



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI MALÝCH
ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ.**

OPTIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF SMALL MOTORS.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karel Kusý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Karel Kusý

ID: 186126

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Možnosti zvýšení účinnosti malých asynchronních motorů.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vyberte nejméně tři soubory opatření pro zvýšení účinnosti malých asynchronních motorů.
2. Vyhodnoťte zvýšení spotřeby základního materiálu, tj. mědi(vinutí) a materiálu pro magnetický obvod pro zvolený motor.
3. Zjistěte cenovou úroveň výše uvedených materiálů.
4. Vyhodnoťte zvýšení materiálových nákladů na jeden kus motoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PETROV, G. N. Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - synchronní stroje. 1. vyd. Praha: Academia Praha, 1982. ISBN 509-21-857.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. ISBN 36 174-57.
- [3] ŠTĚPINA Jaroslav Jednofázové indukční motory. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. ISBN 36 174-57.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi dosažení vyšší účinnosti malých asynchronních motorů a jejich výrobními náklady. V následujících kapitolách je popsána konstrukce, funkce a principy regulace otáček asynchronního motoru. Dále jsou zde popsány ztráty, které vznikají při chodu v asynchronním motoru a možnosti, jak tyto ztráty snížit. V poslední kapitole této práce jsou popsány faktory ovlivňující výrobní náklady asynchronního motoru a následně jsou zde prakticky vyhodnoceny materiálové náklady na jeden kus upraveného motoru.

Klíčová slova

Asynchronní motor; účinnost; ztráty v asynchronním motoru; Joulovy ztráty; měď; hliník; rotor; stator; výrobní náklady

Abstract

This bachelor thesis concerns itself with the possibilities of achieving higher efficiency of small asynchronous motors and their manufacturing costs. The following chapters describe the design, function and principles of speed regulation of the asynchronous motor. Next, losses that occur during motor operation and ways of reducing them, are described. The last chapter of the thesis addresses factors that influence the manufacturing costs of the asynchronous motor and evaluates the material costs of one modified motor.

Keywords

Asynchronous motor; efficiency; losses of induction motor; Joule's losses; copper; aluminium; rotor; stator; production costs

Bibliografická citace:

KUSÝ, K. *Možnosti zvýšení účinnosti malých asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 43 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Možnosti zvýšení účinnosti malých asynchronních motorů 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne.....

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Vítězslavu Hájkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne.....

Podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Asynchronní motor	2
2.1	Konstrukce	2
2.2	Rozdělení asynchronních motorů	4
2.2.1	Jednofázové	4
2.2.2	Dvoufázové	5
2.2.3	Třífázové	5
2.3	Náhradní schéma asynchronního motoru	6
2.4	Regulace otáček asynchronních motorů	7
2.4.1	Regulace otáček odporem v rotoru	7
2.4.2	Regulace otáček změnou počtu pólů	8
2.4.3	Regulace otáček změnou kmitočtu	8
2.4.4	Regulace otáček pomocí skluzového výkonu	9
2.4.5	Regulace otáček dvou asynchronních strojů v kaskádním spojení	9
3	Ztráty asynchronního motoru	10
3.1.1	Ztráty v železe	10
3.1.2	Ztráty ve vinutí statoru a rotoru	11
3.1.3	Ztráty mechanické a ventilační	11
3.1.4	Dodatečné ztráty v železe	11
3.1.5	Dodatečné ztráty při zatížení	12
4	Možnosti zvýšení účinnosti asynchronních motorů	13
4.1	Snížení odporu statorového vinutí	13
4.2	Snížení odporu klece	13
4.3	Vhodná velikost vzduchové mezery	14
4.4	Axiální prodloužení magnetického obvodu	15
4.5	Snížení měrných ztrát v magnetickém obvodu	15
4.6	Vhodný tvar a velikost drážek	15
4.7	Snížení mechanických ztrát	16
4.7.1	Tření rotoru o vzduch	16
4.7.2	Ventilační ztráty	16
4.8	Praktické ověření zvýšení účinnosti asynchronního motoru	17
4.8.1	Vzorek č. 1- prodloužený magnetický obvod, snížený počet závitů, zvýšený průměr vodiče statorového vinutí	17
4.8.2	Vzorek č. 2 – měděná klec	18
4.8.3	Vzorek č. 3 – žíhané plechy typu M700-50A	20
4.8.4	Vzorek č. 4 - plechy typu M270-35A, zvýšený průměr vodiče statorového vinutí	21

4.8.5	Vzorek č. 5 – Žíhané plechy typu M270-35A, zvýšený průřez vodiče a snížený počet závitů	22
5	Ekonomické zhodnocení výroby motorů	24
5.1	Ceny surovin a materiálů pro výrobu motorů.....	24
5.2	Konstrukční provedení.....	26
5.3	Výrobní proces.....	27
6	Výpočet výrobních nákladů popsaných vzorků.....	28
6.1	Výpočet hmotnosti vinutí, statorových a rotorových plechů standardně vyráběného motoru z práce [7] podle technické dokumentace.....	28
6.2	Výpočet hmotnosti vinutí, statorových a rotorových plechů vzorku č. 1 ..	30
6.3	Výpočet hmotnosti vinutí, statorových a rotorových plechů vzorku č. 4 ..	31
6.4	Výpočet hmotnosti vinutí, statorových a rotorových plechů vzorku č. 5 ..	32
6.5	Vyhodnocení výrobních nákladů	33
7	Závěr	37
	Použitá literatura	39
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	41

Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1: Spotřeba energie, EU-28 [10].</i>	1
<i>Obr. 2.1: Asynchronní motor [3].</i>	3
<i>Obr. 2.2: Konstrukční řešení motoru s kotvou nakrátko [9].</i>	3
<i>Obr. 2.3: Vliv vynechání středních cívek na magnetické pole jednofázového motoru [5].</i>	4
<i>Obr. 2.4: Principiální schéma dvofázového servomotoru [1].</i>	5
<i>Obr. 2.5: Vznik tažné síly asynchronního motoru [4].</i>	6
<i>Obr. 2.6: Náhradní schéma asynchronního stroje [1].</i>	7
<i>Obr. 2.7: Regulace otáček předřadným odporem [5].</i>	8
<i>Obr. 2.8: Kaskádní spojení dvou asynchronních motorů 1-první stroj, 2-druhý stroj, 3-spouštěcí odporník pro první nebo druhý stroj, 4-Spínače, 5-spouštěcí odporník pro kaskádu, 6- napájecí síť, PS- poháněný stroj [2].</i>	9
<i>Obr. 3.1: Znázornění toku výkonů v asynchronním motoru [4].</i>	10
<i>Obr. 4.1: Srovnání účinností na zatížení vzorku č. 1 a standardně vyráběného motoru [7].</i>	18
<i>Obr. 4.2: Srovnání účinností na zatížení vzorku č. 2 a standardně vyráběného motoru [7].</i>	19
<i>Obr. 4.3: Srovnání účinností na zatížení vzorku č. 3 a standardně vyráběného motoru [7].</i>	20
<i>Obr. 4.4: Srovnání účinností na zatížení vzorku č. 4 a standardně vyráběného motoru [7].</i>	22
<i>Obr. 5.1: Vývoj ceny hliníku od roku 2004 po současnost [15].</i>	24
<i>Obr. 5.2: Vývoj ceny mědi od roku 2004 po současnost [15].</i>	24
<i>Obr. 5.3: Porovnání výrobních nákladů motoru s hliníkovou klecí a s klecí měděnou [14].</i>	26
<i>Obr. 6.1 Ukázka řezu rotorového a statorového plechu</i>	28

Seznam tabulek

<i>Tab. 2.1: Otáčky točivého magnetického pole v závislosti na počtu pólů při napájecí frekvenci $f = 50$ Hz [1].</i>	8
<i>Tab. 4.1: Přehled úprav provedených na měřených vzorcích.</i>	17
<i>Tab. 4.2: Porovnání výsledků měření standardně vyráběného motoru (první řádek tabulky) a vzorku č. 1 (druhý řádek tabulky) při jmenovitém zatížení [7].</i>	17
<i>Tab. 4.3: Porovnání výsledků měření standardně vyráběného motoru (první řádek tabulky) se vzorkem č. 2 (druhý řádek tabulky). [7].</i>	19
<i>Tab. 4.4: Porovnání výsledků měření standardně vyráběného motoru (první řádek tabulky) se vzorkem č. 2 (druhý řádek tabulky) [7].</i>	20
<i>Tab. 4.5: Porovnání výsledků měření standardně vyráběného motoru (první řádek tabulky) s motorem, který má statorové i rotorové plechy jiného typu (druhý řádek tabulky) [7].</i>	21
<i>Tab. 4.6: Porovnání výsledků měření standardně vyráběného motoru (první řádek tabulky) se vzorkem č. 5 (druhý řádek tabulky) při jmenovitém zatížení [7].</i>	22
<i>Tab. 5.1: Přehled cen měděných vodičů určených pro vinutí stroje</i>	25
<i>Tab. 5.2: Přehled cen elektrotechnických plechů</i>	25
<i>Tab. 6.1: Přibližných výrobních nákladů elektrotechnických plechů pro jednotlivé vzorky (vychází se z Tab. 5.2).</i>	33
<i>Tab. 6.2: Přibližných výrobních nákladů statorového vinutí pro jednotlivé vzorky (vychází se z</i>	34
<i>Tab. 6.3: Výpočet počtu hodin do úplné finanční návratnosti vložené do úpravy vzorku č.1 po uvedení stroje do provozu podle výrobních nákladů firmy ATAS Náchod.</i>	34
<i>Tab. 6.4: Výpočet počtu dní do úplné finanční návratnosti vložené do úpravy vzorku č.4 po uvedení stroje do provozu podle výrobních nákladů firmy ATAS Náchod.</i>	35
<i>Tab. 6.5: Výpočet počtu dní do úplné finanční návratnosti vložené do úpravy vzorku č.5 po uvedení stroje do provozu podle výrobních nákladů firmy ATAS Náchod.</i>	35

1 ÚVOD

Z důvodu rychlého růstu spotřeby energie ve světě se v roce 2007 Evropská unie zavázala, že dojde ke snížení spotřeby energie v unii o 20 % do roku 2020 oproti dřívějším predikacím. Cíl pro spotřebu primární energie byl stanoven na 1483 Mtoe, pro konečnou spotřebu energie na 1086 Mtoe [10].

Tohoto cíle jak snížit spotřebu energie lze dosáhnout mnoha způsoby, a to například kombinovanou výrobou tepla a elektřiny, snížením energetické náročnosti budov nebo zvýšením energetické účinnosti výrobků. Právě poslední zmiňovaná problematika je velmi podceňována společnostmi, a to přesto, že v současné době je asi 30 % z celkové spotřeby elektrické energie v unii spotřebováno elektrickými stroji. Tyto společnosti si neuvědomují, že vložené náklady do úprav strojů k docílení vyšší energetické účinnosti se jim jednoho dne vrátí a přejdou do černých čísel, ale také si neuvědomují to, že snížením ztrát ve stroji budou více ekologické.

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2020 target
Primary Energy	1 570.0	1 567.2	1 617.6	1 713.3	1 657.5	1 531.9	1 542.7	1 483
Solid Fossil Fuels	452.7	363.7	320.1	316.5	281.5	261.1	238.9	
Oil & Petroleum Products	549.8	562.8	566.5	577.8	518.8	478.9	484.7	
Gas (Natural & Derived)	282.4	321.4	380.7	430.5	433.5	344.2	369.4	
Nuclear Heat	205.2	227.3	243.8	257.5	236.6	221.2	216.7	
Renewables	72.1	84.6	98.5	121.8	175.2	211.7	216.6	
Other	7.7	7.4	8.0	9.2	11.9	14.8	16.5	
Final Energy	1 084.6	1 082.6	1 132.7	1 192.7	1 163.2	1 086.2	1 107.7	1 086
Solid Fossil Fuels	124.1	83.0	61.9	53.9	50.1	45.9	45.2	
Oil & Petroleum Products	448.8	465.9	490.3	503.7	458.1	429.9	437.1	
Gas (Natural & Derived)	230.9	247.5	267.6	282.0	272.0	237.0	245.3	
Electricity	185.8	194.1	217.4	239.4	244.0	236.6	239.4	
Derived Heat	55.1	46.3	45.3	52.7	53.5	46.5	47.9	
Renewables	38.9	44.3	49.1	59.4	82.8	86.9	88.9	
Non-renewable wastes	0.9	1.6	1.0	1.5	2.7	3.5	3.8	

Obr. 1.1: Spotřeba energie, EU-28 [10].

Z těchto důvodů se v mé bakalářské práci zabývám možnostmi, jak dosáhnout vyšší energetické účinnosti malých asynchronních motorů a pořizovacími náklady těchto upravených strojů. V následujících kapitolách je popsána konstrukce a princip činnosti asynchronního stroje. Dále jsou zde popsány ztráty vznikající při chodu a následně jak tyto ztráty snížit. V poslední kapitole jsou ekonomicky vyhodnoceny upravené vzorky z práce.

2 ASYNCHRONNÍ MOTOR

Asynchronní motor je z důvodu své jednoduché konstrukce nejpoužívanější elektrický stroj v průmyslu. Jako každý stroj, může i tento měnit elektrickou energii na mechanickou (motor) nebo mechanickou energii na elektrickou (generátor). Asynchronní alternátory se uplatňují jen výjimečně. V automatizovaných systémech řízení se asynchronní stroje používají jako měniče.

Výkony vyráběných asynchronních strojů se pohybují od jednotek W pro nízké napětí do tisíců kW pro vysoké napětí. Nejrozšířenější jsou třífázové motory pracující s frekvencí 50 Hz a jejich otáčky se zpravidla pohybují v rozmezích od cca 500 do 3000 min⁻¹. Speciální motory se navrhují i na kmitočet několika tisíc Hz a otáčky mohou dosahovat až několika set tisíc za minutu [1], [2], [9].

2.1 Konstrukce

Jako všechna zařízení sloužící k elektromechanické přeměně energie, se i asynchronní motor skládá z pevné části (statoru) a pohyblivé části (rotoru).

Stator je složen z hliníkových nebo litinových plechů (tloušťky cca 0,5 mm), které jsou od sebe navzájem odizolovány. Důvodem složení statoru z plechů, je omezení magnetizačních ztrát ve stroji. Vodiče vinutí jsou uloženy v drážkách magnetického obvodu statoru. Začátky vinutí jsou pevně spojené v čelech stroje a konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici. Všechny cívky fází jsou stejné a jsou rovnoměrně rozložené v drážkách po obvodu statoru. Konstrukce statoru neslouží pouze pro uložení vinutí, ale musí také zabezpečit krytí, upevnění a chlazení stroje. Běžné asynchronní motory jsou nejčastěji provedeny s krytím IP 44.

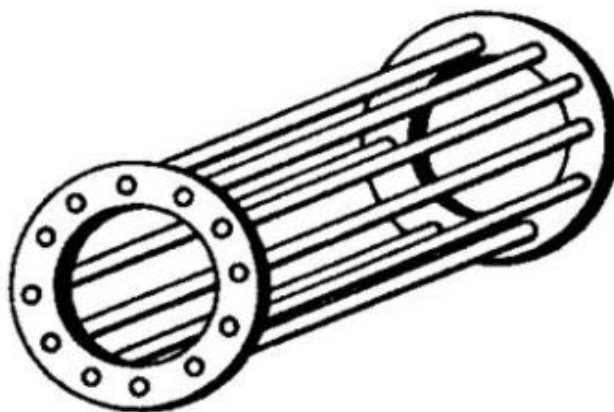
Ve statoru stroje je otočně uložen rotor. Rotor je stejně jako stator složen z plechů s drážkami. Plechy jsou nalisovány na hřídeli. Ta se otáčí v ložiskách upevněných v ložiskových štítech, které vymezují polohu rotoru uvnitř statoru. Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera, která musí být co nejmenší (obvykle bývá od 0,2 do 2 mm). S nižší vzduchovou mezerou je nižší odpor mezi statorem a rotorem, čímž je vyšší účinnost stroje [1], [9].



