

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

DŮSLEDKY ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI MALÝCH MOTORŮ

CONSEQUENCES OF INCREASING THE EFFICIENCY OF SMALL MOTORS.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Buchta

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: Martin Buchta

ID: 186038

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Důsledky zvyšování účinnosti malých motorů

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostudujte dosavadní závěrečné práce, týkající se zvýšení účinnosti malých asynchronních elektromotorů.
2. Vypracujte přehled možných opatření, vedoucích ke zvýšení účinnosti.
3. Vyhodnoťte vliv na hmotnost, rozměry a spotřebu aktivního materiálu.

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.

Bibliografická citace práce:

BUCHTA, M. *Důsledky zvyšování účinnosti malých motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 42 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Důsledky zvyšování účinnosti 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 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne:

.....

Poděkování

Velmi děkuji vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Vítězslavu Hájkovi CSc. za účinnou odbornou, metodickou a pedagogickou pomoc při zpracování mé bakalářské práce a také za pomoc nejen v oblasti techniky.

V Brně dne:

.....

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá důsledky zvyšování účinnosti malých asynchronních motorů do 1kW. Tato práce je napsána v reakci na stále větší nároky na minimální účinnost u asynchronních motorů ať už skrze legislativu evropské unie nebo jen pouhou konkurenci mezi výrobci. Cílem práce je tedy zhodnotit opatření vedoucích ke zvýšení účinnosti. Zhodnocení se týká spotřeby aktivního materiálu a hmotnosti jednotlivých úprav. K samotnému zhodnocení bylo potřeba nejprve prostudovat dosavadní závěrečné práce psané na této fakultě, které se týkají zvyšováním účinnosti malých asynchronních motorů. Po prostudování těchto prací bylo nutné vybrat ty opatření, které svými vedlejšími náklady jsou nejméně náročné, vedou ke zvýšení účinnosti alespoň o 1% a také aby bylo možné tyto opatření mezi sebou porovnávat. Nejlépe těmto požadavku vyhověl asynchronní motor firmy ATAS a.s. o výkonu 600W. K tomuto motoru byly vybrány tři opatření vedoucí ke zlepšení účinnosti, které se týkaly převážně úpravy průměru použitého vodiče vinutí, změny počtu závitů a případně prodloužení délky mg, obvodu. Těmto třem opatřením byla provedená hrubá finanční analýza ceny za aktivní materiál. Ceny aktivního materiálu byly zjišťovány od výrobců či dodavatelů.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Asynchronní motor; třífázový asynchronní motor; jednofázový asynchronní motor; účinnost; zlepšení účinnosti; opatření vedoucí ke zlepšování účinnosti; ekonomické zhodnocení opatření vedoucích ke zvýšení účinnosti

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the consequences of increasing the efficiency of small asynchronous motors up to 1kW. This work is written in response to ever-increasing demands on minimal efficiency for asynchronous engines, whether through European Union legislation or just competition between manufacturers. The aim of the thesis is therefore to evaluate measures to increase efficiency. The evaluation refers to the consumption of the active material and the weight of the individual treatments. For the evaluation itself, it was necessary to first study the final papers written at this faculty concerning the efficiency of small asynchronous motors. After studying these works, it was necessary to select those measures which, with their minor costs, are least demanding, lead to an increase in efficiency of at least 1% and also to compare these measures with each other. The asynchronous engine of ATAS a.s. with a power of 600W. Three measures to improve efficiency were selected for this engine, mainly related to the diameters of the winding conductor used, the change in the number of threads, and, possibly, the extension of the length of the circuit. These three measures made a rough financial analysis of the price for active material. The prices of active material were found from manufacturers or suppliers.

KEY WORDS:

induction motor; three-phase induction motor; single phase induction motor; losses in the induction motor; efficiency; improving efficiency; economic evaluation of measures to increase efficiency

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
1 ÚVOD	12
2 TEORETICKÉ SEZNÁMENÍ S ASYNCHRONNÍMI MOTORY	13
2.1 TRÍFÁZOVÉ ASYNCHRONNÍ MOTORY.....	13
2.2 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	17
3 DŮVODY ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI.....	20
4 OBECNÉ ZPŮSOBY ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI.....	22
4.1 SNÍŽENÍ ODPORU STATOROVÉHO VINUTÍ NEBO KLECE ROTORU.....	22
4.2 ZMĚNA TVARU DRÁŽKY STATORU NEBO ROTORU.	23
4.3 SNÍŽENÍ MĚRNÝCH ZTRÁT V MAGNETICKÉM OBVODU (ZMĚNA POUŽITÉHO ELEKTROTECHNICKÉHO PLECHU).....	23
4.4 PRODLOUŽENÍ MAGNETICKÉHO OBVODU STATORU A ROTORU	23
5 OBECNÉ EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PRAKTICKÝCH ZPŮSOBŮ ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI	25
5.1 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ ZPŮSOBŮ ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI.....	26
6 DŮSLEDKY ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI NA HMOTNOST, ROZMĚRY, SPOTŘEBU AKTIVNÍHO MATERIÁLU A JEJICH EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	27
6.1 MAGNETICKÝ OBVOD	27
6.2 VINUTÍ STATORU	30
6.3 KLEC ROTORU.....	32
6.4 VÝPOČET SPOTŘEBY AKTIVNÍCH MATERIÁLŮ	32
6.4.1 HMOTNOST ŽELEZA V REFERENČNÍM VZORKU	33
6.4.2 HMOTNOST MĚDI V REFERENČNÍM VZORKU	34
6.4.3 HMOTNOST HLINÍKU V REFERENČNÍM VZORKU	35
6.5 VÝPOČET CENY AKTIVNÍM MATERIÁLŮ	37
6.5.1 VÝPOČET CENY ŽELEZA PRO JEDNOTLIVÉ VZORKY.....	37
6.5.2 VÝPOČET CENY MĚDI PRO JEDNOTLIVÉ VZORKY.....	38
6.5.3 VÝPOČET CENY HLINÍKU PRO JEDNOTLIVÉ VZORKY	38
6.6 VÝPOČET CELKOVÉ CENY JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ A POROVNÁNÍ VZORKU.....	39
7 ZÁVĚR.....	40
8 POUŽITÁ LITERATURA	41

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Princip točivého magnetického pole statoru v třífázovém asynchronním motoru. [1]</i>	13
<i>Obr. 2-2 Ukázka statorového plechu[14]</i>	14
<i>Obr. 2-3 Standartní svorkovnice třífázového asynchronního motoru zapojeného do hvězdy (vlevo) a zapojeného do trojúhelníka (vpravo). [1]</i>	14
<i>Obr. 2-4 Schéma zapojení jednofázového asynchronního motoru s pomocnou kondenzátorovou fází (vlevo) a příklad svorkovnice jednofázového motoru (vpravo). [1]</i>	18
<i>Obr. 2-5 Schéma zapojení třífázového motoru do jednofázové sítě.</i>	19
<i>Obr. 3-1 Rozmezí účinnosti dle stávající normy ČSN EN (IEC) 60034-30 pro jednotlivé třídy. [15]</i>	20
<i>Obr. 6-1 Průběh ceny železa (železného šrotu) na LME v období od 1.4.2016 až 1.4.2018. [12]</i>	29
<i>Obr. 6-2 Průběh ceny hliníku na LME v období od 1.4.2008 až 1.4.2018. [12]</i>	31
<i>Obr. 6-3 Průběh ceny mědi na LME v období od 1.4.2008 až 1.4.2018. [12]</i>	31
<i>Obr. 6-4 Podoba statorového a rotorového plechu. [14]</i>	33
<i>Obr. 6-5 Podoba rotorové drážky. [14]</i>	35
<i>Obr. 6-6 Podoba rotoru bez hřídele. [14]</i>	36

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Tabulka možných velikostí trvale připojeného a rozběhového kondenzátoru.</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 6-1 Tabulka cen dynamového plechu M700-50A u různých výrobců.</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 6-2 Tabulka fyzikálních vlastností hliníku a mědi.</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 6-3 Tabulka cen smaltovaného vodiče IEC 317-13 teplotní třídy 200 °C u různých výrobců.</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 6-4 Tabulka porovnání základních parametrů jednotlivých vybraných vzorků a porovnání s referenčním. [14], [7].....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 6-5 Tabulka vypočítaných hmotností jednotlivých aktivních materiálů pro jednotlivé vzorky.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 6-6 Tabulka vypočtených celkových cen dynamového plechu M700-50A pro jednotlivé vzorky od různých výrobců.</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 6-7 Tabulka vypočtených celkových cen smaltovaného vodiče IEC 317-13 teplotní třídy 200 °C pro jednotlivé vzorky od různých výrobců.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6-8 Tabulka cen jednotlivých aktivních materiálů, celková cena, procentuální zvýšení účinnosti a ceny motoru jednotlivých vzorků oproti referenčnímu vzorku z průměrné ceny aktivních materiálů na trhu.</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6-9 Tabulka sloužící ke srovnání zvýšení ceny při zvýšení účinnosti η o 1% oproti referenčnímu vzorku z průměrné ceny aktivních materiálů na trhu.....</i>	<i>39</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

γ_{Al}	[kg·m ⁻³]	hustota hliníku
γ_{Cu}	[kg·m ⁻³]	hustota mědi
$\gamma_{M70050A}$	[kg·m ⁻³]	hustota dynamového plechu s označením M700-50A.
2p	[-]	počet pólových dvojic
a	[m]	vzdálenost rovinných ploch statorového plechu
B	[T]	magnetická indukce
b _{dr1}	[mm]	šířka drážky rotoru v spodní části
b _{dr2}	[mm]	šířka drážky rotoru v nejširší části
b _{dr3}	[mm]	šířka drážky rotoru v horní části
BYN		Běloruský rubl
C	[μF]	kapacita kondenzátoru
C _{(1-3)-Cu}	[Kč]	tři nejdostupnější ceny lakovaného vodiče IEC 317-13 teplotní třídy 200°C od tří evropských dodavatelů
C _{(1-3)-Fe}	[Kč]	tři nejdostupnější ceny dynamového plechu M700-50A od tří evropských dodavatelů
C _{Al}	[Kč]	celková cena za spotřebovaný hliník
C _{Cu}	[Kč]	celková cena za spotřebovaný lakovaný vodič IEC 317-13 teplotní třídy 200°C
C _{Fe}	[Kč]	celková cena za spotřebovaný plech M700-50A
C _{motor}	[Kč]	celková cena za motor součtem cen za aktivní materiál
CNY		Čínský juan
cosφ	[-]	účinník motoru
C _{prům-Al}	[Kč]	průměrná cena hliníku za 1 kg
C _{prům-Cu}	[Kč]	průměrná cena lakovaného vodiče IEC 317-13 teplotní třídy 200°C za 1 kg
C _{prům-Fe}	[Kč]	průměrná cena dynamového plechu M700-50A za 1 kg
d _{Cu}	[mm]	průměr použitého vodiče pro vinutí
d _{ds-střed}	[mm]	kružnice vedená středem statorových drážek
d _{ds-vnitřní}	[mm]	kružnice vedená okrajem statorových drážek blíže ke vzduchové mezeře
d _{fe}	[mm]	tloušťka jednoho plechu

