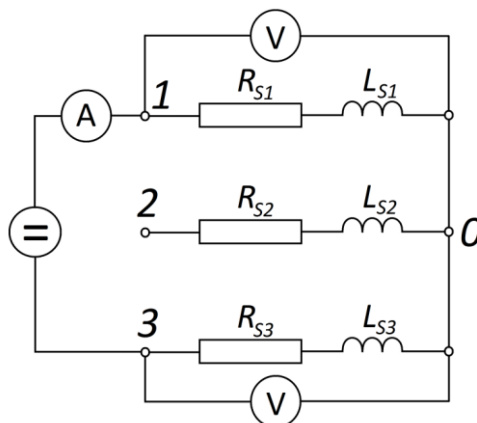
Z těchto naměřených hodnot vidíme, že přechodový odpor nemá stálou hodnotu a s klesajícím proudem narůstá, což je typická nelinearita odporu kluzného kontaktu. Také jsme zkusili roztáčet hřídel s kroužky při průchodu proudu vinutím a zjistili jsme, že napětí na přechodových odporech vzroste až na 2,5 násobek hodnoty v klidovém stavu motoru. Celkově je však přechodový odpor kluzných kontaktů zanedbatelný vůči odporu rotorového vinutí.

Napětí na přechodových odporech kroužků v závislosti na protékajícím proudu



Obr. 4-3: Velikosti napětí na přechodovém odporu kroužků v závislosti na procházejícím proudu

4.4 Odpor a ztráty statorového vinutí obou motorů



Obr. 4-4: Schéma zapojení pro měření odporů statorového vinutí

U obou motorů byly odpory měřeny za studena Ohmovou metodou. SS napájecí proud byl zvolen 5 A (efektivní hodnota jmenovitého proudu je 6,6 A).

Z naměřených odporů vinutí a ze štítkového údaje jmenovitého fázového proudu již lze vypočítat jmenovité ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{j1,n} = 3 \cdot R_s \cdot I_{f,n}^2 \quad (4.4)$$

$\Delta P_{j1,n}$... Jmenovité ztráty ve vinutí statoru [W]

R_s ... Odpor jedné fáze statorového vinutí [Ω]

$I_{f,n}$... Jmenovitý fázový proud ze štítku motoru [A]

Výsledky měření odporů a výpočtu ztrát udává Tab. 4-4.

Tab. 4-4: Srovnání odporů vinutí a ztrát motorů

	Klíma 1930	EMP 2012
Odpor fáze [Ω]	2,32	1,6
Ztráty ve vinutí statoru [W]	303	209

Ztráty ve statorovém vinutí má vyšší motor Klíma, což odpovídá předpokladům, jelikož má celkově větší rozměry a tím i větší objem mědi vinutí.

4.5 Mechanické ztráty obou motorů

Po vyvážení rotoru stroje Klíma (nutné kvůli lakování vinutí) bylo provedeno měření mechanických ztrát obou strojů na moderním dynamometru VUES. Ten zobrazuje digitálně hodnoty otáček i momentu.

Tab. 4-5: Naměřené mechanické + ventilační ztráty

	Klíma 1930	EMP 2012
mechanické + ventilační ztráty [W]	57,5	87

Vyšší hodnota mechanických ztrát moderního motoru byla způsobena částečně také nezaběhnutými ložisky, přítomností ventilátoru (na rozdíl od stroje Klíma) a rovněž přítomností gufer.

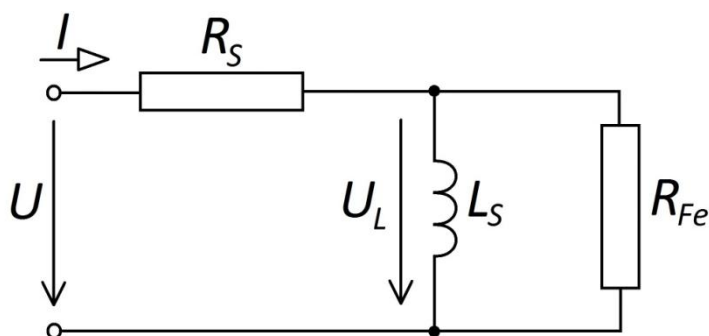
4.6 Ztráty v železe statoru obou motorů

Ztráty v železe byly měřeny při motoru v chodu naprázdno. Jelikož pak rotorem tečou jen minimální proudy, zanedbáme ztráty na rotorovém vinutí. Měříme příkon motoru P_1 , fázové napětí U a odebíraný fázový proud I . Pomocí (4.4) vypočteme ztráty ve vinutí statoru. Odečtením aktuálních ztrát ve vinutí statoru a již známých mechanických ztrát od příkonu získáme ztráty v železe.

$$\Delta P_{Fe} = P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{mech} \quad (4.5)$$

Provedeme-li toto měření pro různé hodnoty fázového napětí (motor napájíme z autotransformátoru), získáme závislost ztrát v železe na napětí při konstantním kmitočtu 50 Hz.

Vzhledem k tomu, že motor běží naprázdno, tedy s téměř synchronními otáčkami, zjednoduší se náhradní schéma motoru na zapojení podle Obr. 4-5.



Obr. 4-5: Náhradní schéma motoru při rozpojení svorek rotoru (jedna fáze)

Jelikož známe napětí a ztrátový výkon na odporu R_{Fe} , můžeme vypočítat jeho velikost pro všechny měřené hodnoty napájecího napětí. Velikost napětí U_L přitom můžeme uvažovat rovnou velikosti fázového napětí U .

$$\Delta P_{Fe} = 3 \cdot \frac{U_L^2}{R_{Fe}} = 3 \cdot \frac{U^2}{R_{Fe}} \quad (4.6)$$

$$R_{Fe} = 3 \cdot \frac{U^2}{\Delta P_{Fe}} \quad (4.7)$$

R_{Fe} ... Odpor charakterizující ztráty v železe motoru (jedné fáze) [Ω]

Tab. 4-6: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno s rotorem nakrátko – motor Klíma

U	I	P ₁	P _{mech}	ΔP_{j1}	ΔP_{Fe}	R _{Fe}
[V]	[A]	[W]	[W]	[W]	[W]	[Ω]
60	0,530	67	57,5	1,96	7,54	1431
90	0,612	76	57,5	2,61	15,89	1529
120	0,761	87	57,5	4,03	25,47	1696
140	0,876	94	57,5	5,34	31,16	1887
160	1,022	105	57,5	7,27	40,23	1909
180	1,169	111	57,5	9,51	43,99	2210
200	1,336	122	57,5	12,42	52,08	2304
210	1,425	131	57,5	14,13	59,37	2229
220	1,517	136	57,5	16,02	62,48	2324
230	1,621	145	57,5	18,29	69,21	2293
240	1,750	153	57,5	21,32	74,19	2329
250	1,846	163	57,5	23,72	81,78	2293

Tab. 4-7: Naměřené hodnoty napětí a proudu při zkoušce naprázdno – motor Slavkov

U	I
[V]	[A]
60	0,77
80	0,89
100	1,11
120	1,33
140	1,59
160	1,88
180	2,22
190	2,43
200	2,58
210	2,86
220	3,12
230	3,50
240	3,92
250	4,45

Tab. 4-8: Vypočtená hodnota odporu charakterizující ztráty v železe při zkoušce naprázdno pro jmenovitou hodnotu napájení – motor Slavkov

U	I	P ₁	P _{mech}	ΔP _{j1}	ΔP _{Fe}	R _{Fe}
[V]	[A]	[W]	[W]	[W]	[W]	[Ω]
230	3,5	257	87	58,8	111	1430

Tab. 4-9: Ztráty v železe při jmenovitém napájení

	Klíma 1930	EMP 2012
ztráty v železe [W]	62,5	111

Ztráty v železe u motoru EMP Slavkov 2012 byly vypočítány stejným postupem jako u historického modelu a při porovnání v Tab. 4-9 vidíme, že novodobý motor je má téměř 2x vyšší. To je zapříčiněno snahou o minimalizaci rozměrů moderního motoru - při jeho návrhu bylo požadováno co nejméně závitů, a proto bylo potřeba zvolit vyšší sycení. U starého modelu byla při návrhu použita nižší hodnota sycení a díky tomu má stroj více závitů, ale tím i větší rozměry.