Obr. 2.1: Asynchronní motor [3].

Drážky rotoru jsou rozloženy po vnější straně obvodu rotoru. V drážkách je uloženo vinutí, kterému se říká kotva. Provedení rotorového vinutí může být dvojí, a to s kotvou nakrátko nebo s kotvou vinutou.

U motorů vyšších výkonů se používá rotor s kotvou nakrátko. Tato kotva má v drážkách rotorového magnetického obvodu umístěny vodivé tyče (nejčastěji z hliníku, mosazi nebo mědi) spojené spojovacími kruhy nakrátko v čelech stroje. U motorů menších výkonů se vinutí odlévá spolu s větracími lopatkami z hliníku metodou tlakového lití.



Obr. 2.2: Konstrukční řešení motoru s kotvou nakrátko [9].

U motoru s vinutou kotvou je v drážkách rotoru třífázové vinutí uspořádané obdobně jako u vinutí statoru. Toto vinutí je nejčastěji zapojené do hvězdy. Začátky fází jsou spojeny do uzlu a konce připojeny ke sběracím kroužkům, ke kterým přiléhají kartáče. U této konstrukce je možné přidání přídavných impedancí do rotorového obvodu [1], [9].

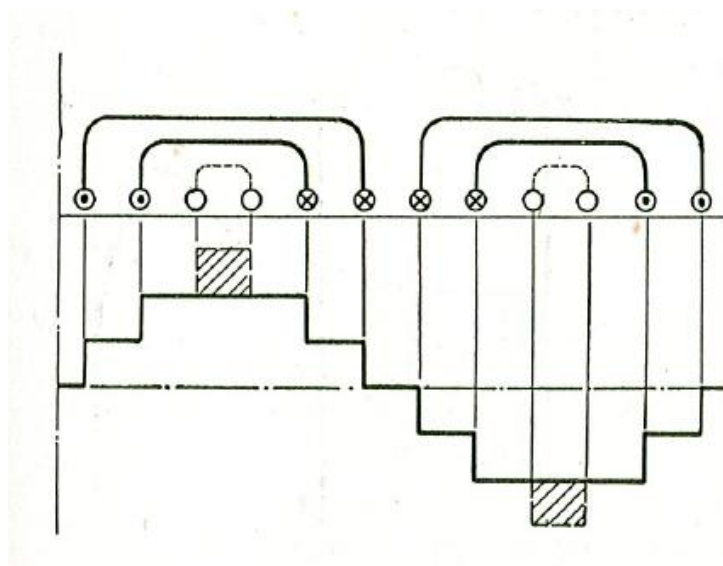
2.2 Rozdělení asynchronních motorů

2.2.1 Jednofázové

Jednofázový asynchronní motor se používá v různých odvětvích hospodářství i v domácnostech (pračka, lednička, ventilátory, čerpadla). Motor má jednofázové vinutí statoru umístěné zpravidla do dvou třetin všech drážek (pracovní vinutí). Do zbývajících třetin se uloží vinutí rozběhové.

Pracovní vinutí je napájeno jednofázovým napětím, které vytváří pouze pulzující pole, které samo motor nepřinutí nerozběhnout. Proto se rozběh jednofázového asynchronního motoru realizuje pomocí rozběhového vinutí sloužícího k tomu, aby spolu s pracovním vinutím vytvořilo točivé magnetické pole. Točivé magnetické pole se docílí, pokud magnetické osy těchto dvou vinutí jsou prostorově posunuty o 90° mechanických. Proto je velmi důležité časově posunout proud rozběhové fáze vůči proudu fáze pracovního vinutí. V praxi se toho dá snadno dosáhnout připojením rezistoru, kapacitoru nebo induktoru do série s rozběhovým vinutím [4], [1].

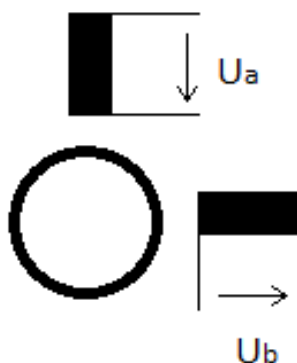
U malých motorů je možné vynechat střední cívku (rozběhové vinutí), protože tyto motory se mohou roztočit klikou nebo zatažením za řemen. Díky tomu ubude $1/9$ toku jednoho pólu a ztráty se poté zmenší skoro o $1/3$, jelikož ubude $1/3$ všech závitů [5], [2].



Obr. 2.3: Vliv vynechání středních cívek na magnetické pole jednofázového motoru [5].

2.2.2 Dvoufázové

Dvoufázový asynchronní motor (neboli servomotor) se skládá jako klasický motor ze statoru a rotoru. Stator je tvořen ze dvou svazků plechů s drážkami. V těchto drážkách statoru je uloženo dvoufázové vinutí, které je posunuto navzájem o 90° mechanických. Rotor se vyrábí buď klecovitého typu, nebo ve tvaru dutého válečku. Výhoda rotoru ve tvaru válečku je, že má malý moment setrvačnosti (což je u servomotorů vyžadováno), ale ve srovnání s klecovitým rotorem má menší mechanický výkon na hřídeli [1].

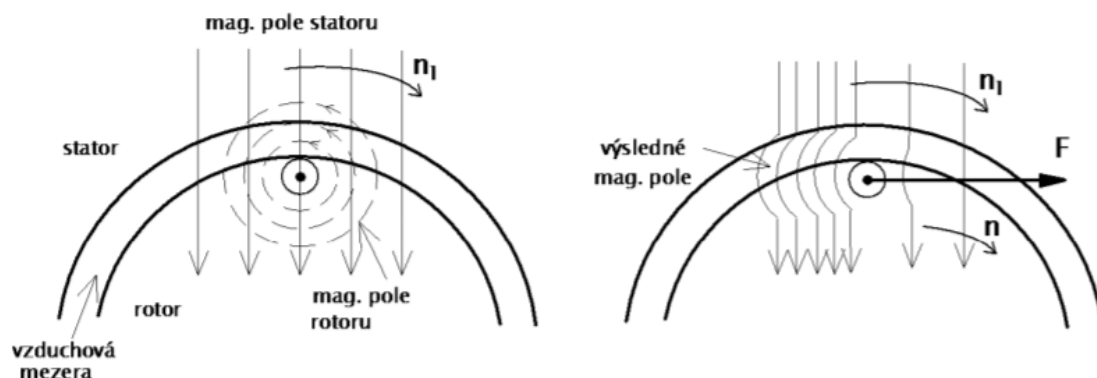


Obr. 2.4: Principiální schéma dvoufázového servomotoru [1].

Na Obr. 2.4 jsou zobrazeny 2 cívky představující vinutí řídicí a vinutí budící. Řídicí vinutí je obvykle připojeno na zdroj řídicího napětí U_a a budící vinutí na zdroj o konstantním budícím napětí U_b . Tyto napětí musí být vůči sobě časově posunuty, aby mohlo vytvořené točivé magnetické pole statoru indukovat vířivé proudy v rotoru. Vzájemným působením magnetického pole statoru a vířivých proudů rotorů vzniká točivý moment. Měnit směr otáčení takového motoru je velmi snadné, protože směr otáčení závisí pouze na tom, jaké napětí ve fázi předbíhá. Stačí tedy pouze zaměnit příklady některého vinutí [1].

2.2.3 Třífázové

Tento typ asynchronního motoru je nejrozšířenější typ asynchronního stroje. Připojíme-li na statorové vinutí třífázovou soustavu napětí, vytvoří se ve statoru točivé magnetické pole. Siločáry z tohoto pole protínají rotorové vinutí, ve kterém se indukují napětí. Pokud je vinutí uzavřeno, začne v rotoru procházet proud vytvářející si své magnetické pole. Frekvence rotorového napětí a proudu je při stojícím rotoru stejná jako frekvence statorového proudu. Vzájemným silovým působením magnetického pole rotoru a statoru vzniká síla působící na vodiče rotoru ve směru pohybu magnetického pole statoru, to zapříčiní urychlování motoru a točivé pole má snahu jej unášet [1], [9].



Obr. 2.5: Vznik tažné síly asynchronního motoru [4].

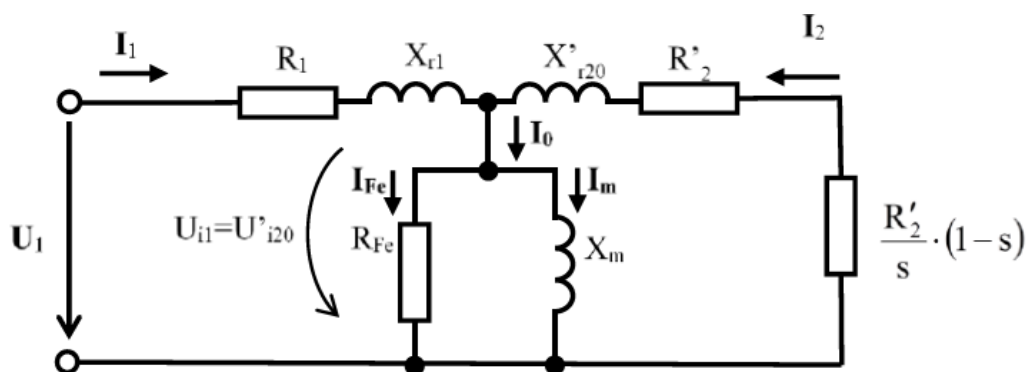
U asynchronního motoru nemohou být otáčky točivého magnetického pole statoru n_1 a otáčky rotoru n stejné, jelikož by se ve vodičích rotoru neindukovalo napětí a proud. Rozdíl těchto otáček n_1 a n , podělený otáčkami točivého pole statoru n_1 , je tzv. skluz s (2.1) [1].

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2.1)$$

Skluz je hlavní bezrozměrnou veličinou pro popis asynchronního motoru a je závislý na zatížení a typu režimu motoru. Někdy se také udává v procentech. U velkých motorů se skluz pohybuje okolo 1 % a u malých motorů asi do 10 %. Otáčky motoru (tedy i skluz) se dají regulovat mnoha způsoby, které jsou více popsány v kapitole 2.4 [1], [9].

2.3 Náhradní schéma asynchronního motoru

Náhradní schéma asynchronního motoru je v určitém okamžiku totožné s náhradním schématem transformátoru, jelikož se asynchronní stroj při stojícím rotoru chová podobně jako transformátor. Změny se projeví až při zatížení motoru. To je způsobené tím, že se v rotorovém vinutí indukuje napětí o kmitočtu závislém na skluzu. Z toho je zřejmé, že kmitočet v rotorovém vinutí je jiný, než kmitočet ve statorovém vinutí a je závislý na zatížení stroje. Proto se při odvozování obvodového modelu asynchronního stroje vychází z podobnosti s transformátorem a s respektováním zvláštností asynchronního stroje při zatížení [1].



Obr. 2.6: Náhradní schéma asynchronního stroje [1].

Kde: R_1 a X_{r1} představují odpor a rozptylovou reaktanci vinutí statoru,
 R'_2 a X'_{r20} představují odpor a rozptylovou reaktanci vinutí rotoru
přepočtené na primární stranu,
 R_{Fe} fiktivní odpor, který uvažuje ztráty v železe statoru,
 X_m magnetizační (hlavní) reaktance

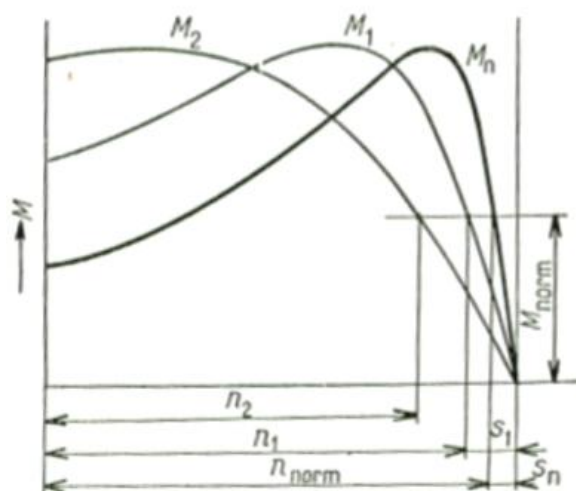
Odpory a reaktance (v náhradním schématu) jsou závislé na různých pracovních režimech stroje. Odpory asynchronního stroje R_1 a R'_2 se mění s teplotou vinutí. Reaktance X_{r1} a X'_{r20} jsou obvykle ovlivňovány proudy statoru a rotoru a také růstem zatížení stroje. Při zvýšení skluzu s rotory nakrátko dochází ke zvýšenému působení povrchového jevu, což způsobuje změnu odporů a reaktancí rotoru R_2 a X_{r20} [6], [2].

Při výpočtu rozběhu stroje, je nutné brát v úvahu i změny odporu a reaktancí, kvůli vlivu povrchového jevu. To je způsobené tím, že proud stroje několikrát převyšuje proudy jmenovité a frekvence proudů v rotoru je blízká napájecí frekvenci [6].

2.4 Regulace otáček asynchronních motorů

2.4.1 Regulace otáček odporem v rotoru

Připojení předřadného regulátoru dimenzovaného na trvalé zatížení do rotorového obvodu, vede ke zvýšení odporu rotoru. Pokud se rotoru takto zvýší odpor, vzniká větší skluz a sníží se otáčky motoru. Nevýhodou však je, že s rostoucím odporem rotoru se hůře udržují otáčky motoru při změnách zatížení, protože momentová charakteristika má menší sklon (Obr. 2.7). Další nevýhoda je, že se se snížením otáček snižuje i účinnost stroje. To je způsobené tím, že se celý výkon, daný zvýšeným skluzem, přeměňuje v odporech regulátoru na teplo. Z tohoto důvodu lze snížit otáčky stroje nejvýše o 30 % [5].



Obr. 2.7: Regulace otáček předřadným odporem [5].

2.4.2 Regulace otáček změnou počtu pólů

Regulace otáček motoru změnou počtu pólů je realizována buď pomocí jednoho přepínatelného vinutí, nebo několika samostatnými vinutími s různým počtem pólů. Taková regulace otáček se provádí ve skocích a odpovídá různým synchronním otáčkám při různém počtu pólů (Tab. 2.1). Rotor je ve většině případů nakrátko, ale pokud je rotor vinutý, musí se přepínat současně se státorem, aby měly oba stejný počet pólů. Nejpoužívanější vinutí pro změnu otáček je v poměru 1:2, např. ze 2 na 4, ze 4 na 8 apod. [5].

Otáčky statoru závislé na pólových dvojicích můžeme vypočítat jako:

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (2.2)$$

Kde: f je kmitočet napájecího napětí,
 p počet pólů stoje

2p	2	4	6	8	10	12
n_1 [s ⁻¹]	50	25	16,66	12,8	10	8,33

Tab. 2.1: Otáčky točivého magnetického pole v závislosti na počtu pólů při napájecí frekvenci $f = 50$ Hz [1].

2.4.3 Regulace otáček změnou kmitočtu

Regulace otáček změnou kmitočtu se v dnešní době nejčastěji provádí pomocí elektronických regulátorů otáček (frekvenční měniče). Tyto přístroje dokážou přivést energii do statoru motoru v širokém rozsahu frekvencí. Ze vztahu 2.2 je zřejmé, že je následně velmi snadné měnit otáčky stroje. Při regulaci otáček

změnou kmitočtu je důležité dodržet konstantní poměr napájecího napětí a frekvence [1].