EUR		Euro
h_{dr1}	[mm]	výška drážky rotoru od spodní po nejširší části
h_{dr2}	[mm]	výška drážky od nejširší po horní část drážky
h_{ds}	[mm]	výška statorové drážky
I	[A]	proud statoru
I_1	[A]	proud statorovou fází
I_2	[A]	proud rotorovou tyčí
I_n	[A]	jmenovitý proud
I_z	[A]	záběrný proud
K_{ξ}	[-]	Koeficient zahrnující technologii izolování čel a počet pólů stroje
l_{Cu-1z}	[m]	střední délka závitů
l_{ξ}	[mm]	délka čela vinutí
$l_{\text{čelo-drážka}}$	[m]	délka vodiče mezi vstupem do statorové drážky a samotným čelem
l_{Fe}	[m]	délka magnetického obvodu
l_{Fe-r}	[m]	délka drážky v rotorovém paketu
LME		London Metal Exchange – Londýnská burza s kovy
m	[-]	počet fází motoru
m_{al}	[kg]	hmotnost spotřebovaného hliníku v rotoru
m_{Cu}	[kg]	hmotnost spotřebované mědi
$m_{Fe-vzorek1}$	[kg]	hmotnost plechů spotřebovaných pro výrobu statorového a rotorového svazku
m_{plech}	[kg]	hmotnost jednoho plechu potřebného pro výrobu statorového a rotorového plechu
N	[-]	počet závitů ve statoru
n	$[\text{min}^{-1}]$	počet otáček
$N_{\text{drážka}}$	[-]	počet vodičů v jedné statorové drážce
n_{plech}	[-]	počet plechů v magnetickém obvodu
P_1	[W]	Příkon motoru odebíraný ze sítě
$p_{1,0}$	$[\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrné ztráty dané elektrotechnické oceli při $B = 1 \text{ T}$ a $f = 50 \text{ Hz}$
$p_{1,5}$	$[\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}]$	měrné ztráty při $B = 1,5 \text{ T}$ a $f = 50 \text{ Hz}$
P_2	[W]	Výkon na hřídeli motoru

PLN		Polské zloty
Q_r	[-]	počet drážek v rotoru
Q_s	[-]	počet drážek ve statoru
s	[%]	skluz asynchronního motoru
S_{1-dr}	[mm ²]	obsah spodního lichoběžníku rotorové drážky
S_{2-dr}	[mm ²]	obsah horního lichoběžníku rotorové drážky
S_{Cu-1v}	[m ²]	průřez použitého vodiče pro vinutí
S_{dr}	[mm ²]	celková plocha jedné rotorové drážky
S_{plech}	[m]	plocha spotřebovaného plechu na jeden statorový a rotorový plech
t	[s]	čas
U	[V]	sdužené napětí sítě
USD		Americký dolar
V_{Al}	[m ³]	objem spotřebovaného hliníku v rotoru
$V_{Cu-celk}$	[m ³]	objem vinutí statoru všech tří fází
$V_{čelo-rot}$	[m ³]	objem jednoho čela rotoru
V_{dr}	[m ³]	objem jedné drážky rotoru
$V_{dr-celk}$	[m ³]	objem všech drážek rotoru
V_{plech}	[m ³]	objem železa potřebný pro výrobu jednoho statorového a rotorového plechu
ΔP_{mech}	[W]	mechanické ztráty motoru
η	[%]	účinnost motoru v procentech

1 ÚVOD

Zadáním práce je provést shrnutí poznatků z již provedených testů vedoucích ke zlepšení účinnosti na malém asynchronním motoru. Oblasti, ze které byly tyto poznatky čerpány, byly již na začátku stanoveny na bakalářské, diplomové a disertační práce vydané pouze na této fakultě. Tato práce tedy pouze okrajově nahlíží na samotnou metodu zlepšení, poskytuje informaci o již provedeném testu a výsledku takového zlepšeného motoru. Důvodem této práce je existující Mezinárodní Elektrotechnická Komise (IEC - International Electrotechnical Commission). [1] Jednou z norem platících v celé EU vydanou touto komisí je i IEC 60034-30-1 Standard on efficiency classes for low voltage AC motors. Tedy norma o zařazení účinnosti motorů na malé napětí do jednotlivých kategorií IE1 až IE4. Tato norma platí po asynchronní motory s kotvou nakrátko o výkonu 0,75 – 375 kW. Od 1. ledna 2017 musí každý motor spadající do tohoto nařízení splňovat kategorii nejméně IE3 (vysoká účinnost), v případě řízení motoru pomocí frekvenčního měniče musí splňovat alespoň kategorii IE2 (zvýšená účinnost). Každému výkonu přísluší rozsah účinnosti v každé kategorii IE1 – IE4. Toto nařízení, které má za cíl snížení spotřeby elektrické energie s tím související ekologické dopady na zemi je tedy důležitým východiskem při návrhu asynchronního motoru.

Cílem práce je tedy vytvořit přehled těch opatření, která svými zásahy umožňují ekonomicky nejvýhodnější cestu zlepšení účinnosti pro již navrhnutý a již vyráběný motor. Tématem práce jsou tedy i ztráty a jejich eliminace různými metodami. Pro kvalifikovaný odhad ekonomické náročnosti jednotlivých metod pro snížení ztrát, tedy zlepšení účinnosti byly vybrány práce, kde bylo použito stejného či podobného asynchronního motoru firmy ATAS a.s. o výkonu 600W. K tomuto motoru totiž fakulta disponuje několika upravenými vzorky. Mezi vzorky s různými úpravami se vybíralo tak, aby vedlejší náklady, nebyly finančně náročné jako je například změna raznice, počet drážek apod. Samotné vyhodnocení probíhá výpočtem hmotnosti jednotlivých aktivních materiálů jako je železo, měď a hliník na jednotlivých vzorcích. Tyto hmotnosti jsou poté vyhodnoceny pomocí cen jednotlivých aktivních materiálů na trhu.

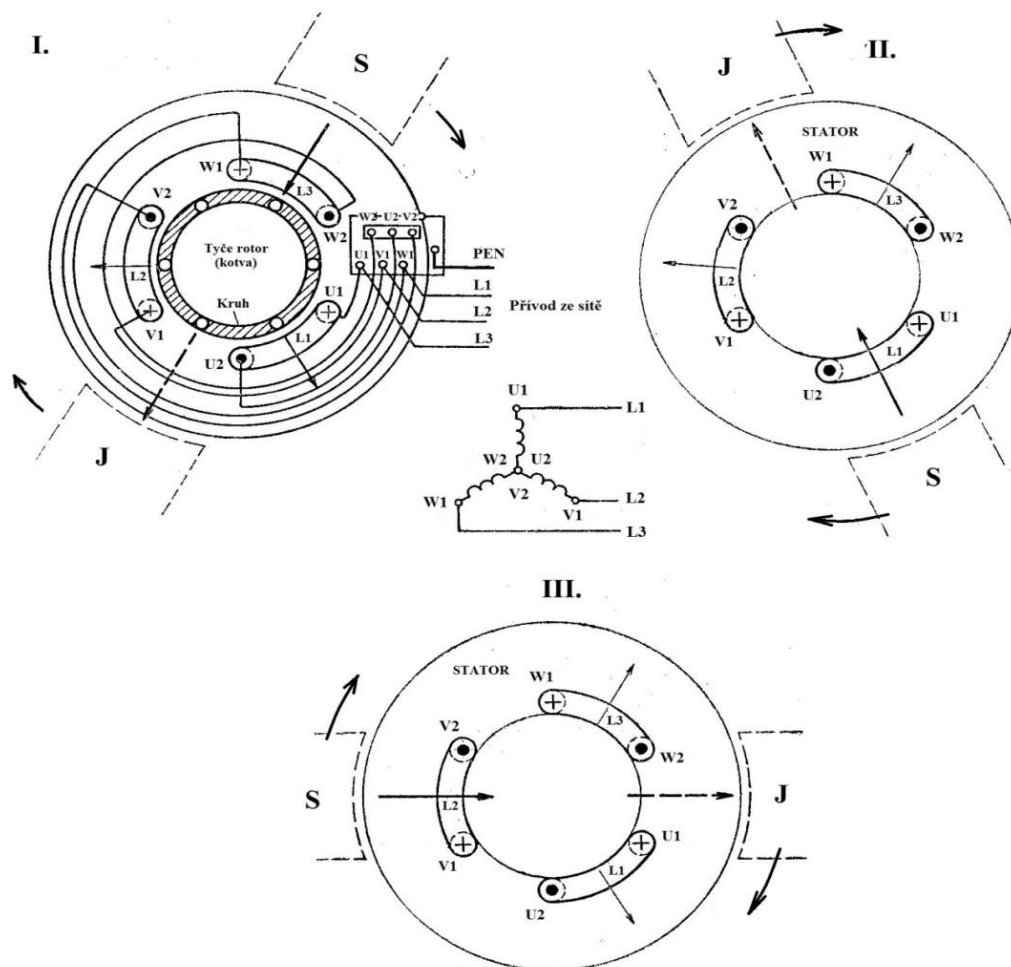
2 TEORETICKÉ SEZNÁMENÍ S ASYNCHRONNÍMI MOTORY

Elektromotory jsou stroje, které dovedou přeměnit elektrickou energii v mechanickou práci. Elektrickou energii odebírají ze sítě. Mechanickou práci odevzdává elektromotor na hřídeli. Odevzdává ji pracovnímu stroji, který je jím poháněn, a to buď přes řemenici a řemen, nebo přes nějakou spojku (přírubovou, zubovou apod.) popřípadě přes převodovku.