4.7 Vlastní (magnetizační) indukčnost statorového vinutí

Měření vlastní indukčnosti statorového vinutí lze snadno provést opět při motoru v chodu naprázdno (rotor nakrátko, synchronní otáčky). Podle náhradního schématu z Obr. 4-5 si můžeme vyjádřit celkovou impedanci obvodu a z ní poté vyjádřit vlastní statorovou indukčnost L_S :

$$\bar{Z} = R_S + \frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_S}{R_{Fe} + j\omega L_S} = \frac{R_S \cdot R_{Fe} + R_S \cdot j\omega L_S + R_{Fe} \cdot j\omega L_S}{R_{Fe} + j\omega L_S} \quad (4.8)$$

$$\bar{Z} = \frac{R_S \cdot R_{Fe} + j\omega L_S \cdot (R_S + R_{Fe})}{R_{Fe} + j\omega L_S} \quad (4.9)$$

$$|\bar{Z}| = \frac{\sqrt{(R_S \cdot R_{Fe})^2 + [\omega L_S \cdot (R_S + R_{Fe})]^2}}{\sqrt{R_{Fe}^2 + (\omega L_S)^2}} \quad (4.10)$$

$$|\bar{Z}|^2 \cdot [R_{Fe}^2 + (\omega L_S)^2] = (R_S \cdot R_{Fe})^2 + [\omega L_S \cdot (R_S + R_{Fe})]^2 \quad (4.11)$$

$$|\bar{Z}|^2 \cdot R_{Fe}^2 + |\bar{Z}|^2 \cdot \omega^2 L_S^2 = (R_S \cdot R_{Fe})^2 + \omega^2 L_S^2 \cdot (R_S + R_{Fe})^2 \quad (4.12)$$

$$\omega^2 L_S^2 \cdot [|\bar{Z}|^2 - (R_S + R_{Fe})^2] = (R_S \cdot R_{Fe})^2 - |\bar{Z}|^2 \cdot R_{Fe}^2 \quad (4.13)$$

$$L_S^2 = \frac{(R_S \cdot R_{Fe})^2 - |\bar{Z}|^2 \cdot R_{Fe}^2}{[|\bar{Z}|^2 - (R_S + R_{Fe})^2] \cdot \omega^2} \quad (4.14)$$

Můžeme nahradit velikost celkové impedance jako podíl napájecího napětí U a vstupního proudu I :

$$L_S = \sqrt{\frac{R_S^2 \cdot R_{Fe}^2 - \left(\frac{U}{I}\right)^2 \cdot R_{Fe}^2}{\left[\left(\frac{U}{I}\right)^2 - (R_S + R_{Fe})^2\right] \cdot \omega^2}} = \sqrt{\frac{R_S^2 \cdot R_{Fe}^2 - \left(\frac{U}{I}\right)^2 \cdot R_{Fe}^2}{\left[\left(\frac{U}{I}\right)^2 - (R_S + R_{Fe})^2\right] \cdot (2\pi f)^2}} \quad (4.15)$$

Provedeme výpočet pro všechny velikosti napájecího napětí pro motor Klíma a výsledné hodnoty zapíšeme do Tab. 4-10.

Jelikož pro motor EMP Slavkov byla vypočítána hodnota odporu charakterizující ztráty v železe pouze pro jmenovitou hodnotu napájecího napětí, zanedbáme jej, jelikož jeho vliv při výpočtu indukčnosti je minimální. Pro motor Slavkov je proveden výpočet indukčnosti pro všechny měřené hodnoty napájecího napětí podle vzorce:

$$L_S = \frac{U}{I \cdot 2\pi \cdot f} \quad (4.16)$$

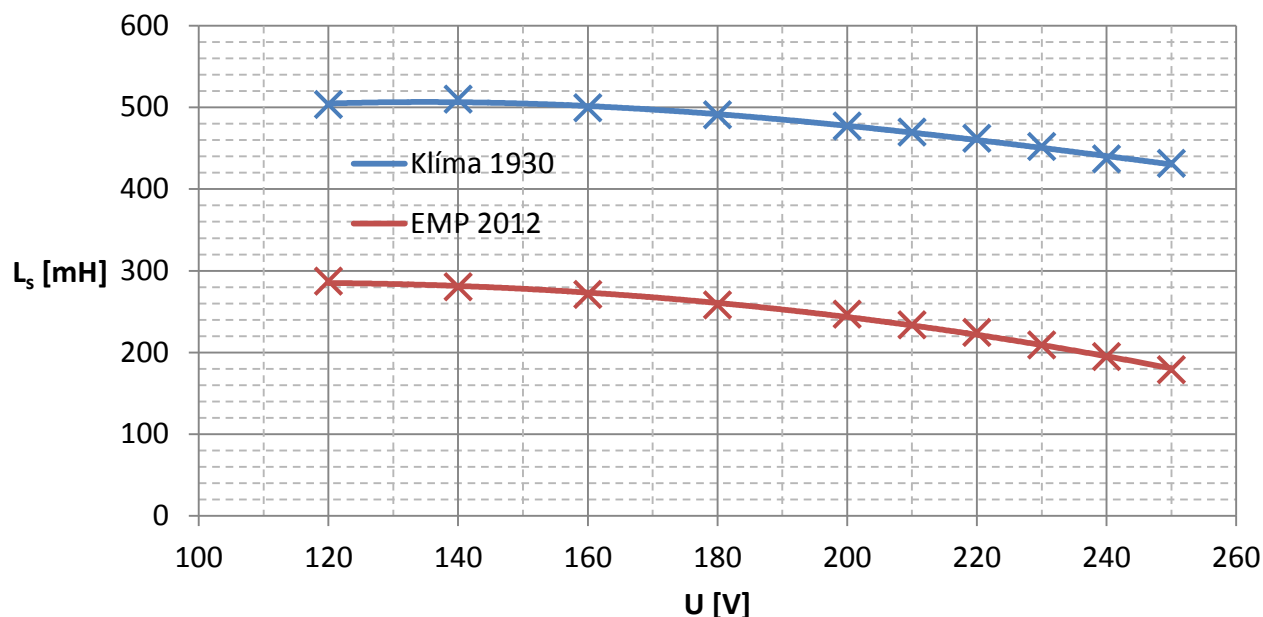
Zjištěné závislosti magnetizační indukčnosti na fázovém napětí pro oba srovnávané motory jsou na Obr. 4-6. Jelikož je tato indukčnost závislá na napájecím napětí (sycení železa) dá se předpokládat, že s rostoucím napětím se zvýší magnetický tok a tím indukčnost klesne.