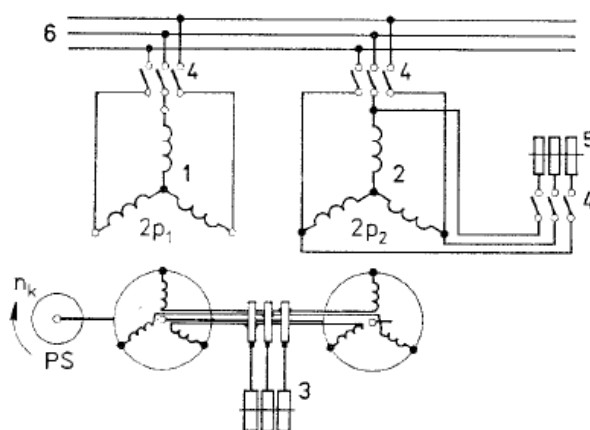
2.4.4 Regulace otáček pomocí skluzového výkonu

Tato regulace otáček se provádí při konstantní frekvenci napájení a konstantním momentu stroje. Pokud jsou tyto parametry konstantní, je konstantní i výkon prostupující přes vzduchovou mezeru P_δ . Pokud je přidán do rotorového obvodu regulační odpor, lze měnit elektrický výkon P_{el} spotřebovaný v rotorovém obvodu. Ze vztahu 2.3 vyplývá, že změnou elektrického výkonu, přes regulační odpor, je možné měnit skluz a tedy i otáčky motoru [1].

$$P_{el} = s * P_\delta \quad (2.3)$$

2.4.5 Regulace otáček dvou asynchronních strojů v kaskádním spojení

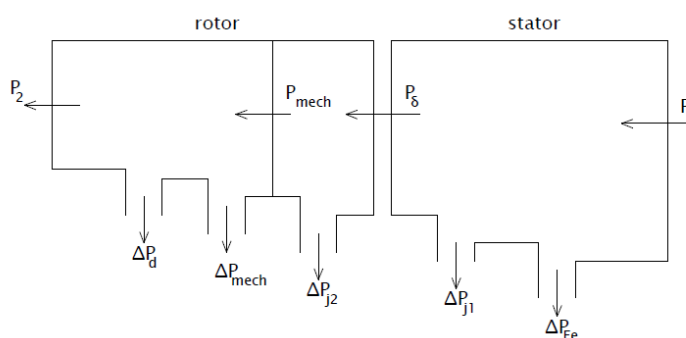
U tohoto typu regulace otáček je zapotřebí dvou asynchronních strojů (poprvé navrženo v.r.1893 nezávisle H.Görgešem a K. Steinmetzem). Tyto stroje mají rotory mechanicky spojené buď přímo, nebo převodem. Stroje mají zpravidla různý počet pólů [2].



Obr. 2.8: Kaskádní spojení dvou asynchronních motorů 1-první stroj, 2-druhý stroj, 3-spouštěcí odporník pro první nebo druhý stroj, 4-Spínače, 5-spouštěcí odporník pro kaskádu, 6- napájecí síť, PS-poháněný stroj [2].

3 ZTRÁTY ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Pro vyčíslení účinnosti stroje je nejprve nutné zjistit ztráty vznikající v asynchronním motoru. Tyto ztráty se dělí na ztráty v železe (ΔP_{Fe}), ztráty ve vinutí statoru (ΔP_{j1}) a rotoru (ΔP_{j2}), ztráty mechanické a ventilační (ΔP_{mech}) a na ztráty dodatečné (ΔP_d).



Obr. 3.1: Znázornění toku výkonů v asynchronním motoru [4].

3.1.1 Ztráty v železe

Ztráty v železe jsou způsobeny střídavým magnetickým polem, které vyvolává neustálé přemagnetování materiálu. Přemagnetování materiálu má za následek ohřev feromagnetika a tím dochází ke ztrátě energie. Tyto ztráty se v magnetickém obvodu dále dělí na ztráty hysterezní a na ztráty vířivými proudy [13].

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v \quad (3.1)$$

Ztráty hysterezní:

Ztráty hysterezní jsou způsobeny důsledkem pochodů při změnách doménových oblastí v magnetickém poli a jsou úměrné ploše hysterezní křivky. Tyto ztráty rostou přímo úměrně s rostoucí frekvencí pole a dají se vypočítat z následujícího vztahu [13], [1] :

$$\Delta P_h = k_h * f * B_m^n * m \quad (3.2)$$

Kde: k_h je koeficient závisející na materiálu a tloušťce plechů,
 B_m je maximální hodnota magnetické indukce B,
 m je hmotnost magnetického materiálu,
 f je frekvence.

Ztráty vířivými proudy

Ztráty vířivými proudy jsou výsledkem interakcí indukovaných proudů s feromagnetikem. Jsou značně závislé na tloušťce vodivého materiálu, rezistivitě (měrný elektrický odpor) a jsou úměrné rozdílu plochy dynamické a statické hysterezní smyčky. Ztráty vířivými proudy se dají vyjádřit pomocí vztahu [13], [1]:

$$\Delta P_v = k_v * f^2 * B_m^2 * m \quad (3.3)$$

Kde: k_v je koeficient závislý na materiálu a tloušťce plechů,
 B_m je maximální hodnota magnetické indukce B,
 m je hmotnost magnetického materiálu,
 f je frekvence.

3.1.2 Ztráty ve vinutí statoru a rotoru

Tyto ztráty se taky označují jako Joulovy ztráty a počítají se zvlášť pro rotor a zvlášť pro stator. Jsou závislé na ohmickém odporu vinutí R a na druhé mocnině protékajícího proudu [1]. Vztah pro elektrické ztráty ve všech fázích vinutí statoru je:

$$\Delta P_j = m * R_1 * I_1^2 \quad (3.4)$$

Kde: m je počet fází,
 R_1 je odpor vinutí statoru,
 I_1 je proud vinutí statoru.

Joulovy ztráty ve vinutí statoru a rotoru se zpravidla určují z odporu, který má teplotu 75 °C a vinutí s izolační třídou A, E, B, nebo při teplotě 115 °C pro třídy F, H [2].

3.1.3 Ztráty mechanické a ventilační

Ztráty mechanické a ventilační jsou způsobené třením otáčejících se částí stroje o vzduch, ztrátami ventilátoru, ztrátami v ložiskách a ztrátami třením na kluzkém kontaktu. Pro výpočet těchto ztrát slouží vzorce, které jsou založeny na experimentálně určených údajích [6].

3.1.4 Dodatečné ztráty v železe

Tyto ztráty vznikají pouze při chodu stroje naprázdno. Dělí se na ztráty povrchové a pulsní. Povrchové představují ztráty v povrchové vrstvě hlav zubů statoru a rotoru a jsou způsobené od pulsní indukce ve vzduchové mezeře. Pulsní ztráty

jsou výsledkem pulsacemi magnetického toku v zubech, které vytváří vířivé proudy v železe zubů.

Dodatečné ztráty ve statoru se u motorů nakrátko a u motorů s tyčovým vinutím nepočítají, protože jsou obvykle velmi malé. To je způsobené malým otevřením rotorových drážek a tím je pulsace indukce ve vzduchové mezeře pod hlavami zubů statoru minimální [6].

3.1.5 Dodatečné ztráty při zatížení

Dodatečné ztráty vznikají v asynchronních motorech jak ve vodičích, tak i v železe magnetického obvodu a jsou způsobené vířivými proudy. Tyto proudy jsou důsledkem rozptylových toků a pulsací indukce ve vzduchové mezeře. V rotorech nakrátko navíc vznikají ztráty způsobené příčnými proudy (proudů mezi tyčemi uzavírajícími se přes plechy rotorového svazku). U těchto strojů mohou způsobit přídavné ztráty při zatížení 1-2 % příkonu. Norma říká, že se u asynchronních strojů s kompenzačním vinutím uvažují dodatečné ztráty 0,5 % jmenovitého výkonu, bez kompenzačního vinutí 1 % [6].

Přepočet přídavných ztrát pro jiné zatížení než jmenovité:

$$\Delta P_d = \Delta P_{dN} * \left(\frac{I_1}{I_{1N}}\right)^2 \quad (3.5)$$

4 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

4.1 Snížení odporu statorového vinutí

Jak již bylo naznačeno v kapitole 3, ztráty ve statorovém vinutí jsou závislé na druhé mocnině procházejícího proudu a na odporu statorového vinutí. Z tohoto důvodu lze říci, že snížením odporu statorového vinutí, se sníží i Joulovy ztráty ve statoru.

Odpor statorového vinutí je závislý na mnoha faktorech, např. na materiálu vodiče, průměru vodiče, počtu závitů, délce jednoho závitu, teplotě vinutí a na zkrácení čel. Nejlepší metodou, jak snížit odpor, je zvýšení průřezu vodiče z důvodu menších úbytků.

Pokud je snížen počet závitů, nemusí vždy dojít ke snížení odporu vinutí a tím ke zvýšení účinnosti stroje. Se snížením počtu závitů dojde ke zvýšení sycení magnetického obvodu a klesne magnetizační indukčnost. Poté dojde k větším ztrátám v železe a nárůstu magnetizačního proudu, což může vést k tomu, že se Joulovy ztráty ve vinutí statoru naopak zvýší. Jestli je možné tento způsob použít pro snížení odporu statorového vinutí, ukazují zkoušky při jmenovitém zatížení a různém napájecím napětí.

Dalším způsobem, jak snížit odpor statorového vinutí, je použití axiálního prodloužení magnetického obvodu. Tato metoda však může zvýšit i velikost stroje, protože ne vždy lze zabudovat nový magnetický obvod do stávající kostry stroje. V některých případech tento způsob nelze použít kvůli malému montážnímu prostoru [7].

4.2 Snížení odporu klece

Stejně jako v předešlé kapitole jsou i v tomto případě ztráty v kleci reprezentovány Joulovými ztrátami. To znamená, že s klesajícím jmenovitým výkonem se tyto ztráty zmenšují. U strojů s výkonem kolem 600 W jsou tyto ztráty rovny cca 20 % celkových ztrát v motoru. Aby došlo k minimalizaci těchto ztrát, je potřeba snížit odpor částí klece. Na odpor klece má vliv např. materiál, rozměry a teplota rotoru.

Klece, u malých asynchronních motorů s kotvou nakrátko, jsou vyráběny z hliníku, mědi nebo kombinací mědi a hliníku. Nejpoužívanější jsou hliníkové klece, jelikož jsou nejlevnější. Účinnější a dražší jsou klece vyrobené z mědi. Tyto měděné klece jsou buď odlity, nebo jsou složeny z tyčí a kruhů, které jsou k sobě svařeny natrvalo. Při použití takovéto klece dojde ke snížení záběrového momentu

(zvýšení záběrového proudu) kvůli snížení rotorového odporu. Tento problém se dá částečně řešit změnou tvaru drážky. Poslední možností jsou klece vyrobené kombinací mědi a hliníku. Tato konstrukce je tvořena tyčemi, které jsou samostatně vyrobené z mědi a poté jsou vsazeny do rotorových drážek před odlitím hliníkové klece.

Snížení odporu hliníkové klece se dá dosáhnout také změnou technologie odlévání klece. Pokud se nahradí tlakové lití za odstředivé odlévání, může se zamezit řadě vad při výrobě, které zvyšují odpor rotoru.

Další možnosti jak snížit odpor klece, je zvýšením kruhů nakrátko nebo změnou velikosti drážek [7].

4.3 Vhodná velikost vzduchové mezery

Volba velikosti vzduchové mezery mezi statorem a rotorem je velmi důležitý faktor určující zda se zvýší účinnost stroje či nikoliv. Pokud je vzduchová mezera co nejmenší, zvětšuje se účinník, a tím se zmenšují ztráty ve statorovém vinutí. Avšak pokud je vzduchová mezera příliš malá, zvětšují se povrchové a pulsní ztráty. Proto se často účinnost motoru s malými vzduchovými mezerami nezlepšuje, ale naopak zhoršuje.

Při návrhu konstrukce asynchronních motorů se volí vzduchová mezera tak, aby byly výsledné ztráty minimální, proto se při výpočtu vzduchové mezery hledá optimální vzájemný poměr mezi ztrátami statorového vinutí ku pulsním a povrchovým ztrátám. Tento výpočet se provádí nejčastěji pomocí algoritmů na počítači, ale návrh vzduchové mezery lze provést i bez počítače, pomocí následujících vztahů [6]:

Pro motory o výkonech do 20kW a $2p = 2$:

$$\delta = (0,3 + 1,5D)10^{-3} \quad (4.1)$$

Pro motory $2p \geq 4$:

$$\delta = (0,25 + D)10^{-3} \quad (4.2)$$

Pro motory o středních a velkých výkonech:

$$\delta = \frac{D}{1,2} \left(1 + \frac{9}{2p} \right) 10^{-3} \quad (4.3)$$

Podle normy se vzduchová mezera vypočtena z výše uvedených vztahů zaokrouhluje na 0,05 mm při mezerách $\delta < 0,5$ mm a na 0,1 mm při mezerách $\delta > 0,5$ mm. [6].

4.4 Axiální prodloužení magnetického obvodu

Axiální prodloužení magnetického obvodu se dá realizovat dvěma způsoby, a to prodloužit magnetický obvod a zachovat původní počet závitů cívek statorového vinutí nebo prodloužit magnetický obvod, a s tím i snížit počet závitů cívek na statorovém vinutí.

Pokud se zachová původní počet závitů, tak se momentová charakteristika změní a většinou se nedosáhne maxima účinnosti při jmenovitém zatížení. Proto je na místě při prodloužení magnetického obvodu snižovat počet závitů na statorovém vinutí.

Oba tyto způsoby změny téměř všechny parametry stroje, např. sycení magnetického obvodu, odebíraný proud, účinník, indukci ve vzduchové mezeře i hustotu proudu v rotorových tyčích. Pokud se tyto parametry stroje změní, změní se i elektromagnetické ztráty. Výhodou prodloužení magnetického obvodu je, že se dá použít vodič s větším průměrem, jelikož se s nižším plněním statorových drážek, zvětší místo ve stroji. Nevýhodou však je, že je vyšší spotřeba materiálu a na základě toho i výrobní náklady stroje [7].

4.5 Snížení měrných ztrát v magnetickém obvodu

Měrné ztráty jsou definovány jako ztráty, vznikající ve feromagnetiku při střídavém magnetování, je-li maximální hodnota magnetické indukce rovna $B = 1$ T nebo 1,5 T a kmitočet magnetického pole $f = 50$ Hz. Tyto ztráty zpravidla uvádí výrobce plechů a slouží pro výpočet ztrát v železe, které představují u asynchronních motorů (600 W) cca 20 % celkových ztrát. Ztráty v železe se dají redukovat použitím materiálu s menšími měrnými ztrátami, nicméně s klesajícími měrnými ztrátami se snižují magnetické vlastnosti použitého materiálu. Například použití úzkých plechů se sníží magnetizační indukčnost nebo použití plechů se zvýšeným obsahem křemíku zase zapříčiní vyšší opotřebení prostřihovadla, které nám zvýší výrobní náklady stroje [7], [8].

4.6 Vhodný tvar a velikost drážek

U asynchronních strojů je nutné správně volit tvar a rozměry drážek, aby velikost drážek odpovídala počtu a rozměrům vodičů, které jsou v ní uložené, a také aby hodnoty rozptylové indukčnosti a magnetické indukčnosti byly v optimálních mezích.

Ideální tvar drážek je velmi složité najít, ale k vyřešení tohoto problému se používají různé algoritmy nebo kombinace simulace a analytického výpočtu. Nejčastěji se používají simulace metodou konečných prvků (program ANSYS). Tvarem drážky se dá ovlivnit celá řada parametrů, např.: ztráty v železe, Joulovy ztráty v kleci a celou momentovou charakteristiku. Při hledání ideálního tvaru drážky se nemusí vždy zvyšovat primárně účinnost stroje, ale také může dojít ke zvýšení záběrného momentu [6], [7].