Elektromotory mohou být mít různá dělení za úplně nejzákladnější dělení bereme motory na stejnosměrné nebo střídavé napětí. V našem případě se budeme zabývat motorem na střídavé napětí přesněji Asynchronním motorem v dnešní době většinou již jen s kotvou nakrátko.

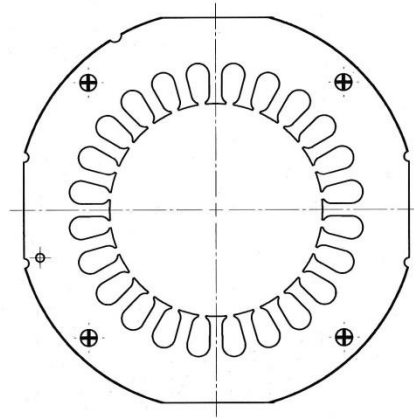
2.1 Třífázové asynchronní motory

Princip těchto motorů popíšeme podle Obr. 2-1. Na obrázku je vidět asynchronní třífázový motor s kotvou (rotorem) nakrátko.



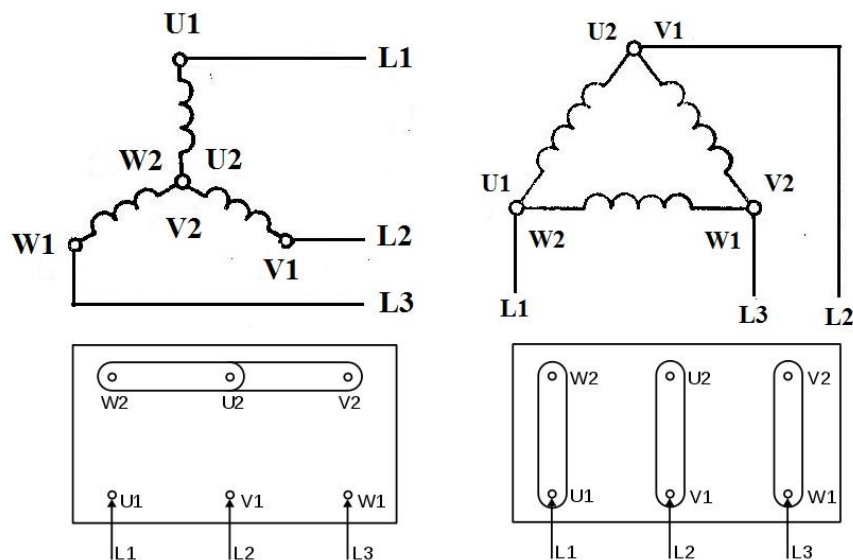
Obr. 2-1 Princip točivého magnetického pole statoru v třífázovém asynchronním motoru. [1]

Vinutí statoru je upraveno zcela stejně jako u generátoru třífázového proudu v elektrárně. Je složen ze železných plechů od sebe elektricky odizolovaných, tyto plechy mají drážky, takže stator je po složení na vnitřním obvodu drážkovaný viz. Obr. 2-2. Do drážek se potom vkládá vinutí. Samotné vinutí je trojfázové, to znamená, že má tři samostatné části, posunuté rovnoměrně proti sobě po obvodu statoru.



Obr. 2-2 Ukázka statorového plechu[14]

Na navinutý stator se potom nasune obal, většinou litý což tvoří plášť motoru. Na plášti je nakonec svorkovnice. Na Obr. 2-3 je pohled na otevřenou svorkovnici kam se připojí konce statorového vinutí. Těchto konců je šest. Tři začátky, které budeme v dalším výkladu označovat U1, V1, W1, (začátek fáze L1 je U1 atd.), a tři konce, které označíme U2, V2, W2. V reálném provozu se však můžeme setkat s velmi různorodým značením, které se v průběhu historie měnilo většinou se jednalo o písmena A, B, C ; R, S, T ; X, Y, Z apod.



Obr. 2-3 Standartní svorkovnice třífázového asynchronního motoru zapojeného do hvězdy (vlevo) a zapojeného do trojúhelníka (vpravo). [1]

Na Obr. 2-1 jsme stator znázornili velmi zjednodušeně, předpokládáme, že každá z fází má vinutí složené jenom ze dvou vodičů, které jdou kolmo (dozadu za papír). Na přední straně jsme vodiče stejné fáze spojili spojkami, takže pro každou fázi vznikla jedna smyčka, která nám nahrazuje vinutí této fáze. Začátky a konce všech smyček jsme vyvedli na svorkovnici, kterou jsme nakreslili vedle. Nebudeme si zatím všimnout kotvy třífázového asynchronního motoru, zato prozkoumáme, jak se bude chovat stator, když do něho zavedeme třífázový proud, tedy když jej připojíme na síť. [1]

Ze sítě přivádíme tři proudy respektive tři fáze a vodič ochranný. Nulový vodič se vždycky připojí na ochranný (uzemňovací) šroub, který musí na svorkovnici každého motoru být, takže zbývají tři vodiče fázové L1, L2, L3. Na motoru je však svorek šest. Provedeme vhodné propojení, aby nám zbyly k připojení jenom tři svorky. To lze udělat dvojím způsobem.

V prvním případě jsou všechny konce vinutí (U2, V2, W2) viz Obr. 2-3 vlevo spojeny do uzlu ve středu hvězdy a zbývají volné začátky (U1, V1, W1). Úsečky, které znázorňují vinutí, jsou proti sobě natočeny o třetinu kružnice (o 120°). V druhém případě viz Obr. 2-3 vpravo je konec vinutí první fáze U2 spojen se začátkem druhé fáze V1, konec druhé V2 se začátkem třetí W1 a konec třetí W2 se začátkem první U1. Vznikne trojúhelník.

Proto se prvnímu způsobu zapojení třífázového vinutí říká zapojení do hvězdy, druhému zapojení do trojúhelníku. Na štítku motoru je označena hvězda písmenem Y a trojúhelník písmenem D.

Pokud se opět podíváme na náš Obr. 2-1 a připojíme na svorkovnici statoru přívod třífázového proudu ze sítě. V tu chvíli se uzavřou tři elektrické obvody, v každé fázi jeden. Vinutím každé fáze protéká tedy proud, a proto se musí kolem něho vytvořit magnetické pole. Protože jsou vinutí uložena v železném statoru, je každé vinutí silným elektromagnetem. Na Obr. 2-1 je to vyznačeno šipkami, které mají ukazovat hlavní směry magnetických siločar. Pole těchto tří elektromagnetů nejsou v žádném okamžiku stejně velká. V elektrárně v synchronním generátoru vyrábějí elektrický proud otáčející se magnetické póly, které přicházejí postupně pod vinutí jednotlivých fází, rozložených po obvodu; proto dosahují proudy jednotlivých fází svých největších velikostí postupně. Takže v jedné chvíli I. protéká největší proud ve fázi L3, v druhé chvíli II. ve fázi L2 a v třetímu okamžiku III. ve fázi L1. Tyto tři okamžiky jsou znázorněny na obr. 1 směry proudu v jednotlivých vinutích (křížek znamená, že jde proud zpředu dozadu, tj. od nás, tečka na vodiči značí, že proud jde dopředu, tj. k nám). [1]

Směry magnetických polí těchto fázových vinutí, které z toho vyplývají z pravidla pravé ruky pro cívku, jsou vyznačeny šipkami. Vinutí, kterým protéká v tom okamžiku největší proud, má šipku kreslenou tlustou čarou.

Pokud se podíváme blíže pro okamžik I. ,tak nejsilnější pole vzbuzuje vinutí fáze L3. Vinutí fáze L2 a L1 mají pole slabší, avšak můžeme si je nahradit polem jedním, jeho směr je vyznačen tlustou čárkovanou šipkou. Pokud si odmyslíme stator a pozorujeme jen tlusté šipky, můžeme říci, že tu vznikne ze všech tří vinutí jen jedno magnetické pole, které má v okamžiku I. směr shora dolů. Je to úplně stejné, jako kdybychom si účinek statoru nahradili

póly permanentního magnetu, který je nakreslen tence čárkovaně. Při stejné úvaze pro okamžik II., kdy je největší proud ve fázi L1, vidíme, že se výsledné magnetické pole otočilo o třetinu kružnice (o 120°) a že nyní směřuje zespod nahoru. Zase si je můžeme nahradit póly permanentního magnetu. Nakonec pro okamžik III. směřuje výsledné magnetické pole zleva doprava.

Kdybychom sledovali magnetické pole v dalších okamžicích, všechno by se opakovalo zase od začátku, a to tak dlouho, dokud je stator připojen na síť.

V dutině rotoru je potom magnetické pole, které se otáčí právě tak, jako kdyby byl na místě pevného statoru otáčivý magnet. Můžeme tedy vyslovit poučku, že třífázový proud vytvoří v dutině statoru točivé elektromagnetické pole. [1]

Kdybychom zaměnili na statorové svorkovnici fázi L1 s fází L2 a kdybychom si znovu zachytili celý sled I. až III., zjistili bychom, že se magnetické pole sice otáčí, ale tentokrát v opačném smyslu, tj. doleva (předtím se magnetické pole otáčelo doprava). Stejného výsledku bychom dosáhli záměnou fázi L1 s fází L3 nebo L3 s fází L2.

Krátce řečeno: vzájemná záměna jakýchkoliv dvou vodičů v přívodu změni smysl otáčení magnetického pole. [1]

Vložíme-li do dutiny statoru vodiče, bude je točivé magnetické pole protínat a indukovat v nich napětí. Na Obr. 2-1 je těchto vodičů šest (tyče rotoru). Spojíme-li tyto vodiče na obou koncích vodičnými kruhy (nakrátko), vznikne napětím ve vodičích proud, protože z tyčí s kruhy se stanou uzavřené elektrické obvody začne těmito vodiči protékat proud. Pokud máme vodiče protékané proudem v točivém magnetickém poli tak na ně působí silou. V tomto případě se to projeví tak, že točivé magnetické pole táhne vodiče za sebou, takže se kruhy s tyčemi, tj. klec, začnou otáčet za magnetickým polem. Taková klec se vkládá do drážek válce ze železných plechů, a vzniká klecová kotva neboli kotva nakrátko.