Tab. 4-10: Magnetizační indukčnosti motorů při různých hodnotách fázového napětí

	Klíma 1930	EMP 2012
U	L_S	L_S
[V]	[mH]	[mH]
60	361	248
80	450	286
100	471	287
120	503	287
140	510	280
160	499	271
180	491	258
200	477	247
210	470	234
220	462	224
230	452	209
240	437	195
250	431	179

Z Tab. 4-10 vidíme, že první tři hodnoty magnetizační indukčnosti nevycházejí podle předpokladů. To je pravděpodobně způsobeno nesynchronními otáčkami při tomto nízkém napájecím napětí. Tím vznikaly na rotoru výkonové ztráty zkreslující měření, jelikož původní předpoklad byl takový, že rotorové ztráty zanedbáme. Proto tyto tři hodnoty pro napětí 60-100V do grafu nebudou vyneseny.

Srovnání magnetizačních indukčností motorů v závislosti na fázovém napětí

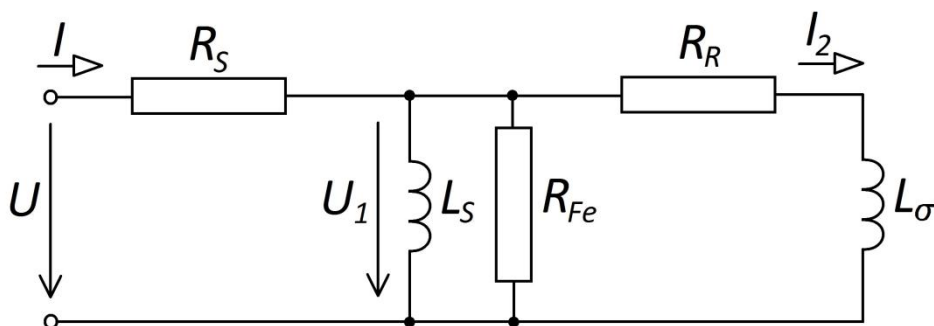


Obr. 4-6: Srovnání magnetizačních indukčností motorů v závislosti na velikosti fázového napětí

Na Obr. 4-6 můžeme vidět, že moderní motor má přibližně poloviční magnetizační indukčnost a s rostoucím napětím indukčnost rychleji klesá než u historického modelu. Rozdíl velikosti magnetizační indukčnosti historického a novodobého motoru je poměrně značný (na měřeném napětíovém rozsahu průměrně 235mH).

4.8 Měření rozptylové indukčnosti a rotorového odporu

Měření je prováděno ve stavu nakrátko, kdy hřídel je zabrzděna. Stator je napájen napětím 60 V u historického, 57,5 V u moderního stroje a je prováděno měření činné P_1 a zdánlivé Q_1 složky příkonu. Činný příkon je v obvodu rozdělen mezi všemi odpory a jalový příkon mezi indukčnostmi, díky čemuž je možno dopočítat neznámou rozptylovou indukčnost a rotorový odpor. Napětí a proud jsou měřeny pro jednu fázi, příkony pak jako součet všech tří fází. Následující výpočty jsou pro jednofázový model stroje.



Obr. 4-7: Náhradní schéma jedné fáze motoru při měření rozptylové indukčnosti

Nejprve je potřeba vypočítat úhel fázového posunu napětí vůči proudu:

$$P_1 = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) = S_1 \cdot \cos(\varphi) \quad (4.17)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{P_1}{S_1}\right) \quad (4.18)$$

Dále je možno určit napětí na příčné větvi tak, že odečteme fázor napětí statorového vinutí od fázoru napájecího napětí.

$$\bar{U}_1 = \bar{U} - R_S \cdot \bar{I} \quad (4.19)$$

$$U_1 = \sqrt{U^2 + (R_S \cdot I)^2 - 2 \cdot U \cdot R_S \cdot I \cdot \cos(\varphi)} \quad (4.20)$$

Odpor charakterizující ztráty v železe 1431 Ω a velikost magnetizační indukčnosti 361 mH získáme pro motor Klíma z Tab. 4-6 a Tab. 4-10 pro napětí 60 V. Jelikož u moderního stroje EMP Slavkov nebyly tyto hodnoty pro napájecí napětí 57,5 V vypočítány, budeme počítat se jmenovitou hodnotou 1430 Ω a 209 mH z Tab. 4-8 a Tab. 4-10. Nyní mohou být vypočítány činné ztráty na odporu R_R pro jednu fázi.

$$P_1 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + 3 \cdot P_{RR} \quad (4.21)$$

$$P_{RR} = \frac{P_1}{3} - \frac{U_1^2}{R_{Fe}} - I_1^2 \cdot R_S \quad (4.22)$$

Vypočítáme jalový výkon na indukčnosti L_S a rozptylové indukčnosti L_σ .

$$Q_{L_S} = \frac{U_1^2}{\omega \cdot L_S} \quad (4.23)$$

$$Q_{L_\sigma} = \frac{Q_1}{3} - Q_{L_S} \quad (4.24)$$

Provedeme výpočet celkového zdánlivého výkonu a proudu v rotorové větvi.

$$S_{L_\sigma+R_R} = \sqrt{P_{R_R}^2 + Q_{L_\sigma}^2} \quad (4.25)$$

$$I_2 = \frac{S_{L_\sigma+R_R}}{U_1} \quad (4.26)$$

$S_{L_\sigma+R_R}$... Celkový zdánlivý výkon na sekundární (rotorové) větvi motoru [VA]

Z těchto vypočtených hodnot můžeme nyní určit velikost odporu R_R a rozptylové indukčnosti L_σ .

$$R_R = \frac{P_{R_R}}{I_2^2} \quad (4.27)$$

$$L_\sigma = \frac{Q_{L_\sigma}}{\omega \cdot I_2^2} \quad (4.28)$$

R_R ... Odpor fáze rotoru [Ω]

L_σ ... Rozptylová indukčnost jedné fáze [H]

Tab. 4-11: Naměřené a vypočtené hodnoty motoru Klíma pro napájecí napětí 60V

U	I	P ₁	S ₁	Q ₁	φ	U ₁	R _{Fe}	P _{RR}	Q _{LS}	Q _{Lσ}	S _{Lσ+RR}	I ₂	R _R	L _{σ}
[V]	[A]	[W]	[VA]	[VAr]	[°]	[V]	[Ω]	[W]	[VAr]	[VAr]	[VA]	[A]	[Ω]	[mH]
60	4,3	243	774	735	71,7	57,7	1431	36	29	216	219	3,8	2,5	48

Tab. 4-12: Naměřené a vypočtené hodnoty motoru EMP Slavkov pro napájecí napětí 57,5V

U	I	P ₁	S ₁	Q ₁	φ	U ₁	R _{Fe}	P _{RR}	Q _{LS}	Q _{Lσ}	S _{Lσ+RR}	I ₂	R _R	L _{σ}
[V]	[A]	[W]	[VA]	[VAr]	[°]	[V]	[Ω]	[W]	[VAr]	[VAr]	[VA]	[A]	[Ω]	[mH]
57,5	7,73	786	1337	1082	54,0	51,2	1430	165	40	321	360	7,0	3,3	21

V tabulkách Tab. 4-11 a Tab. 4-12 můžeme vidět, že moderní motor má poloviční rozptylovou indukčnost oproti historickému modelu. To může být způsobeno konstrukčním uspořádáním magnetického obvodu a také vyšším sycením.