4.7 Snížení mechanických ztrát

Mechanické ztráty jsou zastoupeny třecími ztrátami v ložiskách, třením rotoru o vzduch a ventilačními ztrátami [6].

4.7.1 Tření rotoru o vzduch

Aby došlo ke snížení ztrát způsobených třením rotoru o vzduch, musí být rotor motoru uzavřen do vakua. Tato metoda je velmi složitá, ale využívá se například u gyroskopů, kde celkový výkon motoru zahrnuje z velké části mechanické ztráty. Z tohoto důvodu je snahou tyto mechanické ztráty snížit na minimum [12].

4.7.2 Ventilační ztráty

Se zvyšujícím se výkonem a rozměrem stroje roste tepelné zatížení na chladicí povrch, což vede k nutnosti zvýšení intenzity chlazení (zvýšení účinnosti chlazení ventilátoru).

Ventilační systém stroje se dělí na stroje s vlastní ventilací a na stroje s nezávislou ventilací. Stroje s vlastní ventilací využívají proudění chladiva, uvedeného do pohybu pomocí ventilátoru umístěného na rotoru. U strojů s nezávislou ventilací je chladicí medium hnáno do stroje pomocí ventilátorů nebo čerpadel, poháněným vlastním motorem.

Nejčastěji používaným ventilátorem ve ventilačním systému je ventilátor radiální. Radiální ventilátor produkuje tlak, který je nejvíce podobný charakteru ventilačních systémů. Hlavní výhodou je, že se dá použít u strojů s oběma směry otáčení, avšak nevýhodou je, že tento ventilátor má poměrně malou účinnost $\eta=20\%$. Méně častými jsou axiální ventilátory, které se používají zpravidla u vysokorychlostních strojů. Jejich účinnost se pohybuje okolo $\eta=55\%$, ale obecně je navržený pouze k jednomu směru otáčení.

Konstrukce ventilátorů musí být dostatečně tuhá a rovněž musí mít zaoblené vstupní a výstupní hrany lopatek a okraje otvorů na vstupu a výstupu vzduchu. Při návrhu ventilačního systému je důležité, aby nedocházelo k víření vzduchu, náhlým změnám průřezu vzduchovodu a změnám směru proudění vzduchu, protože tyto faktory ovlivňují celkovou účinnost ventilátoru [12], [6].

4.8 Praktické ověření zvýšení účinnosti asynchronního motoru

Tato kapitola bude vycházet z poznatků dizertační práce [7] pana ing. Macha, Ph.D., kde prakticky testoval různé metody zvýšení účinnosti malých asynchronních motorů.

Do mé bakalářské práce je vybráno 5 typů úprav (Tab. 4.1), které budou detailně popsány a porovnány se standardně vyráběným motorem firmy ATAS z práce [7].

Typ úpravy	$I_{Fe-\%}$ [%]	$N_{\%}$ [%]	$D_{\%}$ [%]	$R_{s-\%}$ [%]	$R_{t-\%}$ [%]
Standardně vyráběný motor	100	100	100	100	100
Vzorek č. 1: Prodloužený mag. obvod, snížený počet závitů, zvýšený průměr vodiče statorového vinutí	116,67	93,48	113,21	77,09	73,87
Vzorek č. 2: Měděná klec	100	100	100	99,63	99,88
Vzorek č. 3: Žíhané plechy typu M700-50A	100	100	100	96,52	94,32
Vzorek č. 4: Plechy typu M270-35A, zvýšený průměr vodiče statorového vinutí	100	100	113,21	77,09	74,40
Vzorek č. 5: Žíhané plechy typu M270-35A, zvýšený průřez vodiče a snížený počet závitů	100	96,74	113,21	75,45	73,71

Tab. 4.1: Přehled úprav provedených na měřených vzorcích.

4.8.1 Vzorek č. 1- prodloužený magnetický obvod, snížený počet závitů, zvýšený průměr vodiče statorového vinutí

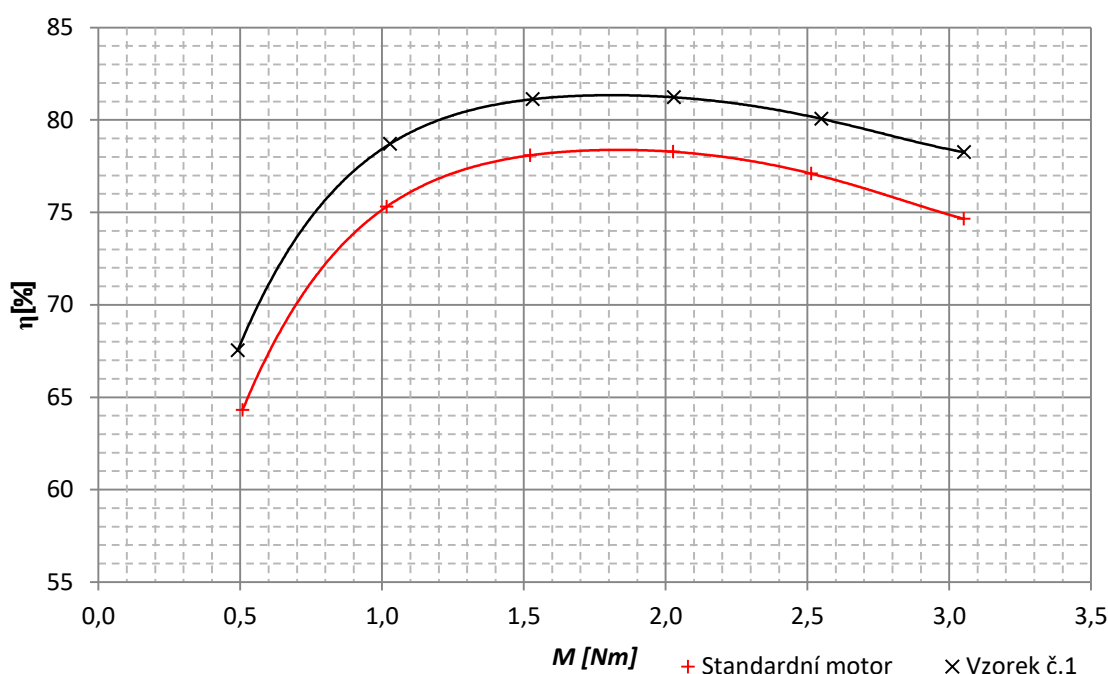
Z Tab. 4.1 je zřejmé, že pokud dojde u prvního vzorku ke zvýšení průřezu vodiče (cca o 13,21 %), snížení počtu závitů (cca o 6,52%) a prodloužení magnetického obvodu (cca o 16,67%), dojde k výraznému snížení odporu statorového vinutí. Nižší odpor statorového vinutí má za následek snížení Joulových ztrát a zvýšení účinnosti motoru.

N_k	I	$\cos \varphi$	P_{1-k}	η_k	ΔP_k	ΔP_{js-k}	ΔP_{Fe}	ΔP_{jr-k}	ΔP_{mech}	$\Delta P_{př.}$
[min ⁻¹]	[A]	[-]	[W]	[%]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
2844,7	1,403	0,790	768,9	78,4	166,3	82,6	30,2	33,9	13,6	6,1
2856,1	1,362	0,795	749,1	81,3	140,4	56,2	31,1	31,6	13,9	7,9

Tab. 4.2: Porovnání výsledků měření standardně vyráběného motoru (první řádek tabulky) a vzorku č. 1 (druhý řádek tabulky) při jmenovitém zatížení [7].

Pokud je vzorek č. 1 porovnán se standardně vyráběným motorem, došlo by se k závěru, že nejvíce klesly Joulovy ztráty ve vinutí statoru, a to o 26,4 W (Tab. 4.2). Pokles Joulových ztrát ve vinutí statoru je způsoben nižším odporem statorového vinutí a nižším protékajícím proudem než u standardně vyráběného motoru. Dále také klesly Joulovy ztráty v kleci, a to díky zvýšeným otáčkám motoru. Ztráty v železe se však zvýšily, a to o 0,9 W. Tento fakt je způsoben prodlouženým magnetickým obvodem (vyšší objem magnetického obvodu). Celkově ztráty nově navrženého motoru klesly o 26,4 W a účinnost se zvýšila o 2,9 %.

Průběhy účinností obou motorů s rostoucí zátěží jsou vyneseny v Obr. 4.1, z kterého je patrné, že ve všech měřených bodech je účinnost vzorku vyšší než u původního stroje [7].



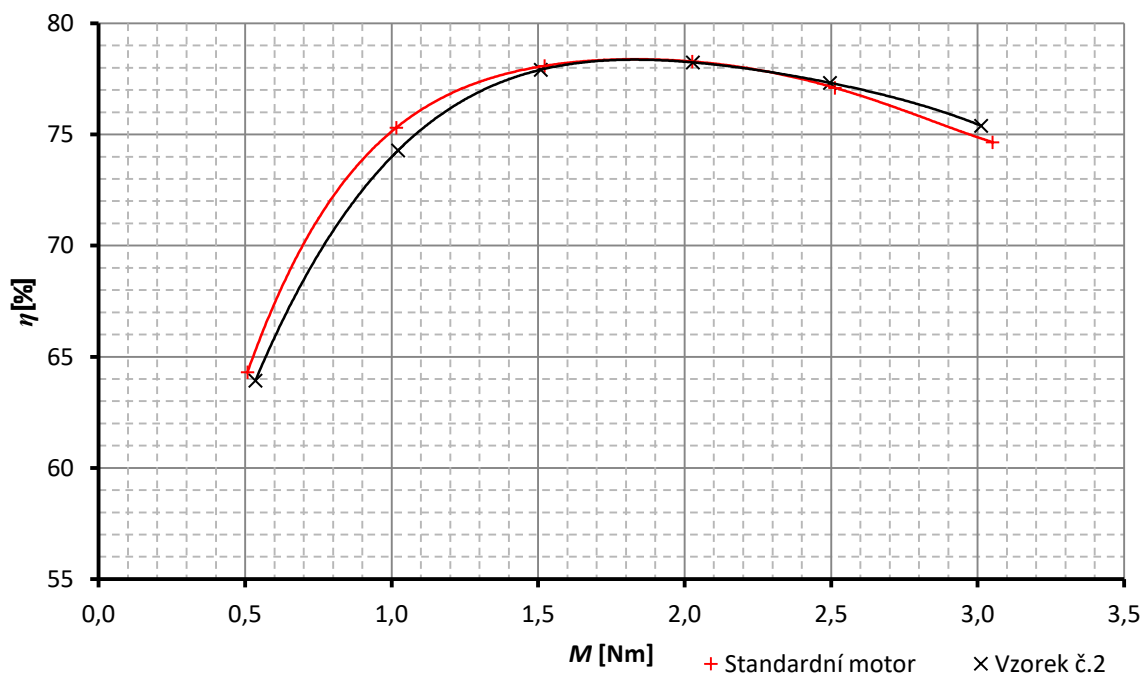
Obr. 4.1: Srovnání účinností na zatížení vzorku č. 1 a standardně vyráběného motoru [7].

4.8.2 Vzorek č. 2 – měděná klec

U tohoto vzorku je vyměněna hliníková klec standardně vyráběného motoru z práce [7] za klec měděnou, která není odlita kvůli technologické náročnosti, ale je vyrobena z jednotlivých měděných částí, které jsou k sobě svařeny. Měděné tyče mají menší průřez oproti původním hliníkovým tyčím, z důvodu jejich způsobu výroby.

n_k	I	$\cos \varphi$	P_{1-k}	η_k	ΔP_k	ΔP_{Js-k}	ΔP_{Fe}	ΔP_{Jr-k}	ΔP_{mech}	$\Delta P_{př.}$
$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{A}]$	$[-]$	$[\text{W}]$	$[\%]$	$[\text{W}]$	$[\text{W}]$	$[\text{W}]$	$[\text{W}]$	$[\text{W}]$	$[\text{W}]$
2844,7	1,403	0,79	768,9	78,4	166,3	82,6	30,2	33,9	13,6	6,1
2859,1	1,442	0,776	779,7	77,8	173,2	86,8	36,5	30,6	13,1	6,1

Tab. 4.3: Porovnání výsledků měření standardně vyráběného motoru (první řádek tabulky) se vzorkem č. 2 (druhý řádek tabulky). [7].



Obr. 4.2: Srovnání účinností na zatížení vzorku č. 2 a standardně vyráběného motoru [7].

Z Tab. 4.3 lze vidět, že se použitím měděné klece snížila účinnost asynchronního motoru při jmenovitém zatížení o 0,6 %. Pokles účinnosti, je následkem zvýšených ztrát v železe o 6,3 W, které mohou mít souvislost s výrobou klece (svařováním). Mohlo dojít např. k přivaření plechů ke kleci nebo k poškození izolace mezi plechy vlivem vysokých teplot. Všechny tyto vlivy by zvýšily hodnoty vířivých proudů, které by vedly k nárůstu ztrát v železe. Dalšími ztrátami, které se zvýšily o 4,2 W, jsou Joulovy ztráty ve statorovém vinutí. Tyto ztráty vzrostly z důvodu zvýšení proudu o 0,039 A. Ztráty v kleci klesly o 3,3 W, díky nižšímu odporu kotvy.

Obr. 4.2 znázorňuje závislost účinnosti na momentu standardně vyráběného motoru a vzorku č. 2. Z této grafické závislosti lze vyčíst, že účinnost vzorku č. 2 je ve všech měřených bodech s výjimkou bodu s největší zátěží stejná nebo nižší [7].

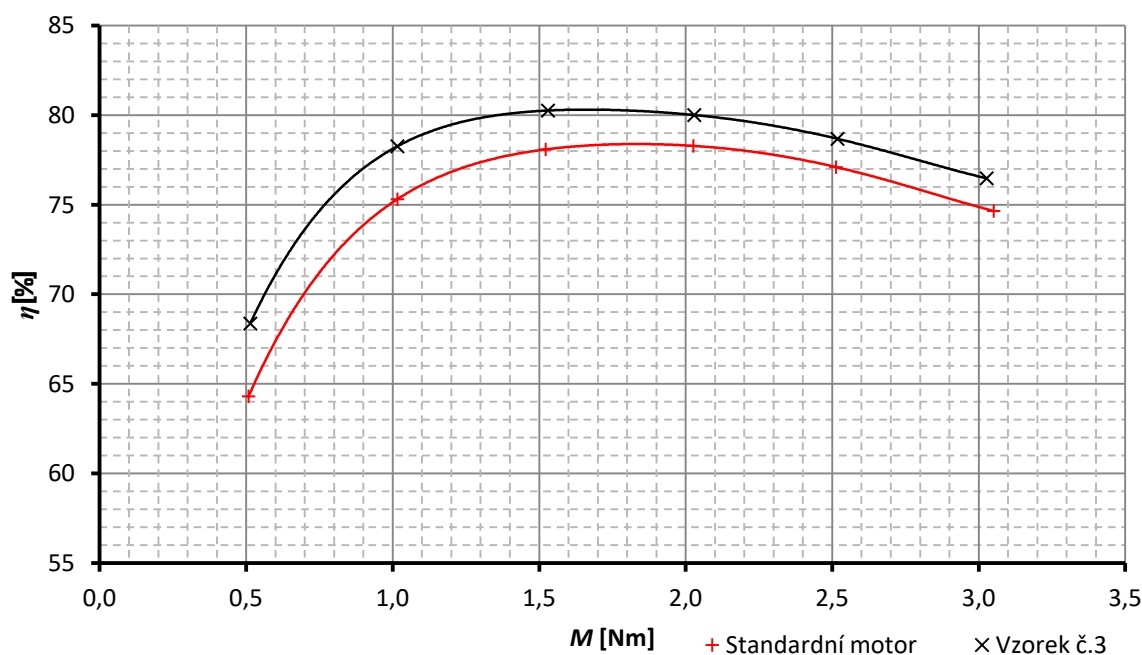
4.8.3 Vzorek č. 3 – žíhané plechy typu M700-50A

U vzorku č. 3 jsou statorové i rotorové plechy typu M700-50A nahrazeny žíhanými plechy. Výměna standardních plechů za žíhané plechy stejného typu byla provedena z důvodu odstranění negativního vlivu stříhání, který ovlivňuje vlastnosti plechů. Při znovu zhotovení vinutí také došlo ke zkrácení čel, následkem odlišného způsobu výroby vinutí. Tato změna se projevila nižším odporem statorového vinutí- viz. *Tab. 4.1*.

n_k	I	$\cos \varphi$	P_{1-k}	η_k	ΔP_k	ΔP_{Js-k}	ΔP_{Fe}	ΔP_{Jr-k}	ΔP_{mech}	$\Delta P_{př.}$
[min ⁻¹]	[A]	[-]	[W]	[%]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
2844,7	1,403	0,79	768,9	78,4	166,3	82,6	30,2	33,9	13,6	6,1
2855,4	1,35	0,806	756,2	80	151,3	72	26,5	31,3	14,2	7,3

Tab. 4.4: Porovnání výsledků měření standardně vyráběného motoru (první řádek tabulky) se vzorkem č. 2 (druhý řádek tabulky) [7].