Do rotoru se nasadí hřídel a celek se zasune do statoru. Nasazením a přišroubováním štítů s ložisky vzniká třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko. Tyto elektromotory mají dnes nejčastěji klec hliníkovou. Na bocích jsou přilita ventilační křídla, takže kotva je zároveň ventilátorem.

Rotor třífázového motoru, který pracuje na tomto principu se nemůže otáčet stejně rychle jako točivé magnetické pole. Potom by totiž točivé magnetické pole přestalo protínat tyče kotvy což by zapříčinilo nulové indukované napětí a i proud. Proto se musí rotor točit o několik otáček pozadu za točivým magnetickým polem, takže ne synchronně ale tzv. asynchronně odtud odvozen název. Rozdíl v počtu otáček točivého magnetického statoru a počtu otáček rotoru se nazývá skluz a značí se písmenem s .

Počet otáček točivého magnetického pole je podmíněn kmitočtem sítě a způsobem vinutí statoru. Počet otáček hřídele motoru závisí potom ještě na skluzu. Proto lze třífázové motory vyrobit pro různý počet otáček za minutu. [1]

Třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko je dnes nejčastěji používaným motorem. Je to nejjednodušší motor vůbec. Hlavní předností asynchronního motoru s kotvou nakrátko je snadné spouštění a zastavování. [1]

Nevýhodou však je dosti velký proud při rozběhu motoru. Je to takzvaný záběrný proud, který je největší ve chvíli, kdy motor zapneme, a postupně s rozbíháním motoru klesá. Když motor běží na jmenovitý počet otáček, odebírá už jen takový proud, jaký má na štítku. To je jeho jmenovitý proud. Na štítku je vyznačeno také jmenovité napětí motoru a jeho jmenovitý výkon na hřídéli. Záběrný proud může být u motorů s kotvou nakrátko až šestkrát i sedmkrát větší, než je jejich proud jmenovitý. U velkých motorů jsou to proudy několika set ampérů.

Tomuto záběrnému proudu se snažíme čelit tím, že záběrný proud co nejvíce zmenšíme, a to zvláštními opatřeními:

- použitím přepínače hvězda - trojúhelník,
- použitím rozběhové spojky,
- použitím motorů typu Boucherot, nebo s vírovou kotvou případně jinou úpravou kotvy.
- použitím elektronického softstartu,
- použitím frekvenčního měniče – v dnešní době nejčastější způsob řízení.

2.2 Jednofázový asynchronní motor

Na obr. 1 jsme si vysvětlili vznik třífázového točivého magnetického pole. K tomu, aby se ve statoru elektromotoru objevilo, je zapotřebí tří jednofázových vinutí.

Pokud se podíváme na tomto obrázku jen na dvě fáze, třeba na vinutí fáze L1 a L2 a třetí fázi si odmyslíme, poznáme porovnáním výsledného magnetického pole v daných třech okamžicích I. až III., že i potom vznikne točivé magnetické pole, které ovšem bude slabší. [1]

Vinutí jedné fáze samo o sobě však točivé magnetické pole nevybudí. Z toho plyne, že by se jednofázový motor, upravený stejně jako trojfázový motor nakrátko, ale pouze s jednofázovým vinutím, nemohl roztočit. Ze zkušenosti však víme, že pokud takový motor roztočíme, bude se dále otáčet stejně dobře jako motor trojfázový.

Jednofázový proud nevytvoří točivé magnetické pole, ale pouze tepavé pole stojaté, které sice mění svoji polaritu a velikost, ale jeho poloha zůstává stálá. Ve vodičích rotoru se indukuje proud podobně jako v transformátoru a vytvoří magnetické pole, které působí proti poli statoru, protože je posunuto o půl kmitu, takže se jednofázový motor z klidu nerozběhne.

Když se však rotor kterýmkoliv směrem roztočí, indukuje se ve vodičích rotoru kromě této elektromotorické síly transformační ještě elektromotorická síla pohybová. Výsledná elektromotorická síla vytvoří v rotoru proud a magnetické pole, které již není posunuto o půl kmitu za polem statoru a vytvoří s ním tedy točivé pole a točivý moment. [1]

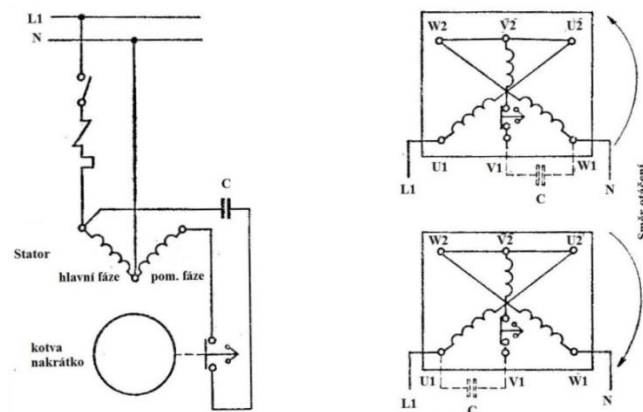
Abychom tedy vyrobili použitelný jednofázový elektromotor, stačí motor třífázový s kotvou nakrátko, jen stator bude mít vinutí jednofázové. Kromě toho musíme k němu přidat nějaké zařízení, které způsobí, aby se rozběhl. Proto se do statoru kromě hlavního jednofázového vinutí navine ještě vinutí jedné fáze, tzv. fáze pomocné (rozběhové). Toto vinutí je rovněž rovnoměrně rozloženo po obvodě, ale je prostorově posunuto o 90° elektrických proti hlavnímu vinutí. Konce obou vinutí jsou spolu spojeny.

Jak již bylo řečeno, k vytvoření točivého magnetického pole, stačí dvě fáze prostorově posunuté, kterými tečou proudy se vzájemným fázovým posunem. Abychom vytvořili potřebný fázový posuv mezi proudy v hlavní a pomocné fázi, zapojíme počátek hlavního vinutí na síť přímo a počátek vinutí pomocné fáze přes kondenzátor, odpor nebo tlumivku. Tyto přídavné přístroje jsou tedy zapojeny s vinutím pomocné fáze v sérii. Jak víme, kondenzátor způsobuje zpoždění napětí za proudem a tlumivka naopak zpoždění proudu za napětím. Přídavný odpor potom změní činný odpor větve s pomocnou fází a tedy změní poměr mezi činným a jalovým odporem této větve, a proto změní i fázový posuv proudu za napětím v této větvi. [1]

Protože máme jen jedno a totéž napětí pro hlavní i pomocnou fázi, kde v pomocné fázi je úhel mezi napětím a proudem změněn přídavným přístrojem a u hlavní fáze se nic nemění, dojde k fázovému posunu mezi proudy obou fází a tedy i mezi jejich magnetickými poli. Toto natočení polí ani prostorové natočení vinutí není tak velké jako u trojfázového proudu, postačí, aby vzniklo točivé magnetické pole, které roztočí rotor.

Jakmile k tomu dojde, můžeme vinutí pomocné fáze včetně pomocného přístroje odpojit, protože pak už si rotor udržuje točivé pole sám. Pomocná fáze se odpojuje samočinně odstředivým vypínačem, umístěným na hřídeli motoru. Vypínač vypne, jakmile hřídel elektromotoru dosáhne jmenovitého počtu otáček. Schéma spojení jednofázového motoru s pomocnou fází kondenzátorovou Obr. 2-4.

Toto zapojení umožňuje rozběh jednofázového motoru pomocí kondenzátoru C , který se po rozběhu vypíná i s vinutím pomocné fáze odstředivým vypínačem.



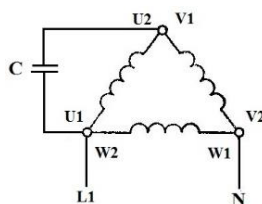
Obr. 2-4 Schéma zapojení jednofázového asynchronního motoru s pomocnou kondenzátorovou fází (vlevo) a příklad svorkovnice jednofázového motoru (vpravo). [1]

V dnešní době se již kondenzátor ponechává připojen trvale, nebo jen jeho část. Vinutí však musí být zvlášť navrženo.

Běžné ledničkové motory se dodávají se svorkovnicí upravenou dle obrázku. Kde vinutí hlavní fáze je zapojeno mezi krajní svorky $U1$ a $W1$ (staré označení A , C). Na prostřední svorku je připojena pomocná fáze přes odstředivý vypínač. Konce vinutí jsou můstkem spojeny do uzlu.

Kondenzátor C se může připojit buď mezi svorky $V1$ a $W1$, nebo mezi $V1$ a $U1$. V obou případech se motor roztočí, ale pokaždé jiným směrem. Reverzace smyslu otáčení se tedy u

kondenzátorových motorů dosahuje přepojením konce odlehlého od odstředivého vypínače na opačnou krajní svorku, než byl před tím. Další možností je přepojení běžného třífázového asynchronního motoru. Dle schématu na Obr. 2-5.



Obr. 2-5 Schéma zapojení třífázového motoru do jednofázové sítě.

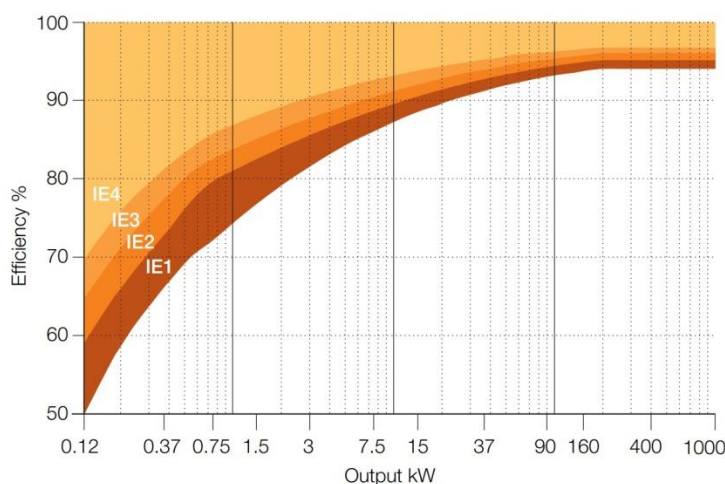
Pro potřeby návrhu potřebného kondenzátoru lze použít následující přehlednou tabulku

Tab. 2-1 Tabulka možných velikostí trvale připojeného a rozběhového kondenzátoru.