Je třeba také dodat, že při tomto testu, kdy je hřídel zabrzděna, je velikost rotorového kmitočtu maximální - rovna kmitočtu statorovému. U motoru s klecovým vinutím se může objevit skin efekt na rozdíl od vinutého rotoru, a proto by mohl být rotorový odpor u motoru Slavkov při jmenovitém provozu nižší než vypočtená hodnota.

4.9 Výpočet účinníku motoru a účinnosti při jmenovitém chodu

Jmenovitý účinník pro motor Klíma 1930 lze vypočítat ze štítkových (jmenovitých) hodnot fázového napětí, proudu a příkonu stroje (tj. součet štítkového výkonu a všech vypočtených a naměřených ztrát). Účinník motoru EMP Slavkov 2012 udává výrobce v katalogu 0,77.

$$\Delta P_n = \Delta P_{j1,n} + \Delta P_{j2,n} + \Delta P_{mech,n} + \Delta P_{Fe,n} \quad (4.29)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P_{1,n}}{3 \cdot U_{f,n} \cdot I_{f,n}} = \frac{P_{2,n} + \Delta P_n}{3 \cdot U_{f,n} \cdot I_{f,n}} \quad (4.30)$$

$U_{f,n}$... Jmenovité fázové napětí ze štítku motoru [V]

ΔP_n ... Jmenovité celkové ztráty stroje [W]

$P_{2,n}$... Jmenovitý příkon motoru [W]

Teoretická účinnost při jmenovitém chodu pro motor Klíma 1930 může být spočítána, jako podíl jmenovitého výkonu a příkonu (součet jmenovitého výkonu a celkových ztrát při jmenovitém napájení). Motor EMP 2012 má udávanou účinnost kategorie IE2, což by pro 3 kW motor mělo být přibližně 86 %. Aby však nebylo třeba účinnost odhadovat, spočítáme ji stejným způsobem jako u motoru Klíma.

$$\eta = \frac{P_{2,n}}{P_{1,n}} \cdot 100\% = \frac{P_{2,n}}{P_{2,n} + \Delta P} \cdot 100\% \quad (4.31)$$

Tab. 4-13: Účinník a účinnost motorů při jmenovitém zatížení

	ΔP_n	$\cos(\varphi)$	η
	[W]	[-]	[%]
Klíma 1930	637	0,835	82,5
EMP 2012	521	0,77	85,2

Z Tab. 4-13 vidíme, že historický motor Klíma 1930 má o 116 W vyšší celkové ztráty, ale výrazně lepší účinník oproti novodobému modelu. Teoretickou účinnost vypočtenou ze štítkových parametrů má naopak historický model nižší o 2,7 % oproti modernímu.

4.10 Měření závislosti účinnosti na výkonu

Na dynamometru bylo provedeno měření výkonu a příkonu pro různé hodnoty zatěžovacího momentu při konstantním jmenovitém napájecím napětí. Z nich pak byla vypočítána a vynesena do grafu účinnost.

Tab. 4-14: Naměřené veličiny při zatěžování momentem od 2 do 20 Nm – Klíma 1930

M	U	I	P ₁	S	n	P ₂	η
[N.m]	[V]	[A]	[W]	[VA]	[min ⁻¹]	[W]	[%]
2	220	1,675	461	1106	1490	312	67,7
4	220	1,958	785	1296	1481	602	76,7
6	220	2,348	1184	1550	1473	964	81,4
8	220	2,811	1459	1855	1465	1233	84,5
10	220	3,320	1805	2189	1457	1526	84,5
12	220	3,875	2161	2556	1449	1822	84,3
14	220	4,503	2543	2969	1439	2119	83,3
16	220	5,154	2937	3428	1427	2396	81,6
18	220	5,923	3357	3914	1415	2670	79,5
20	220	6,717	3780	4437	1400	2936	77,7

Tab. 4-15: Naměřené veličiny při zatěžování momentem od 2 do 20 Nm – EMP 2012

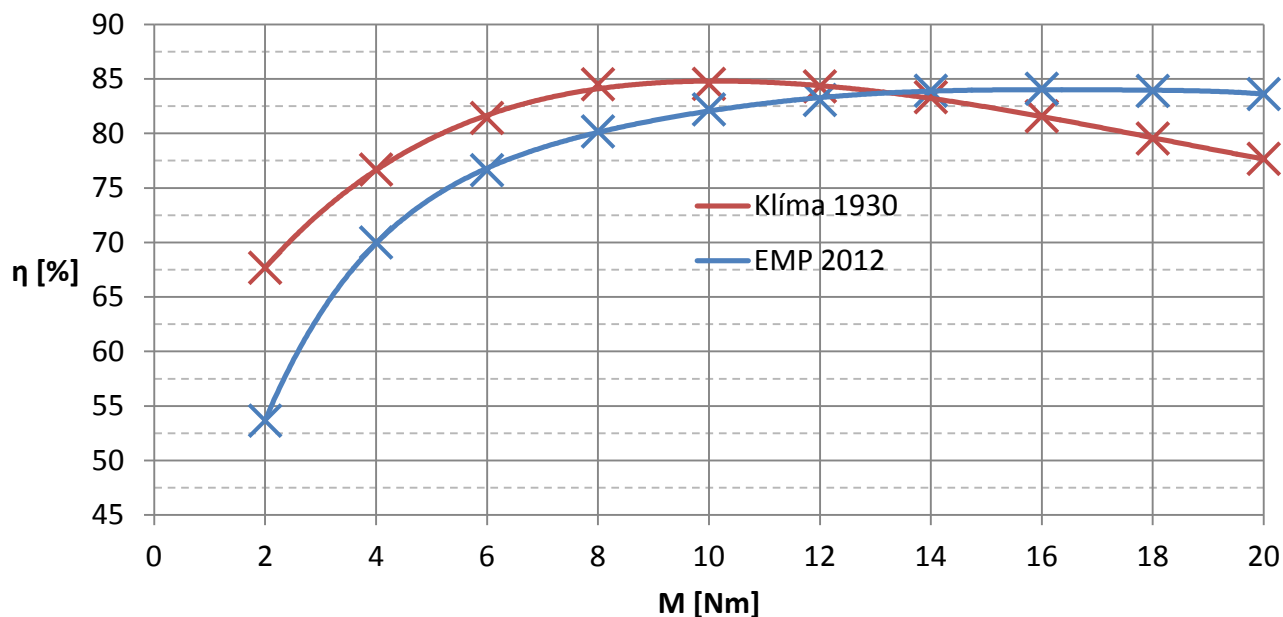
M	U	I	P ₁	Q ₁	n	P ₂	η
[N.m]	[V]	[A]	[W]	[VA]	[min ⁻¹]	[W]	[%]
2	230	3,600	574	2,43	1491	308	53,7
4	230	3,730	890	2,43	1485	623	70,0
6	230	3,910	1211	2,43	1478	928	76,6
8	230	4,158	1534	2,43	1471	1230	80,2
10	230	4,450	1860	2,43	1464	1529	82,2
12	230	4,790	2197	2,47	1456	1825	83,1
14	230	5,171	2524	2,52	1449	2118	83,9
16	230	5,582	2861	2,56	1442	2406	84,1
18	230	6,023	3205	2,63	1433	2689	83,9
20	230	6,500	3552	2,70	1424	2970	83,6

Výpočet účinnosti:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (4.32)$$

Z Tab. 4-15 vidíme, že pro zatěžovací moment 20 Nm má motor Slavkov 1424 otáček za minutu kdežto podle štítku by měl mít 1445 min⁻¹. To znamená, že reálné ztráty (159 W podle (4.3)) v rotoru jsou vyšší než vypočítané ze štítkových údajů 114 W (Tab. 4-1). U historického motoru se otáčky shodují se štítkovým údajem.