Jak si lze všimnout z *Tab. 4.4* u vzorku č. 3 došlo ke zvýšení účinnosti o 1,6 % vůči standardně vyráběnému motoru z práce [7]. Účinnost tohoto vzorku se především zvýšila díky nižšímu odporu statorového vinutí a nižšímu protékajícímu proudu. Snížením těchto parametrů má za následek snížení Joulových ztrát ve statorovém vinutí (tyto ztráty klesly o 10,6 W). Dále také klesly ztráty v železe o 3,7 W a Joulovy ztráty v kleci o 2,6 W. Snížení těchto ztrát je způsobeno nižším skluzem. Mechanické ztráty a přídatné ztráty se naopak zvýšily o 0,6 W a 1,2 W.



Obr. 4.3: Srovnání účinností na zatížení vzorku č. 3 a standardně vyráběného motoru [7].

Na Obr. 4.3 lze vidět, že použitím žíhaných plechů, je účinnost vzorku č. 3 ve všech měřených bodech vyšší než u standardně vyráběného motoru [7].

4.8.4 Vzorek č. 4 - plechy typu M270-35A, zvýšený průměr vodiče statorového vinutí

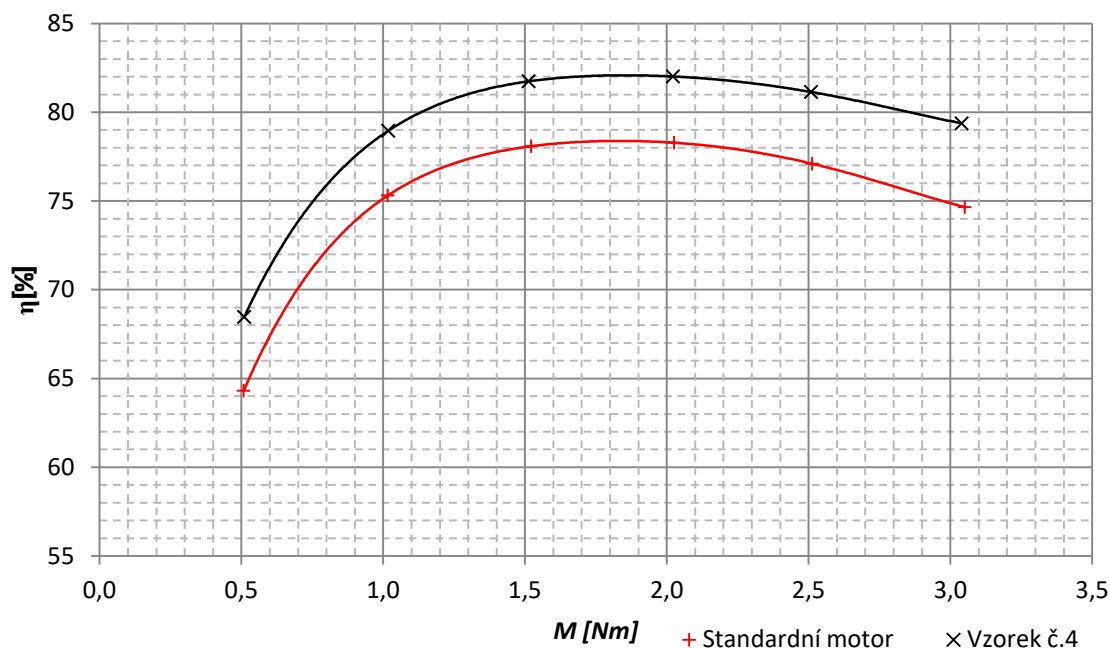
U vzorku č. 4 je zvýšen průřez vodiče statorového vinutí a jsou vyměněny statorové i rotorové plechy typu M700-50A, ze standardně vyráběného motoru z práce [7], za plechy typu M270-35A, které mají nižší měrné ztráty. Nevýhodou těchto plechů je nižší plnění železa (původní šířka plechů M700-50A byla 0,5 mm a u nových plechů M270-35A je 0,35 mm).

N_k	I	$\cos \varphi$	P_{1-k}	η_k	ΔP_k	ΔP_{js-k}	ΔP_{Fe}	ΔP_{jt-k}	ΔP_{mech}	$\Delta P_{př.}$
[min ⁻¹]	[A]	[-]	[W]	[%]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
2844,7	1,403	0,79	768,9	78,4	166,3	82,6	30,2	33,9	13,6	6,1
2858,2	1,473	0,725	741,5	81,6	136,3	67,5	21,1	31,1	12,2	4,3

Tab. 4.5: Porovnání výsledků měření standardně vyráběného motoru (první řádek tabulky) s motorem, který má statorové i rotorové plechy jiného typu (druhý řádek tabulky) [7].

Výměnou plechů typu M700-50A za plechy typu M270-35A došlo k tomu, že ztráty v železe klesly o 9,1 W. To je způsobeno díky nižším měrným ztrátám, které tyto plechy mají (plech typu M700-50A má ztráty 7 W/kg, plech typu M270-35A má ztráty 2,7 W/kg). Dále také klesly Joulovy ztráty ve vinutí statoru. Pokles těchto ztrát je způsoben nižším odporem statorového vinutí, v důsledku zvýšení průřezu vodiče vinutí. Joulovy ztráty v kleci klesly o 2,8W. To je způsobeno nižším skluzem oproti standardně vyráběnému motoru. Celková účinnost nově navrženého stroje se zvýšila cca o 3,2% při jmenovitém zatížení.

Na Obr 4.4 lze vidět průběh účinností motorů při zvyšující se zátěži. Účinnost vzorku č. 4 je po celou dobu zatěžování vyšší než účinnost standardně vyráběného motoru. [7]



Obr. 4.4: Srovnání účinností na zatížení vzorku č. 4 a standardně vyráběného motoru [7].

4.8.5 Vzorek č. 5 - Žíhané plechy typu M270-35A, zvýšený průřez vodiče a snížený počet závitů

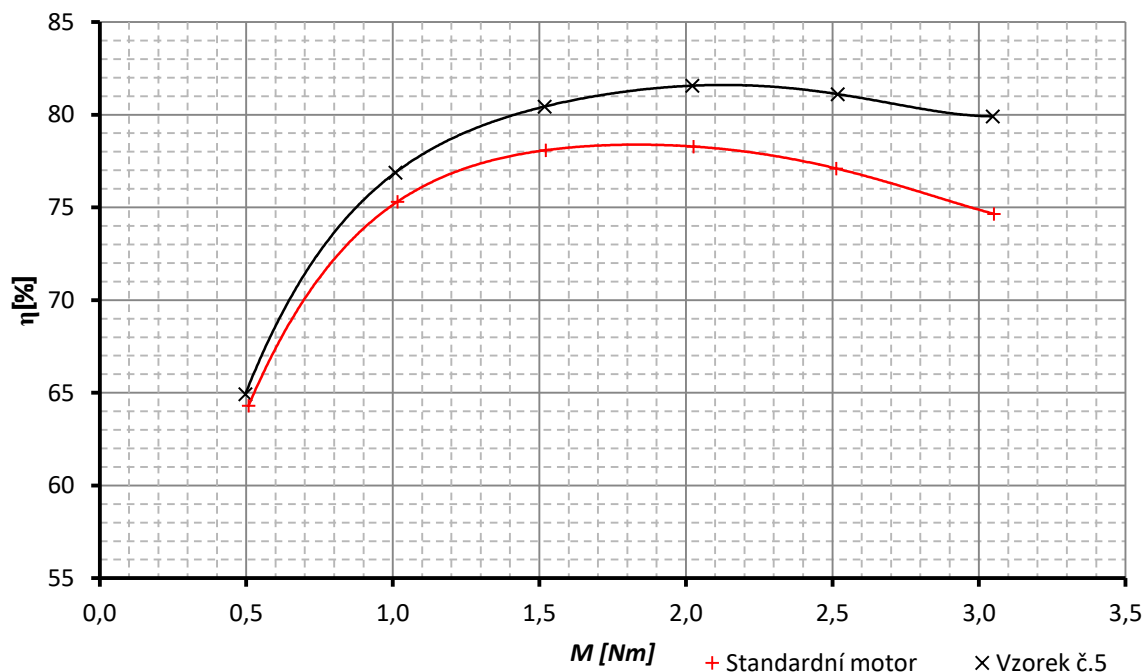
U tohoto vzorku byl zvýšen průřez vinutí cca o 13,21% a snížený počet závitů asi o 3.21% oproti standardně vyráběnému motoru z práce [7]. Další provedenou úpravou na tomto vzorku je výměna statorových i rotorových plechů typu M700-50A za plechy typu M270-35A, které mají nižší měrné ztráty. Nové plechy byly po vystřížení navíc i žíhány. Výměna standardních plechů za žíhané plechy byla provedena z důvodu odstranění negativního vlivu stříhání, který ovlivňuje vlastnosti plechů. Při znovu zhotovení vinutí také došlo ke zkrácení čel, v důsledku odlišného způsobu výroby vinutí. Tyto změny v konstrukci způsobily snížení odporu statorového vinutí- viz. Tab. 4.1.

n_k	I	$\cos \varphi$	P_{1-k}	η_k	ΔP_k	ΔP_{js-k}	ΔP_{Fe}	ΔP_{jr-k}	ΔP_{mech}	$\Delta P_{př.}$
[min ⁻¹]	[A]	[-]	[W]	[%]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
2844,7	1,403	0,79	768,9	78,4	166,3	82,6	30,2	33,9	13,6	6,1
2873,7	1,543	0,701	750,5	81,2	141,5	73,4	22	27,6	15,1	3,3

Tab. 4.6: Porovnání výsledků měření standardně vyráběného motoru (první řádek tabulky) se vzorkem č. 5 (druhý řádek tabulky) při jmenovitém zatížení [7].

V porovnání se standardně vyráběným motorem, se u vzorku č. 5 zvýšila účinnost o 2,8%. Takto zvýšená účinnost je způsobená především kvůli značnému snížení ztrát v železe a ztrát ve statorovém vinutí a to díky použití žíhaných plechů

typu M270-35A a zvýšení průřezu statorového vinutí. Dále také klesly Joulovy ztráty v kleci. To je způsobené zvýšením otáček motoru (snížení skluzu) při jmenovitém zatížení.



Obr. 4.5: Srovnání účinností na zatížení vzorku č. 5 a standardně vyráběného motoru [7].

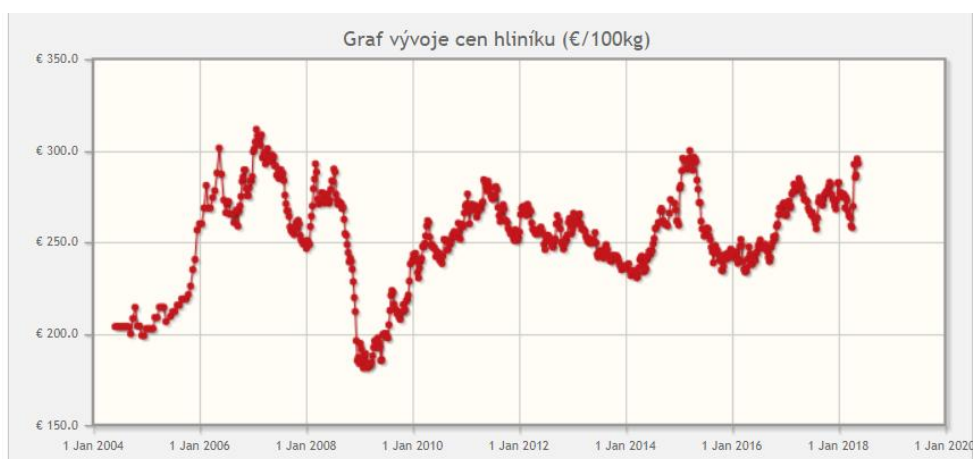
Na Obr. 4.6 je zřejmé, že vzorek č. 5 má ve všech měřených bodech vyšší účinnost než standardně vyráběný motor z práce [7]. Dále lze vypožorovat, že s klesající zátěží mají vzorky menší rozdíl účinností.

5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY MOTORŮ

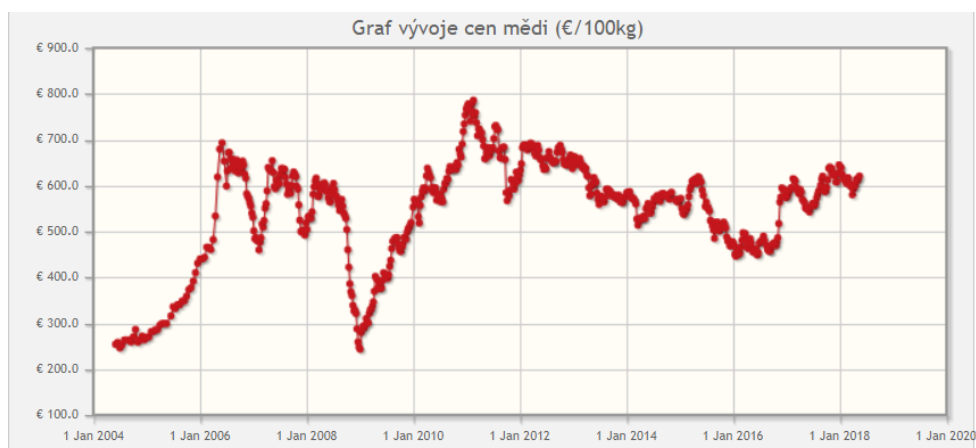
Jakákoliv úprava standardně vyráběného asynchronního motoru kterékoliv firmy vedoucí ke zvýšení účinnosti má dopad na výrobní náklady motoru. Z tohoto důvodu je velmi důležité zjistit, zda-li má nově navržený motor tak dobré parametry, aby se ho vyplatilo vyrábět kvůli finanční dostupnosti na trhu.

5.1 Ceny surovin a materiálů pro výrobu motorů

Velmi důležitým faktorem, který má značný vliv na výrobní náklady motoru, je aktuální cena použitých surovin. Vývoj cen primárních surovin např. hliníku a mědi lze vidět na *Obr. 5.1* a na *Obr. 5.2*. Ceny těchto surovin se neustále mění v závislosti na růstu či poklesu světové ekonomiky (např. v lednu 2009 byla cena hliníku a mědi z důvodu ekonomické krize ve světě nejnižší). Aktuální světová cena hliníku datovaná ke dni 18. 5. 2018 je 2,92 €/kg a světová cena mědi je 6,2 €/kg.