Výkon motoru [W]	Trvalý kondenzátor C [μF]	Rozběhový kondenzátor C [μF]
100 - 200	5 - 8	8 - 10
200 - 300	8 - 10	10 - 15
300 - 500	0 - 15	15 - 25
500 - 700	15 - 20	30 - 50
700 - 1000	20 - 28	40 - 100

3 DŮVODY ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI

Tak jako spoustu jiných elektrotechnických výrobků (například žárovky), tak i elektromotory se staly cílem za snížení spotřeby energie a tím i množství emisí CO₂ jenž, vypracovala Evropská unie kompletní a všem přístupnou příslušnou legislativu. Využitím energie a účinností asynchronních motorů se zabývá směrnice EuP (Energy using product)-část 11 respektive směrnice EU2009/125/ ES.



Obr. 3-1 Rozmezí účinnosti dle stávající normy ČSN EN (IEC) 60034-30 pro jednotlivé třídy. [15]

Platnost této normy platí pro jednofázové trojfázové asynchronní motory s rotorem nakrátko na 50 Hz nebo 60 Hz, které:

- mají jmenovité napětí U_n do 1000 V. Norma platí také pro motory dimenzované na dvě nebo více napětí, popřípadě kmitočtů,
- mají jmenovitý výkon P_n v rozsahu od 0,75 kW do 375 kW,
- mají 2, 4 nebo 6 pólů,
- jsou dimenzovány pro druh zatížení S1 (trvalé zatížení) nebo S3 (přerušované zatížení) se jmenovitým zatěžovatelem 80% nebo vyšším,
- jsou schopné pracovat s napájením přímo ze sítě,
- jsou dimenzovány pro pracovní podmínky odpovídající IEC 60034-1, kapitola 6.

[15]

Tato norma se vztahuje i na motory s přírubami, patkami a/nebo hřídeli s mechanickými rozměry odlišnými od IEC 60072-1. Také se vztahuje na převodové motory a brzdové motory, a to i v případě že v takových motorech mohou být použity speciální hřídele a příruby. [15]

Od 16. června 2011 nesmí být motory se standardní účinností IE1 dodávány na evropské trhy (motory označované dříve jako motory se EFF 2). Podle nové legislativy musí od tohoto data všechny standardní motory pro všeobecné použití splňovat minimálně požadavky na třídu účinnosti IE2 (dříve EFF 1). [15]

Od 1. ledna 2015 musí být u motorů s výkony 7,5 až 375 kW dodržena zákonem stanovená minimální účinnost třídy IE3, alternativně minimální účinnost třídy IE2 u motorů napájených a řízených z měničů frekvence. [15]

Od 1. ledna 2017 je rozšířena platnost u motorů s výkony 0,75 až 375 kW musí být dodržena zákonem stanovená minimální účinnost IE3, alternativně IE2 u motorů řízených z měničů frekvence. [15]

V praxi tato nařízení znamenají pro většinu zákazníků výrazné navýšení pořizovací ceny elektromotorů a s tím tedy i nutný přechod na nové typové řady motorů.

4 OBECNÉ ZPŮSOBY ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI

V semestrální práci bylo v kapitole ztrát naznačeno, že účinnost motoru je jakýmsi ukazatelem hospodárnosti přeměny elektrické síly na mechanickou. To co se k přeměně spotřebuje, se spotřebuje nenávratně. Je tedy na konstruktérovi, jak se k co největší hospodárnosti dopracovat. Již ze vzorců pro jednotlivé ztráty se nám nabízí několik variant snížení těchto ztrát jako například:

- Snížením odporu statorového vinutí nebo klece rotoru
- Změnou tvaru drážky statoru nebo rotoru
- Snížením měrných ztrát v magnetickém obvodu, tedy změnou plechů
- Prodloužením magnetického obvodu

Pro změnu parametrů ve prospěch zvýšení účinnosti je možné i jinými avšak zásadními zásahy do konstrukce motoru. Ve výše zmiňovaných bodech máme přehled těch změn, které jsou nejméně náročné pro realizaci na již konstruovaném a funkčním asynchronním motoru. Pro úplnost si provedeme alespoň obecný náhled na jednotlivé body.

4.1 Snížení odporu statorového vinutí nebo klece rotoru.

V prvním případě je snížení odporu statorového vinutí. U malých asynchronních motorů jsou Joulovy ztráty až 70% všech ztrát v motoru. Díky tomu že má tato úprava velmi pozitivní dopad na snížení Jouleových ztrát má tak i velmi vliv na snížení ztrát celkových. V tomto případě existuje celá řada úprav, jako je:

- zvětšení průměru použitého vodiče,
- snížení počtu závitů,
- změna materiálu vodiče za vodič s lepší vodivostí,
- zkrácením čel či jiné úpravy pro eliminaci pasivní délky závitů,
- změnou technologie výroby či druhu vinutí.

Veškeré tyto změny jsou však limitovány, tak abychom výrazně nezměnili výkon stroje, výrazně nezměnili sycení, nepřekročili maximální přípustné plnění drážky a další zásadní parametry.

V druhém případě tedy snížení odporu kotvy, máme obdobné varianty úprav jako je změna materiálu klece, případně jejich kombinace:

- změna počtu tyčí,
- změna materiálu klece nebo kombinace více materiálů,
- případně změnou kruhů na koncích klece,
- změnou technologie výroby.

Opět se musíme pohybovat v mezích vhodného sycení motoru atd., abychom zásadně nezměnili ostatní parametry stroje. Jouleovy ztráty v rotoru námi sledované skupiny motorů tvoří asi 15-20 % celkových ztrát. Na veškeré tyto ztráty mají vliv i jiné veličiny a to zejména teplota, případně i obsah harmonických apod. [7], [9], [10]

4.2 Změna tvaru drážky statoru nebo rotoru.

Tato změna patří k těm více výrobně komplikovanějším, jedná se totiž o změnu lisovacích raznic, kterými se prostřihují plechy. Jedná se, však o změnu se kterou můžeme vhodnými výpočty dojít k tak dobrému tvaru a počtu drážek, že se zvýšená procenta účinnosti vyplatí. Samotné zjišťování vhodného tvaru a počet drážek a pro výpočet velmi komplikované a vyžaduje značné početní výkony. Tak jako v předchozím případě tedy snížení odporu, tak i tady v případě změny tvaru drážky je nutnost jistá zkušenost konstruktéra, protože ne vždy je možné k výsledku dojít pouhým výpočtem ve výpočetních programech. Výrobci nejčastěji při samotném návrhu nového motoru, používají již předem ověřené typy drážek spolu s tabulkou s vhodným počtem drážek pro danou velikost motoru. Změna tvaru drážek má za následek celou řadu změn jako rozptylová indukčnost, magnetizační indukčnost, ztráty v železe, v neposlední řadě i Jouleovy ztráty v kleci. Vhodnou úpravou tvaru drážek lze řízeně dosáhnout požadovaného tvaru momentové charakteristiky asynchronního stroje, což se využívalo hlavně v době, kdy byly frekvenční měniče málo dostupné. [7], [9], [10]

4.3 Snížení měrných ztrát v magnetickém obvodu (změna použitého elektrotechnického plechu)

Z touto změnou se myslí zejména redukce ztrát v železe které tvoří u motorů do 1 kW cca 15 – 20% celkových ztrát tyto ztráty se s menším výkonem snižují (oproti Jouleovým jejichž podíl na ztrátách se zvyšuje). Méně vhodnou redukcí těchto ztrát je i snížení sycení což má za následek razantní zásah do konstrukce stroje, tak abychom splnili ostatní parametry stroje. Častěji se tedy využívá změna typu plechu za plechy s nižšími ztrátami, musíme však počítat i s horšími magnetickými vlastnostmi což je dáno tvarem BH křivky. Plechy s nižšími měrnými ztrátami obsahují více křemíku a mohou být také tenčí, to však nese za následek menšího plnění železa. Tedy přesněji řečeno více styčných ploch plechů při stejné délce rotoru má za následek menší skutečná délka samotného železa, což má za následek zhoršenou magnetizační indukčnost stroje. Obecně je výběr plechů problematický, pakliže začneme už od výroby samotného plechu, tak se zvyšujícím se obsahem křemíku se výrazně zhoršují vlastnosti pro válcování. Takový materiál tedy musíme déle válcovat s větším výkonem a to za přesně daných podmínek. Tato skutečnost zvyšuje pořizovací cenu takového plechu. Další náklady vznikají pak při výrobě samotných rotorových a statorových plechů, takovýto plech je pro prostřihovací stroj tvrdší a tudíž dochází k častějšímu opotřebením potřebných lisovacích raznic. Další efektivní změnou měrných ztrát je i žihání již hotových statorových a rotorových plechů. Žiháním se totiž odstraní negativní vliv stříhu, respektive špatné vlastnosti plechu v okolí stříhu se žiháním srovnají do normálu. [7], [9], [10], [12]

4.4 Prodloužení magnetického obvodu statoru a rotoru

Jedná se již o změnu ve smyslu zásahu do vnějších rozměrů stroje. Mezi možnostmi zvýšení účinnosti asynchronních motorů, které jsou již navrhnuté jsme zvolili i tuto možnost protože ze všech ostatních zásahů do rozměru stroje je tento zásah nejméně razantní a nejméně výrobně komplikovaný. Při této změně se pokoušíme zvětšit délku magnetického obvodu jen do maximálních vnitřních rozměrů kostry rotoru, abychom minimalizovali zásah

do vnějších rozměrů stroje. Změna či výroba nové kostry je finančně náročná a ne vždy je možná například z důvodu použití motoru v omezeném prostoru. Se změnou délky magnetického obvodu dosáhneme hlavně změny momentové charakteristiky, avšak ke zdárnému zvýšení účinnosti je ještě vhodné snížit počet závitů a to tím víc, čím je delší magnetický obvod. S tím souvisí možnost zvýšení průměru použitého vodiče. S takovou změnou přicházejí i změny ostatních parametrů ať už je to účinník, výkon, proud apod. Je tedy potřeba uvážit vhodný poměr změny délky a počtu závitů což je mnohdy výpočetně náročné. [7], [9], [10], [13]