Závislost účinnosti na výkonu



Obr. 4-8: Závislost účinnosti motorů na momentu (výkonu)

Z Obr. 4-8 vidíme, že maxima účinností motorů nejsou v jejich jmenovitých hodnotách momentů.

Moderní motor má nejvyšší účinnost 84 % při zatížení 17,6 Nm, což je nepatrně nižší hodnota než jmenovitá. Při malých momentech však účinnost moderního stroje rychle klesá díky velkému sycení, jelikož má větší ztráty v železe, menší magnetizační indukčnost a tím také vyšší magnetizační proud. Při poklesu momentu dochází k snižování činné složky proudu, avšak jalová složka klesá pomalu a proto má motor malou účinnost díky velkým ztrátám ve vinutí statoru.

Na druhou stranu starý motor má maximum účinnosti 85 % při 10,2 Nm, což je přibližně hodnota polovičního zatížení. Jelikož má malé ztráty v železe a malý magnetizační proud (díky nízkému sycení), dochází při poklesu momentu ze jmenovité hodnoty k výraznému snížení celkového fázového proudu a tím i ztrát v mědi. Díky malým ztrátám v železe a snížení ztrát v mědi dochází k růstu účinnosti až do maxima 10,2 Nm a poté pozvolně klesá.

Historický stroj má tedy vyšší účinnost než novodobý při malém zatížení (do 13 Nm), ale při zatížení jmenovitým momentem má podstatně horší účinnost. To je pravděpodobně dáno tím, že moderní stroj je optimalizován na chod se jmenovitými parametry a při jeho konstrukci byla snaha o minimalizaci rozměrů.

4.11 Měření účinnosti v závislosti na velikosti napájecího napětí

Nejprve bylo provedeno měření pro konstantní zatěžovací moment 5 N.m a napájecí frekvenci 50 Hz. Poté byl motor zatěžován jmenovitým momentem 20 N.m. Účinnost byla vypočítána podle vzorce (4.32) jako podíl výkonu a příkonu.

Tab. 4-16: Naměřené veličiny motoru Klíma při zatěžování momentem 5 N.m

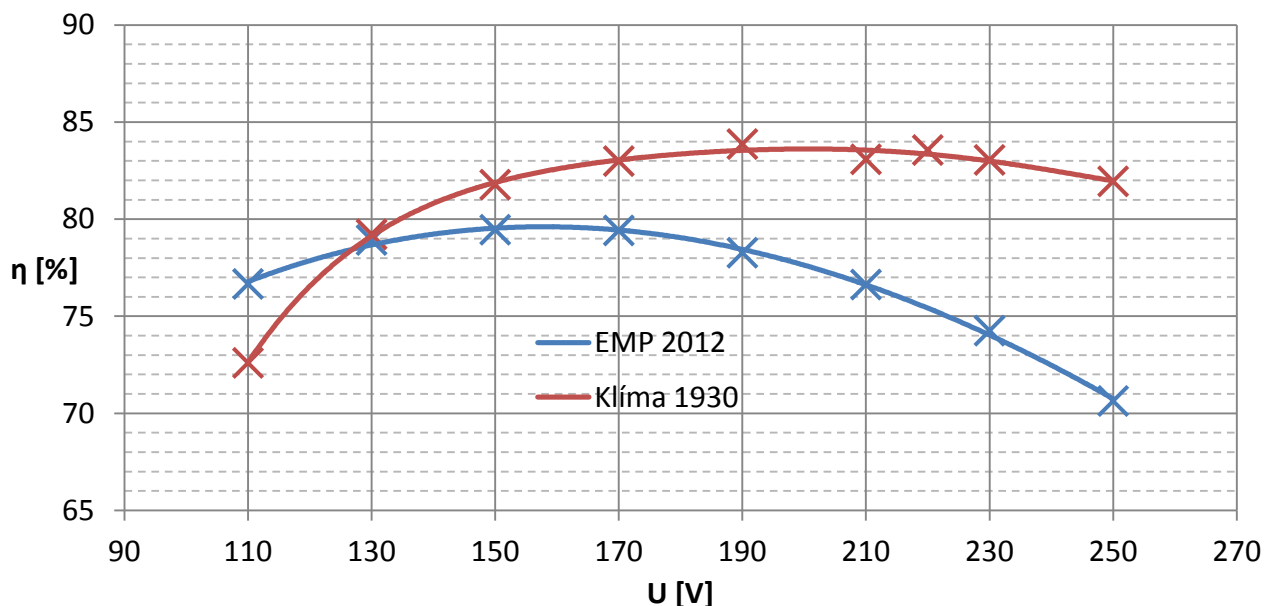
M	U	I	P ₁	S	n	P ₂	η
[N.m]	[V]	[A]	[W]	[VA]	[min ⁻¹]	[W]	[%]
5	110	3,576	1000	1180	1386	726	72,6
5	120	3,052	963	1108	1417	742	77,1
5	130	2,772	948	1085	1434	751	79,2
5	140	2,567	939	1083	1445	761	81,0
5	150	2,411	933	1091	1454	763	81,8
5	160	2,309	931	1109	1459	764	82,1
5	170	2,218	929	1137	1465	771	83,0
5	180	2,168	929	1169	1469	773	83,2
5	190	2,129	930	1215	1472	780	83,9
5	200	2,111	933	1264	1475	780	83,6
5	210	2,11	940	1336	1478	781	83,1
5	220	2,129	943	1412	1480	788	83,6
5	230	2,162	950	1491	1481	789	83,1
5	240	2,21	956	1590	1482	790	82,6
5	250	2,276	964	1705	1483	790	82,0

Tab. 4-17: Naměřené veličiny motoru EMP Slavkov při zatěžování momentem 5 N.m

M	U	P ₁	P ₂	n	η
[N.m]	[V]	[W]	[W]	[min ⁻¹]	[%]
5	110	960	736	1408	76,7
5	130	954	753	1437	78,9
5	150	959	762	1454	79,5
5	170	967	768	1465	79,4
5	190	985	771	1472	78,3
5	210	1010	774	1477	76,6
5	230	1045	776	1481	74,3
5	250	1100	777	1483	70,6

Pro srovnání účinností stroje Klíma 1930 s novodobým motorem EMP Slavkov 2012 byly změřené závislosti účinnosti na velikosti napájecího napětí při konstantní hodnotě zatěžovacího momentu vyneseny do Obr. 4-9 a Obr. 4-10.