Obr. 5.1: Vývoj ceny hliníku od roku 2004 po současnost [15].



Obr. 5.2: Vývoj ceny mědi od roku 2004 po současnost [15].

V elektrotechnice se cena měděného vodiče používaného pro výrobu vinutí motoru pohybuje okolo 7,1 €/kg viz. *Tab. 5.1*. V této tabulce jsou zastoupeny firmy jako DAHRENTRÁD a EDERFIL-BECKER, které tyto vodiče pouze vyrábí a dále distribuují, ale je zde i firma ATAS Náchod, která tyto vodiče kupuje od jiných firem a při výrobě svých motorů si kalkuluje tuto orientační cenu v tabulce. Ceny vodičů pro zhotovení vinutí se mění v závislosti na průměru vodiče, typu vodiče a objednaném množství.

Firma	Typ vodiče	Jednotková cena
		[€/kg]
ATAS Náchod	odič IEC 317-13 GR2*0,53	7,21
	Vodič IEC 317-13 GR2*0,60	7,15
DAHRENTRÁD	Vodič IEC 317-13 GR2*0,53	7,19
	Vodič IEC 317-13 GR2*0,60	7,10
EDERFIL-BECKER	Vodič IEC 317-13 GR2*0,53	6,94
	Vodič IEC 317-13 GR2*0,60	6,87

Tab. 5.1: Přehled cen měděných vodičů určených pro vinutí stroje

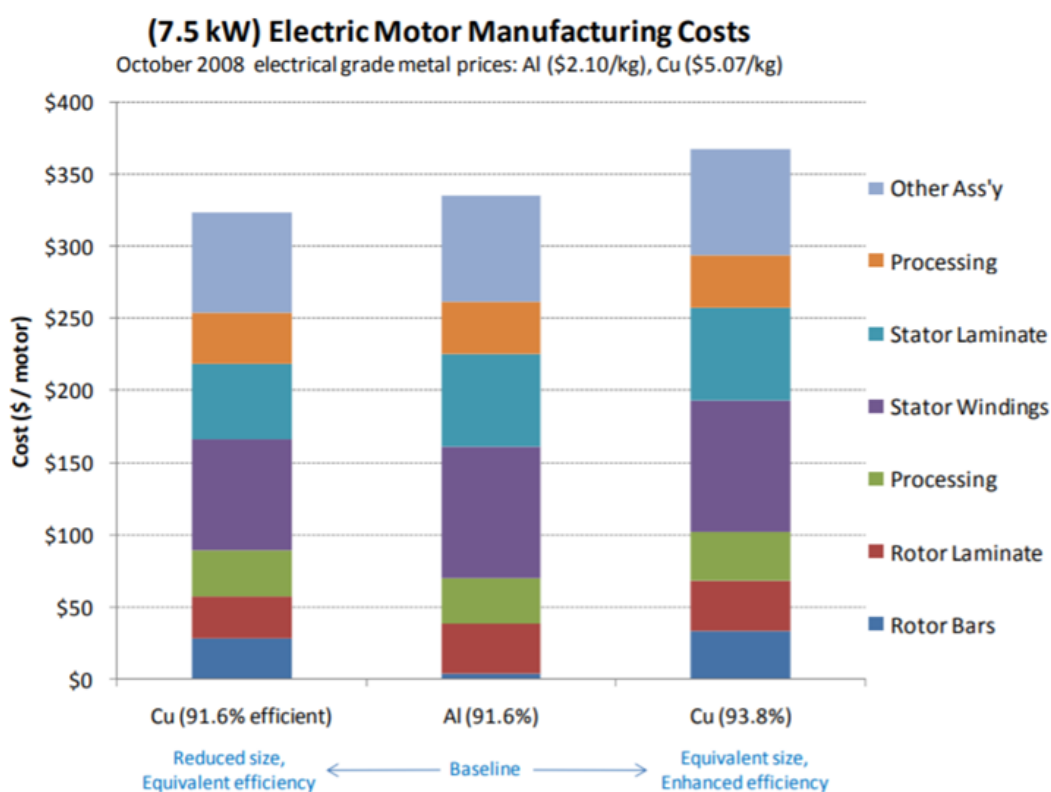
Výrobní náklady elektromotorů ovlivňuje i aktuální cena elektrotechnických plechů pro výrobu satorového a rotorového plechu. Ceny uvedené v *Tab. 5.2* jsou pouze orientační a mění se v závislosti na objednaném množství, použitém materiálu a termínu dodávky. Tyto ceny se pravidelně obměňují každého čtvrt až půl roku v závislosti na cenové úrovni předmateriálu z válcoven. Firmy Siemens a ATAS Náchod zmíněné v *Tab. 5.2* tyto elektrotechnické plechy neprodávají, ale používají je pouze pro vlastní spotřebu na výrobu svých motorů, proto se cena odlišuje od firem Grau-stanzwerk a Traseritalia, které tyto elektrotechnické plechy distribuují dalším firmám.

Firma	Cena plechu M800-50A	Cena plechu M700-50A	Cena plechu M270-35A	Cena plechu M250-35A
	[€/t]	[€/t]	[€/t]	[€/t]
Siemens	732	775	-	-
ATAS Náchod	-	885	2300	-
Grau-stanzwerk	920	960	1300	1500
Traseritalia	930	950	1300	1600

Tab. 5.2: Přehled cen elektrotechnických plechů

5.2 Konstrukční provedení

Další faktor, který velmi ovlivňuje výrobní náklady motoru, je samotné jeho provedení (typ klece, druh použitých plechů, tloušťka vodičů nebo typ použitého ventilátoru, atd.). Pokud je např. použit vodič s větším průřezem o 13,21% jako v kapitole 4.8.1, tak rovněž vzrostou náklady za použité vodiče v motoru. Tato úprava je však akceptovatelná, jelikož samotná účinnost motoru vzrostla o 3 %. S takto znatelně zvýšenou účinností se tyto zvětšené náklady na vodiče časem vykompenzují a přejdou do kladných čísel (viz. kapitola 6.5), nicméně pokud dojde k výměně klece jako v kapitole 4.8.2 a účinnost motoru je stejná ba naopak ještě nižší, určitě se nevyplatí investovat do měděné klece, která je materiálově cca 2x dražší než hliníková klec. Zdroj [14] ale uvádí, že použitím kvalitní měděné klece má mít motor přibližně o 2,5 % vyšší účinnost než motor s hliníkovou klecí. Pokud tímto způsobem dojde ke zvýšení účinnosti, může se motor zmenšit bez změny jmenovitého výkonu a výrobní náklady nakonec budou ještě nižší než u motoru s hliníkovou klecí. Dojde však k potlačení efektu zvýšené účinnosti motoru. Tuto skutečnost lze vidět na Obr. 5.3, kde je motor ze zdroje [14] s hliníkovou klecí dražší než zmenšený motor s měděnou klecí se stejnou účinností.



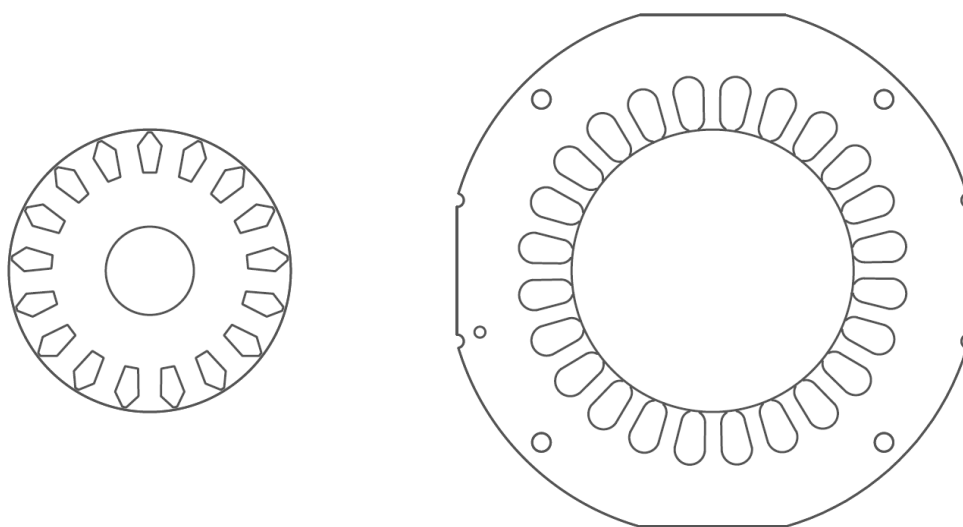
Obr. 5.3: Porovnání výrobních nákladů motoru s hliníkovou klecí a s klecí měděnou [14].

5.3 Výrobní proces

Na výrobní náklady má vliv i výrobní proces motoru, který se u jednotlivých typů liší. Použitím speciálních nástrojů pro vystřížení plechů statoru a rotoru se výrobní náklady na motor zvyšují. Například obvyčejné plechy jako u vzorku č. 1, č. 2 a č. 4 méně opotřebí stříhací nástroj, zatímco plechy žíhané u vzorku č. 3 a č. 5 opotřebí stříhací nástroj více a je potřeba jeho častější výměna. Pořizovací cena střížného nástroje je velmi vysoká a pohybuje se okolo 650 000 Kč. Dalším příkladem může být již zmiňovaná měděná klec, která musí být perfektně zhotovena, jinak nedojde k efektu zvýšení účinnosti jako v kapitole 4.8.2. Zhotovit měděnou klec je samozřejmě složitější než hliníkovou klec a to z důvodu, že měď má vyšší bod tání (1 085 °C) než hliník (660,3 °C) a k její výrobě je potřeba použít pece s vyšší výhřevností, které jsou také dražší.

6 VÝPOČET VÝROBNÍCH NÁKLADŮ POPSANÝCH VZORKŮ

V této kapitole se vychází z technické dokumentace pro výrobu standardně vyráběného motoru z práce [7] od firmy ATAS Náchod a popsaných vzorků. Technická dokumentace pro výrobu motoru firmy ATAS Náchod nebude přiložena k této bakalářské práci, z důvodu zachování autorských práv. Ilustrační obrázek statorového a rotorového plechu motoru z práce [7] lze vidět na *Obr. 6.1*.



Obr. 6.1 Ukázka řezu rotorového a statorového plechu

6.1 Výpočet hmotnosti vinutí, statorových a rotorových plechů standardně vyráběného motoru z práce [7] podle technické dokumentace.

Základní údaje:

délka magnetického obvodu $l_{FE} = 60 \text{ mm}$

průřez vodiče- $0,53 \text{ mm}^2$, $\rho_{cu} = 8\,960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

plechy typu M700-50A- $\rho_{M700-50A} = 7\,800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Hmotnost vinutí pro výrobu jednoho motoru:

$$r_{dr} = \frac{1}{2} \left(\frac{D_{si} + D_{ds0}}{2} \right) = \frac{1}{2} * \left(\frac{0,064 + 0,089}{2} \right) = 38,25 * 10^{-3} \text{ m}$$

$b_{ds} = 0,030 \text{ m}$

$$\begin{aligned}
l_{z1} &= \left(\frac{2\pi r_{dr}}{2p} \right) = \left(\frac{2 * \pi * 38,25 * 10^{-3}}{2} \right) \doteq 120,17 * 10^{-3} \text{ m} \\
l &= 2 * (l_{FE} + b_{ds}) + 2 * l_{z1} = 2 * (0,06 + 0,03) + 2 * 120,17 * 10^{-3} \\
&= 420,34 * 10^{-3} \text{ m} \\
L &= l * Q * Z = 420,34 * 10^{-3} * 12 * 92 \doteq 464,06 \text{ m} \\
V_{cu} &= S * L = \frac{(d_{cu})^2}{4} * \pi = \frac{(0,53 * 10^{-3})^2}{4} * \pi * 464,06 \doteq 1,02 * 10^{-4} \text{ m}^{-3} \\
m_{cu} &= V_{cu} * \rho_{cu} = 1,02 * 10^{-4} * 8\,960 \doteq 0,91 \text{ kg}
\end{aligned}$$

Hmotnost statorových plechů pro výrobu jednoho motoru:

$$\begin{aligned}
S_{cel.s.} &= \pi \frac{d_{cel}^2}{4} = \pi * \frac{(120,6 * 10^{-3})^2}{4} \doteq 11\,423,11 * 10^{-6} \text{ m}^2 \\
S_{drážekstat.} &= 67,7 * 10^{-6} * 24 = 1\,624,80 * 10^{-6} \text{ m}^2 \\
S_{šroub.} &= \pi \frac{d_{šroub.}^2}{4} * k = \pi * \frac{(4,2 * 10^{-3})^2}{4} * 4 \doteq 55,42 * 10^{-6} \text{ m}^2 \\
S_r &= \pi \frac{d_{r1}^2}{4} * k + \pi \frac{d_{r2}^2}{4} = \pi * \frac{(3 * 10^{-3})^2}{4} * 2 + \pi * \frac{(4 * 10^{-3})^2}{4} * \frac{1}{2} \\
&= 20,42 * 10^{-6} \text{ m}^2 \\
S_{vnitř.} &= \pi \frac{d_{vnitř.}^2}{4} = \pi * \frac{(64 * 10^{-3})^2}{4} = 3\,216,99 * 10^{-6} \text{ m}^2 \\
S_{ořez.} &= 203,12 \text{ mm}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{stat.plech.} &= S_{cel} - S_{drážek} - S_{šroub.} - S_r - S_{vnitř.} - S_{ořez.} = 11\,423,11 * 10^{-6} - \\
&1\,624,80 * 10^{-6} - 55,42 * 10^{-6} - 20,42 * 10^{-6} - 3\,216,99 * 10^{-6} - 203,12 * \\
&10^{-6} = 6\,302,36 * 10^{-6} \text{ m}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_{stat.plech.} &= S_{stat.plech.} * l_{stat.} * \rho_{M700-50A} = 6\,302,36 * 10^{-6} * 0,06 * 7\,800 \\
&\doteq 2,95 \text{ kg}
\end{aligned}$$

Hmotnost rotorových plechů pro výrobu jednoho motoru:

$$\begin{aligned}
S_{cel.r.} &= \pi \frac{d_{rot.}^2}{4} = \pi * \frac{(64 * 10^{-3})^2}{4} \doteq 3\,216,99 * 10^{-6} \text{ m}^2 \\
S_{hřidel.} &= \pi \frac{d_{hřidel.}^2}{4} = \pi * \frac{(20 * 10^{-3})^2}{4} \doteq 314,16 * 10^{-6} \text{ m}^2 \\
S_{drážek} &= 597,04 * 10^{-6} \text{ m}^2 \\
S_{rotor.plech.} &= S_{cel.r.} - S_{hřidel.} - S_{drážek} \\
&= 3\,216,99 * 10^{-6} - 314,15 * 10^{-6} - 597,04 * 10^{-6} \\
&= 2\,305,79 * 10^{-6} \text{ m}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_{rotor.plech.} &= S_{rotor.plech.} * l_{rotor.} * \rho_{M700-50A} = 2\,305,79 * 10^{-6} * 0,06 * 7\,800 \\
&\doteq 1,08 \text{ kg}
\end{aligned}$$

Celková hmotnost plechů M700-50A před vystřížením statorových a rotorových plechů na výrobu jednoho motoru:

$$m_{celk.} = a * b * c * d * \rho_{M700-50A} = 0,116 * 0,116 * 0,0005 * 120 * 7800 \doteq 6,29 \text{ kg}$$

Celková hmotnost plechů M700-50A po vystřížení statorových a rotorových plechů použitých na výrobu jednoho motoru:

$$m_{celk.motoru} = m_{rotor.plech.} + m_{stat.plech.} = 2,95 + 1,08 = 4,03 \text{ kg}$$