5 OBECNÉ EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PRAKTICKÝCH ZPŮSOBŮ ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI

Z provedených testů na upravených vzorcích testovaného motoru vzešli výsledky zvýšení účinnosti. Máme-li vybrat vhodné kandidáty na vhodné možnosti zvyšování, musíme se na danou problematiku podívat z větší perspektivy. Zde je na místě, aby každý, kdo vybírá vhodné metody zvyšování měl alespoň základní ponětí, jak probíhá proces od výroby samotného plechu, či vodiče přes samotné vytvoření magnetického obvodu, namotání závitů až po smontování. Pro kvalitní počáteční odhad si musíme uvědomit co nejvíce souvislostí spojené s danou úpravou a po zralé úvaze alespoň částečně finančně ohodnotit. Je tedy na každém jedinci jak moc přesný kvalifikovaný počáteční odhad z výše jmenovaných testů na motoru provede. Z mého pohledu jsem seřadil úpravy motoru nejprve z pohledu technologických úprav do seznamu od nejlevnějších po finančně náročnější:

1. Změna počtu vodičů ve vinutí statoru
2. Zvýšení průměru použitého vodiče ve vinutí statoru
3. Prodloužení délky magnetického obvodu statoru i rotoru
4. Změna kruhů klece rotoru
5. Žihání vystřižených rotorových a statorových plechů
6. Změna počtu rotorových tyčí
7. Změna tvaru drážky u rotoru i statoru

Co do materiálových úprav je seznam seřazený následovně:

1. Změna materiálu vodiče
2. Zvýšení průměrů použitého vodiče
3. Změna použitého elektrotechnického plechu za plech s nižšími měrnými ztrátami
4. Zvýšení počtu tyčí a tím více materiálu v rotoru
5. Změna materiálu klece rotoru

V rámci této práce vybereme tři řešení, která co do materiálu a hlavně hmotnosti rozebereme. Jako nejperspektivnější řešení byly vybrány:

1. Vzorek č.2 - větší průměr vodiče statorového vinutí o 18,87 %, snížený počet závitů o 3,3 %, zlepšení účinnosti o 2 %.[7],
2. Vzorek č.3 - větší průměr vodiče statorového vinutí o 5,66 %, snížený počet závitů o 13,1 %, prodloužený magnetický obvod o 14,29 %, zlepšení účinnosti o 1,6 %.[7],
3. Vzorek č.4 - větší průměr vodiče statorového vinutí o 13,21 %, snížený počet závitů o 6,5 %, prodloužený magnetický obvod o 14,29 %, zlepšení účinnosti o 2,9 %.[7]

5.1 Praktické využití způsobů zvyšování účinnosti

V této kapitole jsou využity poznatky z předchozí kapitoly 5, ve které byly obecně vysvětleny možné způsoby zvyšování účinnosti. V tomto případě byly opět využity již provedené testy z vybraných bakalářských, diplomových a disertačních prací psaných na této fakultě na podobné téma. Testy z vybraných prací byly prováděny na stejném referenčním motoru třífázového dvoupólového asynchronního motoru při frekvenci $f = 50$ Hz se zapojením do hvězdy o parametrech: [7]

$U_n = 400$ V	- jmenovité napětí,
$P_1 = 720$ W	- jmenovitý příkon,
$P_2 = 600$ W	- jmenovitý výkon,
$n = 2830$ min ⁻¹	- jmenovité otáčky,
$I = 1,6$ A	- jmenovitý proud,
$\cos\varphi = 0,83$	- jmenovitý účinník,
$s = 5,67$ %	- jmenovitý skluz,
$2p = 2$	- počet pólů,
$m = 3$	- počet fází,
$Q_s = 24$	- počet drážek statoru.
$Q_r = 17$	- počet drážek rotoru.

Magnetický obvod statoru a rotoru je zhotoven z elektrotechnického plechu pod obchodní značkou M700-50A jehož parametry jsou:

$d = 0,50$ mm	- tloušťka plechu
$P_{1,0} = 3$ W. kg ⁻¹	- měrné ztráty při magnetické indukci $B = 1$ T a frekvenci $f = 50$ Hz,
$P_{1,5} = 7$ W. kg ⁻¹	- měrné ztráty při magnetické indukci $B = 1,5$ T a frekvenci $f = 50$ Hz.

6 DŮSLEDKY ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI NA HMOTNOST, ROZMĚRY, SPOTŘEBU AKTIVNÍHO MATERIÁLU A JEJICH EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

6.1 Magnetický obvod

Již před prvními pokusy výroby obstojného elektrického stroje se experimentovalo se spousty materiálů na magnetický obvod. Experimentovalo se také s různými technologickými postupy při výrobě, nejpoužitelnějšího výsledku dosáhl při vývoji stejnosměrného motoru Werner von Siemens (v roce 1856). Siemens pochopil, že při vývoji stroje je velmi důležité se zabývat vývojem magnetického obvodu a to jak materiálu, tak i technologického postupu výroby. Jeho experimenty směřovali také na různé tvary magnetického obvodu. [16]

V dnešní době rozdělujeme magnetické materiály na dvě hlavní skupiny a to dle magnetické tvrdosti respektive potřebné energie na jejich přemagnetování.

a) Magneticky měkké materiály [16]

- malá koercivita a tedy rychle dosáhne maximální hodnoty napětí – použití pro střídavé napětí
- jak je již naznačeno, lze tento materiál snadno přemagnetovat
- mají malé hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy
- nejčastěji: magneticky měkké ferity, čisté železo, slitiny železa s niklem, křemíková ocel, práškové mg. měkké materiály apod.

b) Magneticky tvrdé materiály [16]

- naopak vysoká koercivita – použití pro stejnosměrné napětí
- nejčastěji: magneticky tvrdé ferity, slitiny ALNI nebo ALNICO, případně kalená uhlíková ocel

Dále bude věnována pozornost plechům a pásům z elektrotechnické oceli, které jsou vhodné pro střídavé napětí.

Elektrotechnická ocel FeSi. Jedná se o nejčastěji používaný materiál na zhotovení magnetického obvodu strojů. Tento materiál je válcováním buď, pouze za tepla, nebo kombinací za tepla a za studena přetvářen do tenkých elektrotechnických plechů, ze kterých se nakonec skládá výsledný magnetický obvod stroje. [16]

Základní surovinou je železo, jehož důležitou vlastností je jeho chemická čistota, obsah prvku podporující stárnutí (kyslík, uhlík, dusík), různé krystalické vady apod. Další surovina je příměs 0,5 – 4,5% křemíku v železe. Právě křemík má rozhodující vlastnost o tom jaké mechanické, elektrické a magnetické vlastnosti bude výsledný plech mít. Se zvětšujícím se obsahem křemíku v oceli:

- zvětšuje se poměrná permeabilita

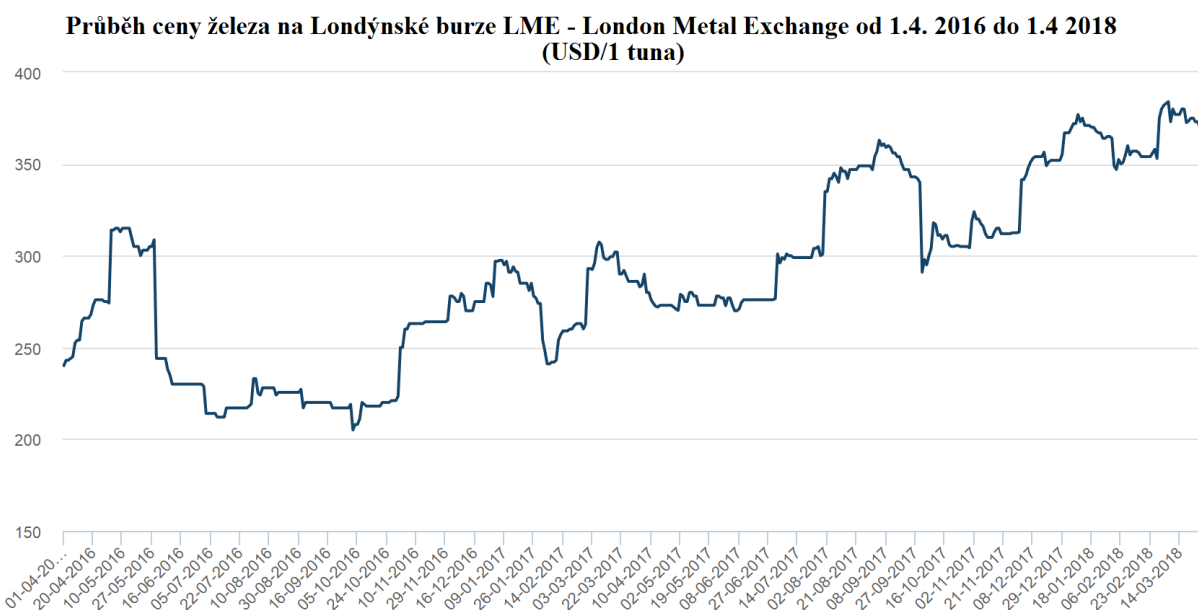
- zvětšuje se rezistivita oceli
- zmenšuje se měrná hustota
- zmenšují se hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy
- nastává obtíž se zpracováním kdy materiál křehne a stává se více lámavým

Další operace, která rozhoduje o kvalitě a vlastnosti elektrotechnického křemíkového plechu je jeho textura (krystalografická orientace zrn). Textura plechu dosahována tvářením a válcováním může být:

- a) Magneticky izotropní - válcovaná za studena [5]
 - s příměsí okolo 3,5 – 4,5 % Si - ztráty 0,9 až 1,8 W/kg (při $B = 1T$), pro magnetické obvody tvarově jednoduché nejčastěji netočivé stroje např.: transformátory,
 - s příměsí okolo 0,3– 3,5 % Si – ztráty 2 až 3,6 W/kg (při $B = 1T$). pro magnetické obvody tvarově složité nejčastěji točivé stroje např.: motory, generátory.
- b) Se slabou magnetickou anizotropií - válcovaná za studena [5]
 - rozdíl ztrát ve směru válcování (menší ztráty) a ve směru kolmém k válcování (větší ztráty) je okolo 30 %,
 - s příměsí okolo 0,5 – 3,5 % Si – ztráty 1,1 až 3,6 W/kg (při $B = 1T$) „izotropní dynamové plechy“ avšak univerzální použití,
 - hladký povrch, malá tolerance tloušťky – kvalitní mg. obvody.
- c) Anizotropní - válcovaná za tepla [5]
 - složitý technologicky postup výroby, který má za cíl co nejlepší respektive nejsnadnější magnetizace v jednom směru za cenu horší magnetizace v ostatních směrech,
 - směr shodný s válcováním již od 0,4 W/kg (při $B = 1T$),
 - úzké využití – transformátory (energetické, toroidní).