Srovnání účinností motorů při konstantním momentu 5 Nm v závislosti na amplitudě napájecího napětí



Obr. 4-9: Závislost účinnosti motorů Klíma 1930 a EMP 2012 na velikosti napájecího napětí při konstantním zatěžovacím momentu 5Nm

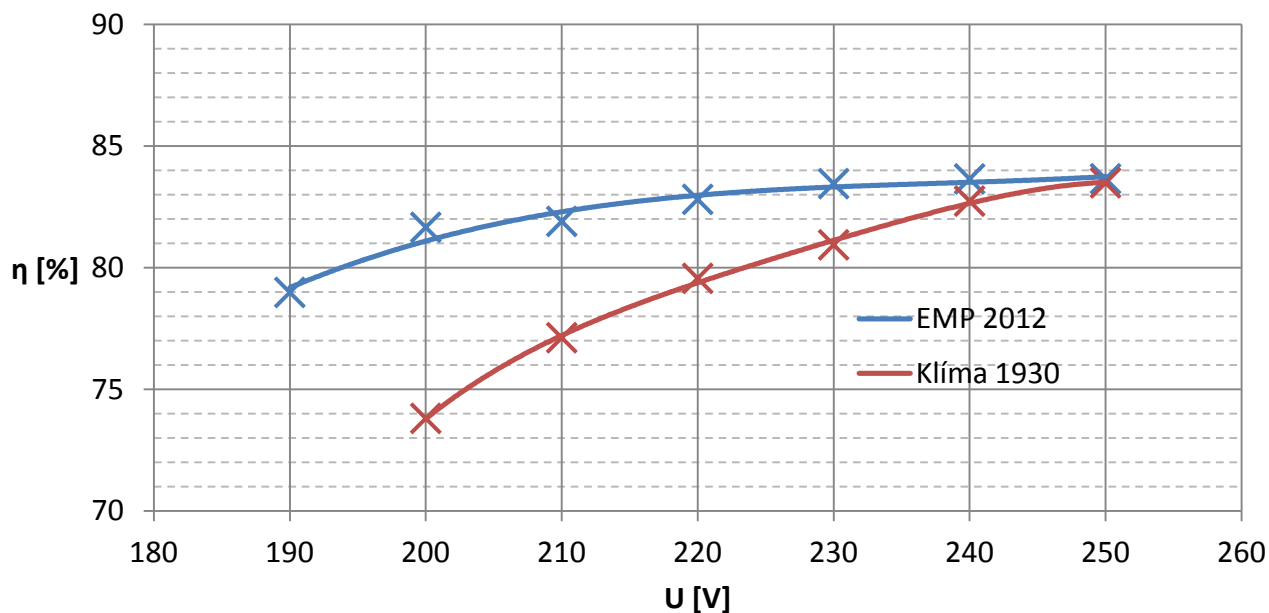
Tab. 4-18: Naměřené veličiny motoru Klíma při zatěžování momentem 20 N.m

M	U	I	P ₁	S	n	P ₂	η
[N.m]	[V]	[A]	[W]	[VA]	[min ⁻¹]	[W]	[%]
20	200	7,953	3849	4769	1353	2841	73,8
20	210	7,053	3773	4468	1386	2910	77,1
20	220	6,538	3700	2329	1402	2944	79,6
20	230	6,180	3658	4263	1413	2961	80,9
20	240	5,848	3616	4218	1423	2992	82,7
20	250	5,612	3593	4214	1430	3000	83,5

Tab. 4-19: Naměřené veličiny motoru EMP Slavkov při zatěžování momentem 20 N.m

M	U	P ₁	P ₂	n	η
[N.m]	[V]	[W]	[W]	[min ⁻¹]	[%]
20	190	3622	2861	1372	79,0
20	200	3540	2891	1339	81,7
20	210	3571	2925	1407	81,9
20	220	3561	2949	1413	82,8
20	230	3555	2967	1422	83,5
20	240	3567	2984	1435	83,7
20	250	3580	2995	1435	83,7

Srovnání účinností motorů při jmenovitém momentu 20 Nm v závislosti na amplitudě napájecího napětí



Obr. 4-10: Závislost účinnosti motorů Klíma 1930 a EMP 2012 na velikosti napájecího napětí při konstantním zatěžovacím jmenovitém momentu 20Nm

Z grafů vidíme, že účinnost vykazuje lokální maximum. Při zvyšování amplitudy napájecího napětí při stejném kmitočtu dochází ke zvýšení sycení a tím se zvyšují ztráty v železe a magnetizační proud. Ztráty v rotoru se naopak snižují, jelikož při zvýšení sycení je potřeba menší rotorový proud pro udržení daného momentu, menší indukované napětí a tím i menší skluzový kmitočet. Průběh celkového satorového proudu však nelze s jistotou určit, jelikož s rostoucím napětím klesá činný proud, ale dochází k přesycování, poklesu magnetizační indukčnosti a tím i zvyšování jalového proudu. Každá hodnota momentu má právě jednu kombinaci sycení a skluzového kmitočtu, při které jsou ztráty minimální, a účinnost vykazuje lokální maximum.

U malých hodnot momentů je lepší volit menší sycení, aby byly sníženy ztráty v železe satoru. Zvýšení skluzového kmitočtu bude minimální a proto i rotorové ztráty budou oproti ztrátám ve satoru velmi malé.

Pro velké hodnoty momentů bude výhodnější zvolit vyšší sycení s ohledem na míru přesycení, aby rotorový skluzový kmitočet (rotorové ztráty) nebyl velký. Při velkém sycení by vzrostly ztráty v železe a magnetizační proud, který by způsoboval ztráty v mědi satoru, což by opět negativně ovlivnilo účinnost.

Maximum účinnosti moderního stroje při jmenovitém momentu nastane při mírně vyšším napětí než jmenovitém (asi 240 V). U historického motoru nastává maximum při daleko vyšším napětí než je jmenovitá hodnota (asi 270 V) což potvrzuje tvrzení, že je stroj navržen na příliš malé sycení.

5 SROVNÁNÍ PARAMETRŮ HISTORICKÉHO A NOVODOBÉHO MOTORU

Tab. 5-1: Tabulka štítkových hodnot a vypočítaných ztrát historického i novodobého motoru

	Stator											
	f_n	n_n	$P_{2,n}$	U_n	I_n	M_n	$f_{rot,el}$	R_s	R_R	L_S	L_σ	m
	[Hz]	[min ⁻¹]	[kW]	[V]	[A]	[N.m]	[Hz]	[Ω]	[Ω]	[mH]	[mH]	[kg]
H.Klíma 1930	50	1400	3	220	6,6	20,5	3,3	2,32	2,5	462	48	78
TM2-100-4L B5	50	1445	3	230	6,6	19,8	1,8	1,6	3,3	209	21	23

Z Tab. 5-1 můžeme vidět jednotlivé rozdíly v konstrukci motorů. Novodobý EMP Slavkov 2012 má rotor s hliníkovou kotvou nakrátko. Jeho jmenovité otáčky jsou o 45 ot./min vyšší než u historického díky čemuž má nižší rotorový elektrický kmitočet a tím i menší ztráty v rotoru. Jelikož jeho konstrukce je kompaktnější, statorové vinutí obsahuje méně mědi (méně závitů s kratší střední délkou), což má za následek vyšší sycení, malou magnetizační indukčnost a tím i větší magnetizační proud a velké ztráty v železe. Srovnání jednotlivých ztrát můžeme vidět v Tab. 5-2.