Zbýlý odpad po vystřížení statorových a rotorových plechů na výrobu jednoho motoru:

$$m_{odpadu} = m_{celk.} - m_{celk.motoru} = 6,29 - 4,03 = 2,26 \text{ kg}$$

6.2 Výpočet hmotnosti vinutí, statorových a rotorových plechů vzorku č. 1

Základní údaje:

počet závitů- 86

délka magnetického obvodu $l_{FE} = 70 \text{ mm}$

průřez vodiče- $0,60 \text{ mm}^2$, $\rho_{cu} = 8\,960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

plechy typu M700-50A, $\rho_{700-50A} = 7\,800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Hmotnost vinutí pro výrobu jednoho motoru:

$$r_{dr} = \frac{1}{2} \left(\frac{D_{si} + D_{ds0}}{2} \right) = \frac{1}{2} * \left(\frac{0,089 + 0,064}{2} \right) = 38,25 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$b_{ds} = 30 \text{ mm}$$

$$l_{z1} = \left(\frac{2\pi r_{dr}}{2p} \right) = \left(\frac{2 * \pi * 38,25 * 10^{-3}}{2} \right) \doteq 120,17 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$l = 2 * (l_{FE} + b_{ds}) + 2 * l_{z1} = 2 * (0,070 + 0,030) + 2 * 120,17 * 10^{-3} \\ = 440,34 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$L = l * Q * Z = 440,34 * 10^{-3} * 12 * 86 \doteq 454,42 \text{ m}$$

$$V_{cu} = S * L = \frac{(d_{cu})^2}{4} * \pi = \frac{(0,6 * 10^{-3})^2}{4} * \pi * 454,42 \doteq 1,28 * 10^{-4} \text{ m}^{-3}$$

$$m_{cu} = V_{cu} * \rho_{cu} = 1,28 * 10^{-4} * 8\,960 \doteq 1,15 \text{ kg}$$

Hmotnost statorových plechů pro výrobu jednoho motoru:

$$m_{stat.plech.} = S_{stat.plech.} * l_{stat.} * \rho_{M700-50A} = 6\,308,65 * 10^{-6} * 0,07 * 7\,800 \\ \doteq 3,44 \text{ kg}$$

Hmotnost rotorových plechů pro výrobu jednoho motoru:

$$m_{\text{rotor.plech.}} = S_{\text{rotor.plech.}} * l_{\text{rotor.}} * \rho_{M700-50A} = 2\,305,79 * 10^{-6} * 0,07 * 7\,800 \\ \doteq 1,26 \text{ kg}$$

Celková hmotnost plechů M700-50A před vystřížením statorových a rotorových plechů na výrobu jednoho motoru:

$$m_{\text{celk.}} = a * b * c * d * \rho_{M700-50A} = 0,116 * 0,116 * 5 * 10^{-4} * 140 * 7800 \\ \doteq 7,35 \text{ kg}$$

Celková hmotnost plechů M700-50A po vystřížení statorových a rotorových plechů použitých na výrobu jednoho motoru:

$$m_{\text{celk.motoru}} = m_{\text{rotor.plech.}} + m_{\text{stat.plech.}} = 1,26 + 3,44 = 4,70 \text{ kg}$$

Zbylý odpad po vystřížení statorových a rotorových plechů na výrobu jednoho motoru:

$$m_{\text{odpadu}} = m_{\text{celk.}} - m_{\text{celk.motoru}} = 7,35 - 4,70 = 2,65 \text{ kg}$$

6.3 Výpočet hmotnosti vinutí, statorových a rotorových plechů vzorku č. 4

Základní údaje:

počet závitů- 92

délka magnetického obvodu $l_{FE}=60 \text{ mm}$

průřez vodiče- $0,60 \text{ mm}^2$, $\rho_{cu}=8\,960 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

plechy typu M270-35A, $\rho_{M270-35A}=7\,600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Hmotnost vinutí pro výrobu jednoho motoru:

$$L \doteq 464,06 \text{ m} \\ V_{cu} = S * L = \frac{(d_{cu})^2}{4} * \pi = \frac{(0,6 * 10^{-3})^2}{4} * \pi * 464,06 \doteq 1,31 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$m_{cu} = V_{cu} * \rho_{cu} = 1,31 * 10^{-4} * 8\,960 \doteq 1,17 \text{ kg}$$

Hmotnost rotorových plechů pro výrobu jednoho motoru:

$$S_{\text{rotor.plech.}} = 2\,305,8 * 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$m_{\text{rotor.plech.}} = S_{\text{rotor.plech.}} * l_{\text{rotor.}} * \rho_{M270-35A} = 2\,305,8 * 10^{-6} * 0,06 * 7\,600 \\ \doteq 1,05 \text{ kg}$$

Hmotnost statorových plechů pro výrobu jednoho motoru:

$$\begin{aligned} S_{stat.plech.} &= 6\,308,65 * 10^{-6} \text{ m}^2 \\ m_{stat.plech.} &= S_{stat.plech.} * l_{stat.} * \rho_{M270-35A} = 6\,308,65 * 10^{-6} * 0,06 * 7\,600 \\ &\doteq 2,88 \text{ kg} \end{aligned}$$

Celková hmotnost plechů M270-35A před vystřížením statorových a rotorových plechů na výrobu jednoho motoru:

$$m_{celk.} = a * b * c * d * \rho_{M270-35A} = 0,116 * 0,116 * 0,0005 * 120 * 7600 \doteq 6,13 \text{ kg}$$

Celková hmotnost plechů M270-5A po vystřížení statorových a rotorových plechů použitých na výrobu jednoho motoru:

$$m_{celk.motoru} = m_{rotor.plech.} + m_{stat.plech.} = 1,05 + 2,88 = 3,93 \text{ kg}$$

Zbylý odpad po vystřížení statorových a rotorových plechů na výrobu jednoho motoru:

$$m_{odpadu} = m_{celk.} - m_{celk.motoru} = 6,13 - 3,93 = 2,2 \text{ kg}$$

6.4 Výpočet hmotnosti vinutí, statorových a rotorových plechů vzorku č. 5

Základní údaje:

počet závitů- 89

délka magnetického obvodu $l_{FE}=60 \text{ mm}$

průřez vodiče- $0,60 \text{ mm}^2$, $\rho_{cu}=8\,960 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

plechy typu M270-35A, $\rho_{M270-35A}=7\,600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Hmotnost vinutí pro výrobu jednoho motoru:

$$\begin{aligned} l &= 420,34 * 10^{-3} \text{ m} \\ L &= l * Q * Z = 420,34 * 10^{-3} * 12 * 89 \doteq 448,92 \text{ m} \\ V_{cu} &= S * L = \frac{(d_{cu})^2}{4} * \pi = \frac{(0,6 * 10^{-3})^2}{4} * \pi * 448,92 \doteq 1,27 * 10^{-4} \text{ m}^3 \\ m_{cu} &= V_{cu} * \rho_{cu} = 1,27 * 10^{-4} * 8\,960 \doteq 1,14 \text{ kg} \end{aligned}$$

Hmotnost rotorových plechů pro výrobu jednoho motoru:

$$m_{rotor.plech.} \doteq 1,05 \text{ kg}$$

Hmotnost statorových plechů pro výrobu jednoho motoru:

$$m_{stat.plech.} \doteq 2,88 \text{ kg}$$

Celková hmotnost plechů M270-35A před vystřížením statorových a rotorových plechů na výrobu jednoho motoru:

$$m_{celk.} = a * b * c * d * \rho_{M270-35A} = 0,116 * 0,116 * 0,0005 * 120 * 7600 \doteq 6,13 \text{ kg}$$

Celková hmotnost plechů M270-35A po vystřížení statorových a rotorových plechů použitých na výrobu jednoho motoru:

$$m_{celk.motoru} = m_{rotor.plech.} + m_{stat.plech.} = 1,05 + 2,88 = 3,93 \text{ kg}$$

Zbylý odpad po vystřížení statorových a rotorových plechů na výrobu jednoho motoru:

$$m_{odpadu} = m_{celk.} - m_{celk.motoru} = 6,13 - 3,93 = 2,2 \text{ kg}$$

6.5 Vyhodnocení výrobních nákladů

Typ vzorku	Spotřeba elektro-technického plechu		Výrobní náklady firmy Siemens		Výrobní náklady firmy ATAS Náchod		Výrobní náklady firmy Graustanzwerk		Výrobní náklady firmy Traseritalia	
	S odpadem	Bez opadu	S odpadem	Bez opadu	S odpadem	Bez opadu	S odpadem	Bez opadu	S odpadem	Bez opadu
	[kg]	[kg]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]
Standardně vyráběný motor (plech typu M700-50A)	6,29	4,03	4,87	3,12	5,57	3,57	6,04	3,87	5,98	3,83
Vzorek č. 1 (plech typu M700-50A)	7,35	4,70	5,70	3,64	6,50	4,16	7,06	4,51	6,98	4,47
Vzorek č. 4 (plech typu M270-35A)	6,13	3,93	-	-	14,10	9,04	7,97	5,11	7,97	5,11
Vzorek č. 5 (plech typu M270-35A)	6,13	3,93	-	-	14,10	9,04	7,97	5,11	7,97	5,11

Tab. 6.1: Přibližných výrobních nákladů elektrotechnických plechů pro jednotlivé vzorky (vychází se z Tab. 5.2).

Příklad výpočtu pro první řádek Tab. 6.1:

$$\begin{aligned} VNP_{siemens,s odpadem} &= \text{Spotřeba plechu} * \text{Nákupní cena plechu} \\ &= 6,29 * 10^{-3} * 775 \doteq 4,87 \text{ €} \end{aligned}$$

$$VNP_{siemens,bez opadu} = 4,03 * 10^{-3} * 775 \doteq 3,12 \text{ €}$$

$$\begin{aligned} VNP_{ATAS Náchod,s odpadem} &= \text{Spotřeba plechu} * \text{Nákupní cena plechu} \\ &= 6,29 * 10^{-3} * 885 \doteq 5,57 \text{ €} \end{aligned}$$

$$VNP_{\text{ATAS Náchod, bez odpadu}} = 4,03 * 10^{-3} * 885 \doteq 3,57 \text{ €}$$

$$\begin{aligned} VNP_{\text{Grau-stanzwerk, s odpadem}} &= \text{Spotřeba plechu} * \text{Nákupní cena plechu} \\ &= 6,29 * 10^{-3} * 960 \doteq 6,04 \text{ €} \end{aligned}$$

$$VNP_{\text{Grau-stanzwerk, bez odpadu}} = 4,03 * 10^{-3} * 960 \doteq 3,87 \text{ €}$$

$$\begin{aligned} VNP_{\text{Traseritalia, s odpadem}} &= \text{Spotřeba plechu} * \text{Nákupní cena plechu} \\ &= 6,29 * 10^{-3} * 950 \doteq 5,98 \text{ €} \end{aligned}$$

$$VNP_{\text{Traseritalia, bez odpadu}} = 4,03 * 10^{-3} * 950 \doteq 3,83 \text{ €}$$

Typ vzorku	Spotřeba vinutí	Výrobní náklady firmy ATAS Náchod	Výrobní náklady firmy DAHRENTRÁD	Výrobní náklady firmy EDERFIL-BECKER
	[kg]	[€]	[€]	[€]
Standardně vyráběný motor (IEC 317-13 GR2*0,53)	0,91	6,56	6,54	6,32
Vzorek č. 1 (IEC 317-13 GR2*0,60)	1,15	8,22	8,17	7,90
Vzorek č. 4 (IEC 317-13 GR2*0,60)	1,17	8,37	8,31	8,04
Vzorek č. 5 (IEC 317-13 GR2*0,60)	1,14	8,15	8,09	7,83

Tab. 6.2: Přibližných výrobních nákladů satorového vinutí pro jednotlivé vzorky (vychází se z Tab. 5.1).

Příklad výpočtu pro první řádek Tab. 6.2:

$$VNV_{\text{ATAS Náchod}} = \text{Spotřeba mědi} * \text{Nákupní cena vodiče} = 0,91 * 7,21 \doteq 6,56 \text{ €}$$

$$VNV_{\text{DAHRENTRÁD}} = \text{Spotřeba mědi} * \text{Nákupní cena vodiče} = 0,91 * 7,19 \doteq 6,54 \text{ €}$$

$$\begin{aligned} VNV_{\text{EDERFIL-BECKER}} &= \text{Spotřeba mědi} * \text{Nákupní cena vodiče} = 0,91 * 6,94 \\ &\doteq 6,32 \text{ €} \end{aligned}$$

Typ vzorku	Výrobní náklady (měď + plech)	Rozdíl výrobních nákladů	P_{1-k}	η	P_{2-k}	ΔP_k	Cena energie za 1 kWh	Cena ztrát stroje za 1hod	Úplná návratnost
	[€]	[€]	[W]	[%]	[W]	[W]	[€]	[€]	[hod]
Standardně vyráběný motor	12,13	2,59	768,9	78,4	602,82	166,08	0,042	6,98E-03	2355
Vzorek č. 1	14,72		749,1	81,3	609,02	140,08	0,042	5,88E-03	

Tab. 6.3: Výpočet počtu hodin do úplné finanční návratnosti vložené do úpravy vzorku č.1 po uvedení stroje do provozu podle výrobních nákladů firmy ATAS Náchod.

Příklad výpočtu pro první řádek Tab. 6.3:

$$\begin{aligned}
 VN_{SVM} &= VNP_{ATAS \text{ Náchod},s \text{ odpadem}} + VNV_{ATAS \text{ Náchod}} = 5,57 + 6,56 \doteq 12,13 \text{ €} \\
 RVN &= VN_{v.č.1} - VN_{SVM} = 14,72 - 12,13 \doteq 2,59 \text{ €} \\
 P_{2-k,SVM} &= P_{1-k} * \eta = 768,9 * 78,4 * 10^{-2} \doteq 602,82 \text{ W} \\
 \Delta P_k &= P_{1-k} - P_{2-k} = 768,9 - 602,82 \doteq 166,08 \text{ W} \\
 CZS_{1hod,SVM} &= \Delta P_k * CE_{1kWh} = 166,08 * 10^{-3} * 0,042 \doteq 6,98 * 10^{-3} \text{ €} \\
 \dot{U}N &= \frac{RVN}{24 * CZS_{1hod,SVM} - 24 * CZS_{1hod,v.č.1}} = \frac{2,59}{24 * 6,98 * 10^{-3} - 24 * 5,88 * 10^{-3}} \\
 &\doteq 98,11 \text{ dní} \approx 2355 \text{ hodin}
 \end{aligned}$$

Typ vzorku	Výrobní náklady (měď + plech)	Rozdíl nákladů	P_{1-k}	η	P_{2-k}	ΔP_k	Cena energie za 1 kWh	Cena ztrát stroje za 1hod	Úplná návratnost
	[€]		[W]	[%]	[W]	[W]	[€]	[€]	[hod]
Standardně vyráběný motor	12,13	10,34	768,9	78,4	602,82	166,08	0,042	6,98E-03	8272
Vzorek č. 4	22,47		741,5	81,6	605,06	136,44	0,042	5,73E-03	

Tab. 6.4: Výpočet počtu dní do úplné finanční návratnosti vložené do úpravy vzorku č.4 po uvedení stroje do provozu podle výrobních nákladů firmy ATAS Náchod.