Veškeré plechy mají buď již od výroby izolační vrstvu, nebo je jim opatřena dodatečně. Izolace je z důvodu snížení ztrát vířivými proudy, má však za následek menší hodnoty činitele plnění železa.

Plechy použité při zhodnocení zvyšování účinnosti mají obchodní označení M700-50A jedná se o neorientovaný izotropní plech s příměsí křemíku vhodnou pro tvarově složité magnetické obvody (dynamový plech). Cena se skládá z aktuální ceny železa (zhruba 40% ceny). Ke dni 22.2.2018 byl vznešen dotaz na cenu elektrotechnického plechu s obchodním označením M700-50A několika firmám buď telefonicky, nebo emailem. V přehledné tabulce můžeme vidět ceny na 1 kg tohoto materiálu. Konečná cena se pohybuje v závislosti na odebíraném objemu, zajištění dopravy apod.



Obr. 6-1 Průběh ceny železa (železného šrotu) na LME v období od 1.4.2016 až 1.4.2018. [12]

V průběhu ceny za poslední dva roky lze vidět že cena byla v červenci 2016 téměř poloviční oproti aktuální ceně v dubnu 2018

Tab. 6-1 Tabulka cen dynamového plechu M700-50A u různých výrobců.

Firma	Cena za kg	Původ	Poznámka
Kovintrade	25,-	Česko	
Flashsteel	28,-	Česko	
Almarinvest	25,5,-	Česko	
U.S. Steel Košice	21,-	Slovensko	Dle kurzu EUR 26.2.2018
Thyssenkrupp Steel Europe AG	28,4,-	Německo	Dle kurzu EUR 23.3.2018
Burwill Holdings Limited	11,9,-	Čína	Dle kurzu CNY 26.2.2018
AVIC INTL	12,6,-	Čína	Dle kurzu CNY 26.2.2018
Wuxi Sanzhou	18,8,-	Čína	Dle kurzu CNY 15.3.2018

Zajímavostí je cena železa respektive elektrotechnických plechů na čínském trhu, obecně je známo, že je zde jedna z největších produkcí železa a ceny této komodity trápí tuzemský trh. Doprava z této země je čím dál dostupnější a spolupráce čím dál větší. Z našeho blízkého okolí je nejlevnější firma U.S. Steel Košice, která je dlouhodobě jedna z nejlevnějších ve střední Evropě.

6.2 Vinutí statoru

Od vodičů pro vinutí se předpokládají tyto základní vlastnosti:

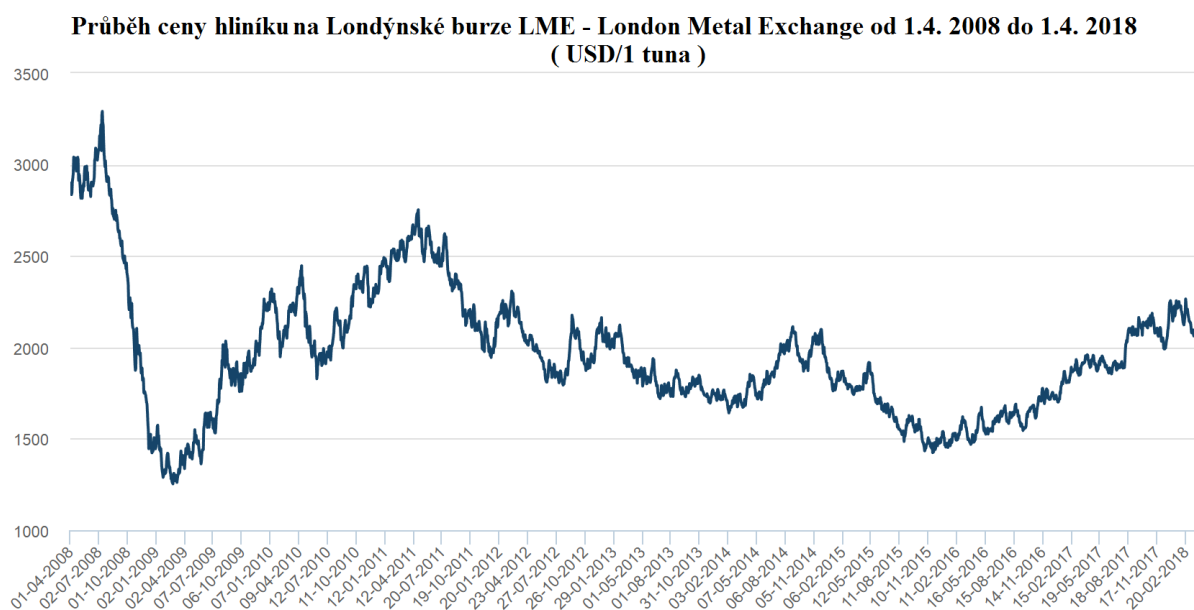
- Tloušťka izolační vrstvy má být co nejtenčí
- Izolace musí vykazovat vysokou mechanickou pevnost, ohebnost a elasticnost
- Od izolace se požaduje vysoká tepelná odolnost
- Vlastnosti izolační vrstvy musí být stále při změnách teploty a vlhkosti
- Izolace má mít dobrou tepelnou vodivost
- Izolace má být odolná proti chemickým vlivům
- Vodiče mají být levné

Pro vinutí motoru se používají materiály hliník – Al nebo měď – Cu. Nejčastěji se u malých elektromotorů setkáváme s měděným vinutím, hlavně z důvodu lepších elektrických vlastností při stejném objemu jako hliník avšak na úkor hmotnosti. Cena obou těchto materiálů je však v případě větších motorů rozhodující a někdy se kvůli těmto rozdílům ceny vybírá právě hliník. Je však nutné podotknout, že práce s hliníkovým vinutím není tak jednoduchá jako s měděným a to hlavně z důvodu menší pevnosti v tahu. V případě mědi je globální problém velkého plýtvání a v případě současné spotřeby se zanedlouho naše generace dočká úplného vytěžení mědi. Řešením je tedy buď použití hliníku, ten však není úplně, nebo nové materiály jako například uhlíková vlákna která mají ještě lepší vodivost jak hliník. Prototypy vinutí s novým typem vodiče respektive s uhlíkovými vlákny jsou již vyzkoušeny, avšak cesta výzkumu v této oblasti je ještě docela dlouhá. Aktuální je tedy stále jen měď a hliník.

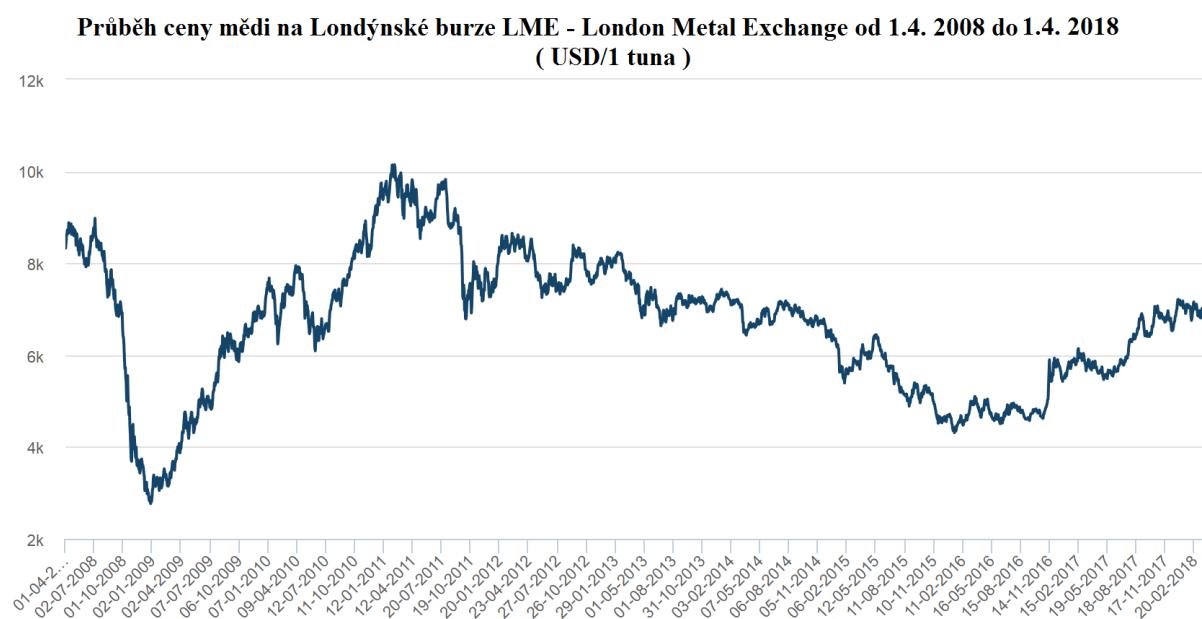
Tab. 6-2 Tabulka fyzikálních vlastností hliníku a mědi.

Vlastnost	Hliník	Měď	jednotka
Hustota	2700	8960	kg·m ³
Pevnost v tahu	200	440	MPa
Měrný elektrický odpor	0,0267·10 ⁻⁶	0,0167·10 ⁻⁶	Ω·m
Elektrická vodivost	37,7·10 ⁶	58,1·10 ⁶	S·m ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	896	385	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Tepelná vodivost	237	397	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Teplota tání	660,2	1083	°C

Cena izolovaného vodiče pro vinutí se počítá ze dvou částí. První část ceny tvoří aktuální cena mědi či hliníku, na světové burze (většinou pro daný měsíc), která tvoří většinou 75% celkové ceny a druhá část tvoří cena za zpracování a izolování, někdy tato část nese označení „dutá cena“.