Historický motor má vyšší jmenovitý moment a je konstruován na starší rozvodnou síť, kde bylo nižší napájecí napětí. Při napájení jmenovitým napětím má malou hodnotu sycení, proto je maximum účinnosti při jmenovitém zatížení posunuto do oblasti vyššího napětí než je jmenovité. Maximální účinnost při jmenovitém napětí je dosažena při zatěžovacím momentu 10,2 Nm, což mohlo být žádoucí kvůli účelům, na které byl využíván, pokud se zátěž motoru měnila. Moderní motor má naopak účinnost nejvyšší právě při jmenovitých parametrech. Tyto charakteristiky můžeme vidět na Obr. 4-8.

Magnetizační indukčnost závisí na sycení. Jelikož má novodobý motor menší rozměry a proto i méně závitů statorového vinutí, je jeho indukčnost 209 mH výrazně menší než u historického modelu 462 mH. Má proto větší magnetizační (jalový) proud a vyšší ztráty v železe díky vysoké hodnotě sycení. Moderní motor je navržen na chod při jmenovitých parametrech, jelikož maximum účinnosti nastává právě při těchto jmenovitých hodnotách.

Historický stroj je na druhou stranu výrazně podsycen což můžeme pozorovat na Obr. 4-10, kde při konstantním jmenovitém zatěžovacím momentu nastane maximum účinnosti až při 270 V.

Rozptylovou indukčnost má novodobý stroj nižší, což může být způsobeno konstrukcí magnetického obvodu nebo také vyšším sycením, jelikož menší počet závitů vinutí snižuje magnetizační indukčnost, což může ovlivnit rozptylovou indukčnost. Její velikost je u obou motorů přibližně 10% velikosti magnetizační indukčnosti, což můžeme vidět v Tab. 5-1.

Tab. 5-2: Srovnání jednotlivých ztrát obou motorů

	Klíma 1930	EMP 2012
Ohmické ztráty v rotoru [W]	214	114
Ohmické ztráty ve statoru [W]	303	209
Mechanické + ventilační ztráty [W]	57,5	87
Ztráty v železe [W]	62,5	111
Celkové ztráty [W]	637	521

Konstrukce obou motorů se liší, což můžeme vidět v Tab. 5-2. Zatímco historický model Klíma má větší ztráty ve vinutí z důvodu větších rozměrů a tím i většímu objemu mědi, moderní motor ve snaze o minimalizaci rozměrů má vyšší ztráty v železe díky přesycení a také větší mechanické ztráty, jelikož je na hřídeli ventilátor. Nutno však říci, že moderní stroj byl měřen nezaběhnutý, což mohlo negativně ovlivnit měřené mechanické ztráty.

Hmotnost motorů byla změřena, jelikož štítek tento údaj neuvádí a při porovnání zjistíme, že se výrazně liší. Novodobý motor má díky kompaktní konstrukci, lehkým materiálům a kotvě nakrátko pouze 23 kg. Historický motor s hmotností 78 kg má na druhou stranu plášť tvořen z litiny, která má přibližně 3x vyšší hustotu než hliník a navíc je tento motor i výrazně větší (větší objem materiálu). Měděné rotorové vinutí spolu s kroužky také výrazně zvyšuje celkovou hmotnost tohoto motoru. Pro srovnání můžeme vypočítat poměr jmenovitého momentu a celkové hmotnosti, kdy u moderního vychází 0,86 N.m/kg a u historického 0,26 N.m/kg.

Tab. 5-3: Srovnání vypočtené a průměrné měřené účinnosti při jmenovitém napájení

	Klíma 1930	EMP 2012
Účinnost vypočtená ze štítku [%]	82,5	85,2
Průměrná měřená účinnost [%]	78,7	83,6

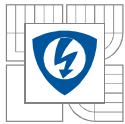
Tab. 5-4: Srovnání vypočteného a průměrného měřeného účinníku při jmenovitém napájení

	Klíma 1930	EMP 2012
Účinník vypočtený ze štítku [-]	0,835	0,77
Průměrný měřený účinník [-]	0,853	0,8

Účinnosti a účinníky ze štítku v Tab. 5-3 a Tab. 5-4 jsou poměrně nepřesné, jelikož výrobce jejich hodnoty neuvádí. Pro srovnání s měřenými hodnotami jsou však vypočítány a zapsány do tabulek. Průměrné měřené hodnoty byly vypočítány z hodnot výkonů naměřených v kapitolách 4.10 a 4.11 pro jmenovité velikosti napájecího napětí.

Z Tab. 5-3 vidíme, že moderní motor má ve jmenovitém bodě vyšší účinnost než historický. Naměřené účinnosti vyšly menší než teoretické, což mohlo být způsobeno ztrátami na měřícím ústrojí nebo nepřesným určením (výpočtem) jmenovitých ztrát.

Měřené účinníky na druhou stranu vyšly větší než teoretické, což můžeme vidět v Tab. 5-4. Rozdíl mezi účinníkem historického a moderního je poměrně značný, jelikož moderní motor má vyšší sycení a tím má i větší jalovou složku proudu.



ZÁVĚR

V úvodních kapitolách byl čtenář seznámen s obecným principem činnosti a konstrukcí asynchronního motoru. Poté byl podrobně popsán postup renovace motoru Klíma 1930. Ve třetí části této práce byly proměřeny parametry historického motoru Klíma 1930 a novodobého motoru EMP Slavkov 2012.

Měření odporu vinutí motorů bylo založeno na využití principu Ohmovy metody. Do vinutí byl přiveden stejnosměrný proud a na svorkách motoru byly měřeny úbytky napětí. Poté byl proveden výpočet hodnot odporů pro jednotlivé fáze vinutí, kde statorové vinutí historického motoru Klíma mělo hodnotu $2,32 \Omega$ a rotorové $75 \text{ m}\Omega$. Velikost statorového odporu motoru EMP Slavkov 2012 bylo $1,6 \Omega$. U motoru Klíma bylo také provedeno měření přechodových odporů mezi rotorovými kroužky a uhlíky. Z měření, kdy byl zastaven rotor, bylo zjištěno, že velikost přechodových odporů závisí na velikosti procházejícího proudu – při malých proudech odpor výrazně roste. Jakmile byl rotor roztočen, velikost odporu dokonce rostla až na 2,5 násobek hodnoty v klidovém stavu. Přesto však je tento přechodový odpor zanedbatelný ve srovnání s vlastním odporem rotorového vinutí.

Ze štítkových hodnot motorů byl proveden výpočet skluzového elektrického kmitočtu, jmenovitého momentu a ztrát v rotoru. Jelikož má moderní stroj vyšší jmenovité otáčky, vyšel jeho elektrický skluzový kmitočet nižší a proto má i menší jmenovité ohmické ztráty v rotoru, které činí 114 W . Velikost rotorových ztrát u historického stroje je 214 W . Po vyvážení rotoru stroje Klíma bylo provedeno na dynamometru VUES měření mechanických ztrát, jejichž velikost je $57,5 \text{ W}$ u historického a 87 W u novodobého motoru. Vyšší ztráty moderního motoru byly způsobeny ventilátorem na hřídeli a částečně také nezaběhnutými ložisky a přítomností gufer. Dále byly vypočítány ztráty ve vinutí statoru při jmenovitém napájecím napětí ze štítkové hodnoty proudu a naměřených odporů vinutí – 303 W u historického a 209 W u moderního stroje. Nakonec také ztráty v železe jako rozdíl celkového měřeného příkonu při chodu mechanicky naprázdno, statorových ztrát a ztrát mechanických, kdy u historického stroje vyšly $62,5 \text{ W}$ a u moderního 111 W . Jelikož byl moderní stroj navržen s ohledem na minimalizaci jeho velikosti, bylo při návrhu zapotřebí ubrat počet závitů statorového vinutí, čímž vzrostlo sycení a také velikost ztrát v železe. Dále bylo možno vypočítat odpor charakterizující tyto ztráty v železe, kdy u historického vyšel 2324Ω a u moderního 1430Ω pro jmenovité hodnoty napájecího napětí.