Příklad výpočtu pro první řádek Tab. 6.4:

$$\begin{aligned}
 VN_{SVM} &= VNP_{ATAS \text{ Náchod},s \text{ odpadem}} + VNV_{ATAS \text{ Náchod}} = 5,57 + 6,56 \doteq 12,13 \text{ €} \\
 RVN &= VN_{V.č.4} - VN_{SVM} = 22,47 - 12,13 \doteq 10,34 \text{ €} \\
 P_{2-k,SVM} &= P_{1-k} * \eta = 768,9 * 78,4 * 10^{-2} \doteq 602,82 \text{ W} \\
 \Delta P_k &= P_{1-k} - P_{2-k} = 768,9 - 602,82 \doteq 166,08 \text{ W} \\
 CZS_{1hod,SVM} &= \Delta P_k * CE_{1kWh} = 166,08 * 10^{-3} * 0,042 \doteq 6,98 * 10^{-3} \text{ €} \\
 \dot{U}N &= \frac{RVN}{24 * CZS_{1hod,SVM} - 24 * CZS_{1hod,v.č.1}} = \frac{10,34}{24 * 6,98 * 10^{-3} - 24 * 5,73 * 10^{-3}} \\
 &\doteq 344,7 \text{ dní} \approx 8272 \text{ hodin}
 \end{aligned}$$

Typ vzorku	Výrobní náklady (měď + plech)	Rozdíl nákladů	P_{1-k}	η	P_{2-k}	ΔP_k	Cena energie za 1 kWh	Cena ztrát stroje za 1hod	Úplná návratnost
	[€]		[W]	[%]	[W]	[W]	[€]	[€]	[hod]
Standardně vyráběný motor	12,13	10,12	768,9	78,4	602,82	166,08	0,042	6,98E-03	9639
Vzorek č. 5	22,25		750,5	81,2	609,41	141,09	0,042	5,93E-03	

Tab. 6.5: Výpočet počtu dní do úplné finanční návratnosti vložené do úpravy vzorku č.5 po uvedení stroje do provozu podle výrobních nákladů firmy ATAS Náchod.

Příklad výpočtu pro první řádek *Tab. 6.5*:

$$VN_{SVM} = VNP_{ATAS\ Náchod,s\ odpadem} + VNV_{ATAS\ Náchod} = 5,57 + 6,56 \doteq 12,13\ \text{€}$$

$$RVN = VN_{V.č.4} - VN_{SVM} = 22,25 - 12,13 \doteq 10,12\ \text{€}$$

$$P_{2-k,SVM} = P_{1-k} * \eta = 768,9 * 78,4 * 10^{-2} \doteq 602,82\ W$$

$$\Delta P_k = P_{1-k} - P_{2-k} = 768,9 - 602,82 \doteq 166,08\ W$$

$$CZS_{1hod,SVM} = \Delta P_k * CE_{1kWh} = 166,08 * 10^{-3} * 0,042 \doteq 6,98 * 10^{-3}\ \text{€}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}N &= \frac{RVN}{24 * CZS_{1hod,SVM} - 24 * CZS_{1hod,v.č.1}} = \frac{10,12}{24 * 6,98 * 10^{-3} - 24 * 5,93 * 10^{-3}} \\ &\doteq 401,59\ dní \approx 9639\ hodin \end{aligned}$$

7 ZÁVĚR

Tématem této bakalářské práce bylo zhodnotit možná řešení zvýšení účinnosti malých asynchronních motorů a vyhodnotit zvýšení materiálových nákladů těchto řešení.

První teoretická část bakalářské práce pojednává o konstrukci, funkci a rozboru ztrát v asynchronních motorech a zabývá se následnými možnostmi zvýšení účinnosti asynchronních motorů.

V druhé části bakalářské práce je vybráno pět vzorků, které jsou určitým způsobem upraveny oproti standardně vyráběnému motoru firmy ATAS Náchod. Na těchto pěti vzorcích je již prakticky ukázáno, jak lze ovlivnit účinnost stroje různými úpravami. Jako nejhorší úprava z pěti vybraných vzorků vyšla u vzorku č. 2, kde došlo k výměně hliníkové klece za měděnou klec. U tohoto vzorku se účinnost snížila o 0,6 % při jmenovitém zatížení. Pokles účinnosti je následkem zvýšených ztrát v železe o 6,3 W, které mohou mít souvislost s výrobou klece (klec byla svařena). Mohlo dojít například k přivaření plechů ke kleci nebo k poškození izolace mezi plechy vlivem vysokých teplot. Všechny tyto vlivy by zvýšily hodnoty vířivých proudů, které by vedly k nárůstu ztrát v železe. Zdroj [14] však uvádí, že pokud je použita kvalitní měděná klec bez vad, měl by mít vzorek přibližně o 2,5 % vyšší účinnost než původní motor s hliníkovou klecí. Poté se tato úprava jeví jako velmi dobrá možnost, jak zvýšit účinnost motoru. Jako nejlepší úprava motoru, kde se účinnost zvýšila o 3,2 % při jmenovitém zatížení, se projevila u vzorku č. 4. U tohoto vzorku byly původní plechy typu M700-50A vyměněny za plechy typu M270-35A a navíc došlo ke zvýšení průřezu vodiče statorového vinutí. Díky této úpravě znatelně klesly ztráty v železe o 9,1 W a Joulovy ztráty ve vinutí statoru o 15,1 W.

Poslední část bakalářské práce se zabývá ekonomickým vyhodnocením vzorku č. 1, č. 4 a č. 5. Podle výkresové dokumentace standardně vyráběného motoru firmy ATAS Náchod je zjištěna hmotnost statorových a rotorových plechů. Hmotnost těchto plechů podle výkresové dokumentace po vystřižení činí 4,03 kg. Dále byla podle dokumentace zjištěna i hmotnost statorového vinutí. Hmotnost statorového vinutí činí 0,91 kg. Podle zaslaných dat od firmy ATAS Náchod je v průměru spotřebováno na jeden vyrobený motor 1 kg mědi. Odchylka těchto dvou hodnot je způsobena zjednodušujícím předpokladem při výpočtu délky čel vinutí podle výkresové dokumentace jako střední hodnota, ale také z důvodu, že firma počítá při výrobě vinutí s určitou chybovostí. Ze získaných dat z výkresové dokumentace standardně vyráběného motoru bylo poté snadné vypočítat i zbylé hmotnosti upravených vzorků. Všechny vypočtené hmotnosti jsou přehledně zaznamenány v *Tab. 6.1* a *Tab. 6.2*. V těchto tabulkách jsou navíc i vypočteny

orientační výrobní náklady použitých materiálů (měď a elektrotechnický plech) pro jednotlivé vzorky z ceníku různých evropských firem. Lze si všimnout, že se výrobní náklady některých firem velmi liší. To je způsobené tím, že firmy jako Siemens a ATAS Náchod tyto materiály neprodávají, ale používají je pouze pro vlastní spotřebu, na rozdíl od firem Grau-stanzwerk a Traseritalia, kde tyto materiály distribuují dalším firmám pro výrobu motoru. V tabulkách 7.3, 6.4 a 6.5 je vypočten čas do úplné návratnosti vložených nákladů do upravených vzorků v porovnání se standardně vyráběným motorem. Porovnáním těchto tabulek se jeví jako nejlepší investice v poměru cena/účinnost vzorek č. 1. U tohoto vzorku se účinnost zvýšila o 2,9 % a navýšení výrobních nákladů na jeden vyrobený motor je 2,59 €. Při tomto navýšení pořizovacích nákladů a aktuální ceně energie za 1 kWh (0,042 € - firma DEL a.s) by došlo k úplné návratnosti vložené investice do úpravy vzorku za 2 355 hodin provozu stroje.

Použitá literatura

- [1] ONDRŮŠEK, Čestmir. Elektrické stroje. VUT, 199?. Skriptum. VUT.
- [2] PETROV, Georgij Nikolajevič. Elektrické stroje 2. 1. vyd. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [3] Asynchronní Motor, synchronní Motor dodavatelů v Číně - výrobní cenu - Hengsu hospodářství. Asynchronní Motor, synchronní Motor dodavatelů v Číně - výrobní cenu - Hengsu hospodářství [online]. Dostupné z: <http://cz.hanzelmotor.org/>
- [4] ŠIŠÁK, David. ROZBOR ZTRÁT MALÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ. Brno, 2015. Bakalářská práce FEKT VUT Brno. Vedoucí práce ing. Martin Mach. Ph.D
- [5] CIGÁNEK, L.; BAUER, M.; Elektrické stroje a přístroje: učební text pro průmyslové školy elektrotechnické - čtyřleté. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955, 634 s.
- [6] KOPYLOV, I., P. a kol.: Stavba elektrických strojů. SNTL, Praha 1988, 688 stran, typové číslo L25-C3-IV-41f/58667, první vydání
- [7] MACH, Martin. Analýza ztrát asynchronních motorů malého výkonu [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/51831>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Vítězslav Hájek.
- [8] http://www.ssenajizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_esp_2.pdf
- [9] UHLÍŘ, Ivan. Elektrické stroje a pohony. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [10] [online]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_saving_statistics
- [11] [online]. Dostupné z: http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/cs/displayFtu.html?ftuId=FTU_5.7.3.html
- [12] HALFAR, Tomáš. Zlepšení energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013 [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/20989>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Vítězslav Hájek.

- [13] JIRSÁK, Josef, Rudolf AUTRATA, Karel LIEDERMANN, Zdenka ROZSÍVALOVÁ a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. Materiály a technická dokumentace:
- [14] [online]. Copyright ©W [cit. 18.12.2017]. Dostupné z:
<http://www.coppermotor.com/wp-content/uploads/2012/04/CMR-white-paper-v2-Cost-Efficiency-industrial-motors-2008-from-charles-lee-good-argument-on-cost-even-for-automotive.pdf>
- [15] allkabel s.r.o. kabelové centrum | kabelové centrum - allkabel s.r.o. - specializovaný kabelářský velkoobchod [online]. Dostupné z: <http://www.allkabel.eu/vyvoj-cen-komodit/>

Seznam symbolů, veličin a zkratk

Symbol	Popis	Jednotka
a	délka plechu	[m]
b	šířka plechu	[m]
b_{ds}	střední poloměr drážky	[m]
B_m	maximální hodnota magnetické indukce B	[T]
c	tloušťka plechu	[m]
CE_{1kWh}	cena energie za 1 kWh	[€]
$\cos \phi$	účinník	[-]
CZS_{1hod}	cena energie způsobená ztrátami stroje za 1 hodinu	[€]
D	vnitřní průměr statoru	[m]
d	počet použitých plechů	[-]
$D_{\%}$	průměr vodiče v procentech	[m]
d_{cu}	průměr měděného vodiče	[m]
D_{ds0}	vnější průměr drážek	[m]
D_{si}	vnitřní průměr statorového plechu	[m]
f	frekvence	[Hz]
I	proud	[A]
I_1	proud statorem	[A]
I_{1N}	jmenovitý proud statoru	[A]
k	počet prvků	[-]
k_h	koeficient závisující na materiálu a tloušťce plechů,	[-]
k_v	koeficient závisující na materiálu a tloušťce plechů	[-]
l	střední délka závitu	[m]
L	celková délka vinutí	[m]
l_{FE}	délka magnetického obvodu	[m]
$l_{Fe-\%}$	délka magnetického obvodu	[%]
$l_{rotor.}$	délka rotorového plechu	[m]
$l_{stat.}$	délka statorového plechu	[m]
l_{z1}	délka oblouku spojující středy dvou drážek dané cívky	[m]
m	hmotnost magnetického materiálu	[kg]
M	moment	[Nm]
$m_{celk.}$	celková hmotnost plechu určeného pro vystřižení statoru a rotoru	[kg]
$m_{celk.motoru}$	celková hmotnost statorového a rotorového plechu po vystřižení všech částí	[kg]
m_{cu}	hmotnost měděného vodiče	[kg]
m_{odpadu}	hmotnost odpadu, který zbyl po vystřižení statoru a rotoru	[kg]

$m_{\text{rotor.plech.}}$	hmotnost rotorového plechu	[kg]
$m_{\text{stat.plech.}}$	hmotnost statorového plechu	[kg]
n	otáčky točivého magnetického pole rotoru	[min ⁻¹]
$N_{\%}$	počet závitů cívek statorového vinutí v procentech	[%]
n_1	otáčky točivého magnetického pole statoru	[min ⁻¹]
p	počet pólů stroje	[-]
P_1	příkon	[W]
P_{1-k}	korigovaný příkon na referenční hodnotu chladiwa	[W]
P_2	výkon	[W]
$P_{2-k,SVM}$	výkon standardně vyráběného motoru korigovaný na referenční hodnotu chladiwa	[W]
P_{el}	elektrický výkon	[W]
P_{mech}	mechanický výkon	[W]
P_{δ}	výkon prostupující vzduchovou mezerou	[W]
Q	počet statorových drážek	[-]
R_1	odpor vinutí statoru	[Ω]
R'_2	odpor vinutí rotoru přepočtený na primární stranu	[Ω]
r_{dr}	střední poloměr statorové drážky	[m]
R_{Fe}	fiktivní odpor, který uvažuje ztráty v železe statoru	[Ω]
$R_{s-\%}$	odpor statorového vinutí za studena	[%]
$R_{t-\%}$	odpor statorového vinutí po zahřátí na provozní teplotu	[%]
RVN	rozdíl výrobních nákladů	[€]
s	skluz	[-]
S	průřez měděného vodiče	[m ²]
$S_{cel.r}$	plocha rotoru bez vystřížení drážek a plochy pro hřídel	[m ²]
$S_{cel.s}$	plocha statoru bez vystřížených drážek a rotoru, bez ořezů a děr pro šrouby	[m ²]
$S_{drážrekrot.}$	plocha rotorových drážek	[m ²]
$S_{drážrekstat.}$	plocha statorových drážek	[m ²]
$S_{hřidel.}$	plocha vystřížení pro hřídel	[m ²]
$S_{ořez.}$	plocha ořezu statorového plechu	[m ²]
S_r	plocha půlkružnic statoru	[m ²]
$S_{\text{rotor.plech.}}$	plocha rotorového plechu	[m ²]
$S_{\text{stat.plech.}}$	plocha statorového plechu	[m ²]
$S_{vnitř}$	plocha vystřížena ze statorového plechu pro rotor	[m ²]
U_a	řídící napětí	[V]
U_b	budící napětí	[V]
$\acute{U}N$	úplná návratnost stroje	[hod]

V_{cu}	objem mědi	[m ³]
VNP	výrobní náklady plechu	[€]
VN_{SVM}	výrobní náklady standardně vyráběného motoru	[€]
VNV	výrobní náklady vinutí	[€]
$VN_{v.č.1}$	výrobní náklady vzorku č.1	[€]
X_m	magnetizační (hlavní) reaktance	[Ω]
X_{r1}	rozptylová reaktance vinutí statoru	[Ω]
X'_{r20}	rozptylová reaktance vinutí rotoru přepočtená na primární stranu	[Ω]
Z	počet závitů v jedné statorové drážce	[-]
δ	vzduchová mezera	[m]
ΔP_d	dodatečné ztráty	[W]
ΔP_{dN}	jmenovité dodatečné ztráty	[W]
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	[W]
ΔP_h	ztráty hysterezní	[W]
ΔP_{j1}	Joulovy ztráty ve statorovém vinutí	[W]
ΔP_{j2}	Joulovy ztráty v rotorovém vinutí	[W]
ΔP_{js-k}	Joulovy ztráty ve vinutí statoru korigované na referenční hodnotu chladiwa	[W]
ΔP_{jt-k}	Joulovy ztráty ve vinutí rotoru korigované na referenční hodnotu chladiwa	[W]
ΔP_k	celkové ztráty stroje korigované na referenční hodnotu chladiwa	[W]
ΔP_{mech}	ztráty mechanické	[W]
ΔP_v	ztráty způsobené vířivými proudy	[W]
η	účinnost	[%]
ρ_{cu}	hustota mědi	[kg*m ⁻³]
$\rho_{M270-35A}$	hustota plechu typu M270-35A	[kg*m ⁻³]
$\rho_{M700-50A}$	hustota plechu typu M700-50A	[kg*m ⁻³]