Byla vypočítána také vlastní indukčnost statorového vinutí. Pro jmenovitou hodnotu napájecího napětí 220 V motoru Klíma 1930 vyšla 462 mH a pro jmenovité napětí 230 V motoru Slavkov 2012 vyšla 209 mH . Závislost velikosti magnetizačních indukčností motorů na napájecím napětí můžeme vidět na Obr. 4-6. Vypočtená hodnota indukčnosti pro napětí $60\text{-}100 \text{ V}$ rostla, což bylo pravděpodobně z důvodu zanedbání vlivu rotoru, jelikož jsme předpokládali (při chodu naprázdno bez zatížení) téměř synchronní otáčky a tím i minimální vliv rotorové strany, a proto tyto hodnoty nejsou v grafu vyneseny. Pro vyšší hodnoty napájecího napětí pak indukčnost klesala. Z grafu můžeme vidět, že moderní motor má indukčnost téměř poloviční, což způsobuje velký magnetizační jalový proud. Poměr činné a jalové složky proudu pak ovlivňuje tendenci, s jakou klesá či roste účinnost při změně zatížení, což můžeme vidět v Obr. 4-8.

Výpočet rozptylové indukčnosti a rotorového odporu motorů byl proveden z naměřených hodnot ve stavu nakrátko při zabrzdění hřídele. U historického modelu je rovna 48 mH , což je více než dvojnásobná velikost hodnoty moderního stroje 21 mH . Přepočtený rotorový odpor je u historického motoru roven $2,5 \Omega$ a u moderního $3,3 \Omega$. Je však nutno dodat, že při tomto testu,



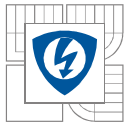
kdy je hřídel zabrzděna, je velikost rotorového kmitočtu maximální - rovna kmitočtu statorovému. U motoru s klecovým vinutím se může objevit skin efekt na rozdíl od vinutého rotoru, a proto by mohl být rotorový odpor u motoru Slavkov při jmenovitém provozu nižší než vypočtená hodnota.

Váha obou motorů se výrazně liší. Zatímco moderní stroj kompaktní konstrukce s kotvou nakrátko má pouze 23 kg, litinový historický stroj s kroužkovou kotvou váží 78 kg. Nutno však podotknout, že právě odlišnosti těchto konstrukcí jsou hlavním důvodem hmotnostního rozdílu. Motor P112L04 od firmy Siemens s kroužkovou kotvou má podle štítkových údajů 73 kg, 3,6 kW a 1385 ot/min. Vidíme, že tento novodobý kroužkový motor je váhově velmi podobný historickému. Má vyšší jmenovitý moment 24,8 N.m, ale nižší jmenovité otáčky a díky tomu bude mít i vyšší rotorové ztráty. U proměřovaných motorů můžeme také provést výpočet poměru jmenovitého momentu a hmotnosti, kdy u moderního je roven 0,86 N.m/kg a u historického 0,26 N.m/kg. Pro informaci můžeme tento poměr vypočítat i pro moderní kroužkový motor, i když jeho jmenovitý výkon není stejný jako u měřených motorů – 0,34 N.m/kg.

Jmenovité účinnosti a účinníky motorů byly vypočítány ze štítkového výkonu a vypočtených jmenovitých ztrát, jelikož výrobci garantovanou účinnost neuvádějí. Nejsou to však úplně přesné hodnoty, jelikož při měření a výpočtu některých ztrát mohlo dojít k nepřesnostem. Pro historický motor vyšly celkové ztráty 637 W, jmenovitá účinnost 82,5 % a účinník 0,835. Moderní motor má celkové ztráty 521 W, účinnost 85,2 % a účinník 0,77. Z těchto hodnot vidíme, že účinník má jednoznačně lepší historický model díky nižšímu podílu jalové složky proudu (větší magnetizační indukčnost), ale účinnost má nižší díky větším celkovým ztrátám.

Na dynamometru byly naměřeny závislosti účinností na velikosti zatěžovacího momentu při konstantním jmenovitém napájecím napětí. Z Obr. 4-8 můžeme vidět, že moderní motor má nejvyšší účinnost 84 % při zatížení 17,6 Nm, což je nepatrně nižší hodnota než jmenovitá. Při malých hodnotách zatížení však jeho účinnost rychle klesá, jelikož dochází ke snížení činné složky proudu, avšak jalová složka klesá pomalu a dochází stále k výrazným ztrátám ve vinutí statoru. Na druhou stranu historický stroj má maximum účinnosti 85 % při 10,2 Nm, což je polovina jmenovité hodnoty zatížení. Při jmenovitém zatížení má však účinnost 77,7 % výrazně nižší než moderní stroj. To je pravděpodobně dáno tím, že moderní stroj je optimalizován na chod se jmenovitými parametry a při jeho konstrukci byla snaha o minimalizaci rozměrů. Bylo také provedeno měření účinnosti v závislosti na velikosti napájecího napětí při konstantním zatížení. Pro jmenovité zatížení 20 Nm můžeme v Obr. 4-10 vidět, že motor Slavkov 2012 má na celém měřeném rozsahu vyšší účinnost než motor Klíma 1930. Maximum účinnosti pro moderní stroj nastane přibližně při napětí 240 V a u historického modelu až při 270 V, což je daleko vyšší hodnota než jmenovitá. To potvrzuje domněnku, že historický stroj je navržen na příliš malé sycení. Pro malou hodnotu zatížení 5 Nm má vyšší účinnost motor Klíma. Pokud srovnáme naměřené účinnosti ve jmenovitém bodě s vypočítanými ze štítku, zjistíme, že je u obou motorů měřená hodnota nižší. Naměřená hodnota účinníku je však na druhou stranu vyšší než předpokládaná teoretická.

Můžeme tedy konstatovat, že parametry asynchronních motorů se za dobu 80 let příliš nezměnily. Historický motor má velké rozměry a je otevřeného provedení. Při jmenovitém napájení a jmenovitém zatížení je podsycený s účinností 77,7 %. Maximum jeho účinnosti 85 % nastává při polovičním zatížení. Novodobý stroj je konstruován s ohledem na minimalizaci rozměrů, a proto bylo zvoleno vyšší sycení. Maximum účinnosti 84 % nastává při provozu se jmenovitým zatížením při jmenovitém napájecím napětí.



LITERATURA

- [1] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika*. Praha: Europa-Sobotáles, 2002, 561 s. ISBN 80-86706-00-1.
- [2] VOREL, PH.D., Doc. Ing. Pavel. *Ústní konzultace na téma asynchronní motor*. Brno, 2014.
- [3] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [4] LYÓCSA, Štefan a Jozef GÜTTLER. *Měření na asynchronním motoru*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1972.
- [5] BARTOŠ, Václav a Bohumil SKALA. *Měření na elektrických strojích*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 109 s. ISBN 80-708-2896-X.