Obr. 6-2 Průběh ceny hliníku na LME v období od 1.4.2008 až 1.4.2018. [12]



Obr. 6-3 Průběh ceny mědi na LME v období od 1.4.2008 až 1.4.2018. [12]

Z ukázek fenoménu vývoje ceny za posledních deseti let na Londýnské burze je vidět, že cena samotné mědi je velmi pohyblivá a hliník je stabilnější a je o více jak polovinu levnější. Za zmínku stojí duben roku 2009, kde vlivem krize klesla cena hliníku o zhruba 40% a cena mědi na více jak polovinu.

Tab. 6-3 Tabulka cen smaltovaného vodiče IEC 317-13 teplotní třídy 200 °C u různých výrobců.

Firma	Cena za kg	Původ	Poznámka
Gral – elektromotory s.r.o.	201,60,-	Česko	
Copperplus	186,15,-	Slovensko	Dle kurzu EUR 11.3.2018
Labara s.r.o.	183,30,-	Česko	
Elviko s.r.o.	214,90,-	Česko	
Eurodrut sp. zo.o.	232,32,-	Polsko	Dle kurzu PLN 26.3.2018
Marmakas	280,00,-	Litva	Dle kurzu EUR 11.3.2018
Gomelcable	170,55,-	Bělorusko	Dle kurzu BYN 29.3.2018

6.3 Klec rotoru

Nejčastějším materiálem pro klec asynchronního motoru s kotvou nakrátko se používá hliník – Al, případně měď – Cu. Nejčastěji je případě malých asynchronních motorů používán hliník. Ten je pod vysokým tlakem (až stovky tun) vlačován do připravené formy, ve které je sestavený rotorový paket z dynamových plechů. V další operaci je rotor obroben na soustruhu, kde jsou odstraněny nálitky, zde se také vysoustruží vnitřní průměr rotoru pro následné lisování hřídele do rotoru. V případě výběru materiálu pro klec rotoru výrazně rozhoduje cena. Cena v tomto případě převažuje výhody menších ztrát v rotoru v případě použití mědi. Hliník má totiž posledních několika let třikrát menší cenu než měď. Při výrobě rotorové klece se použitý materiál kupuje nejčastěji ve formě ingotu. Například pro elektromotor zmiňovaný v této práci se od dodavatelů odebírá tzv. bloček hliníku s čistotou 99,5 %. Cena odebíraného hliníku se skládá v průměru z 85 % aktuální ceny na Londýnské burze a 10 % režijních nákladů dodavatelů případně subdodavatelů.

Průměrná cena 1kg hliníku za březen 2018 je tedy dle LME - 42,5 Kč (Dle kurzu USD 29.3.2018) [12] . Při režijních nákladech 15% je konečná cena 48,9 Kč. Záleží také na tom, kdy dodavatel naskladnil hliník a také jak často reaguje na aktuální cenu na LME.

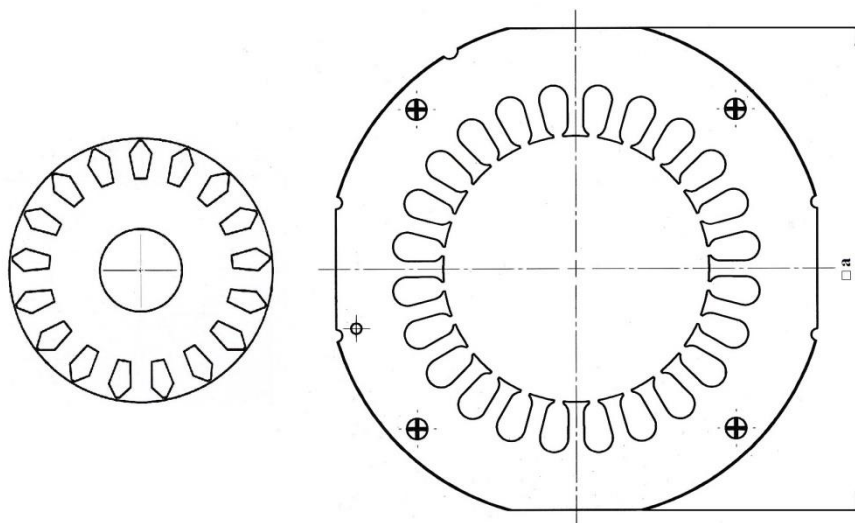
6.4 Výpočet spotřeby aktivních materiálů

Při výpočtu spotřeby aktivních materiálů bylo zapotřebí prokonzultovat s firmou ATAS a.s. výrobní proces samotného motoru. Při této konzultaci bylo zjištěno, že výroba magnetického obvodu spočívá ve stříhu statorového plechu a využití jeho vnitřní části pro plech rotorový. Od samotného výrobce plechu jsou dodány pásy s výškou pro přesně jeden statorový plech. Délka plechu je vždy pro celé statorové plechy. Z obrázku pohledu na statorový plech je vidět, že se nejedná o pravidelný kruh ale o kruh se čtyřmi rovnými částmi v těch místech, které nesousedí s otvory pro nýty. Tento úběr materiálu oproti pravidelnému kruhu je dimenzován v takové toleranci, aby se daná místa nepřesycovala. Zároveň dovolí tento tvar ekonomické využití pásů. Spotřeba materiálu na jeden statorový a rotorový plech se tedy počítá jako spotřeba jednoho čtverce o rozměrech daných právě vzdáleností těchto ploch. Vzniklý odpad tedy tvoří obsah drážek statoru a rotoru a také zbytek tvaru kruhu. Odpad

takovéto velikosti již nemá žádné další využití ve výrobě dalších plechu krom malého zisku z recyklace.

V případě výpočtu spotřeby mědi byla spočítána střední z výkresu střední délka závitů skrze citlivé údaje, co do rozměru statoru není tento výpočet uveden. U výpočtu spotřeby hliníku je výpočet také jen naznačen, avšak citlivé hodnoty nejsou dosazeny.

6.4.1 Hmotnost železa v referenčním vzorku



Obr. 6-4 Podoba statorového a rotorového plechu. [14]

Vypočet samotné spotřeby plechu na jeden statorový a rotorový plech spočívá ve výpočtu plochy čtverce:

$$S_{plech} = a \cdot a = 120,6 \cdot 10^{-3} \cdot 120,6 \cdot 10^{-3} = 14,55 \cdot 10^{-3} m^2 \quad (6.1)$$

Kde a – rozměr čtverce statorového plechu

Velikost spotřebované plochy pro statorový a rotorový plech použijeme pro výpočet objemu železa jednoho plechu:

$$V_{plech} = S_{plech} \cdot d_{Fe} = 14,55 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 7,28 \cdot 10^{-6} m^3 \quad (6.2)$$

Kde d_{Fe} – tloušťka jednoho plechu [mm],

Výpočet hmotnosti jednoho plechu:

$$m_{plech} = V_{plech} \cdot \gamma_{M70050A} = 7,28 \cdot 10^{-6} \cdot 7800 = 56,8 \cdot 10^{-3} kg \quad (6.3)$$

Kde V_{plech} – Objem spotřebovaného plechu pro výrobu jednoho statorového a rotorového plechu [m³],
 $\gamma_{M70050A}$ – Hustota plechu s označením M700-50A [kg·m⁻³],

Nakonec výpočet hmotnosti spotřebovaného železa pro základní vzorek č.1:

$$m_{Fe-vzorek1} = m_{plech} \cdot n_{plech} = 56,8 \cdot 10^{-3} \cdot 120 = 6,82 kg \quad (6.4)$$

Kde n_{plech} – počet plechů v magnetickém obvodu [-],

6.4.2 Hmotnost mědi v referenčním vzorku

Výpočet vinutí provedeme ze známé průměrné délky jednoho závitu a také známého průměru použitého vodiče $d_{Cu} = 0,53\text{mm}$. Nejprve se vypočte průřez vodiče:

$$S_{Cu-1v} = \frac{\pi \cdot d_{Cu}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,53 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,22 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \quad (6.5)$$

Kde d_{Cu} – průměr použitého vodiče [mm],

Průměr kružnice vedené středem statorových drážek:

$$d_{ds-střed} = \pi \cdot (d_{ds-vnitřní} + h_{ds}) = 0,24 \text{m} \quad (6.6)$$

Kde $d_{ds-vnitřní}$ – průměr kružnice vedené okrajem statorových drážek blíže ke vzduchové mezeře [mm],

h_{ds} – výška statorové drážky [mm],

Délka čela cívky:

$$l_{\check{c}} = \frac{d_{ds-střed}}{2p} \cdot K_{\check{c}} + 2 \cdot l_{\check{c}elo-drážka} = \frac{0,24}{2} \cdot 1,2 + 2 \cdot 0,008 = 0,16 \text{m} \quad (6.7)$$

Kde $2p$ – počet pólových dvojic [-],

$K_{\check{c}}$ – činitel dle technologie izolování čel a počtu pólů stroje, hodnota z tabulky (tabulka z [2]) – pro $2p = 2$, impregnace $K_{\check{c}} = 1,2$,

$l_{\check{c}elo-drážka}$ – délka vodiče mezi vstupem do statorové drážky a samotným čelem [m]

Střední délka závitu jako součet aktivních délek vodiče v drážce a délek čel cívky:

$$l_{Cu-1z} = 2 \cdot (l_{Fe} + l_{\check{c}}) = 2 \cdot (0,06 + 0,16) = 0,44 \text{m} \quad (6.8)$$

Objem všech tří fází statorového vinutí.:

$$V_{Cu-celk} = Q_s \cdot N_{drážka} \cdot \frac{l_{Cu-1z}}{2} \cdot S_{Cu-1v} = 24 \cdot 92 \cdot \frac{0,44}{2} \cdot 0,22 \cdot 10^{-6} \doteq 107 \cdot 10^{-6} \text{m}^3 \quad (6.9)$$

Kde Q_s – Počet drážek statoru [-],

$N_{drážka}$ – počet vodičů v jedné drážce statoru [-],

l_{Cu-1z} – Střední délka jednoho závitu [m],

S_{Cu-1v} – Průřez použitého vodiče [m],

Hmotnost spotřebované mědi pro referenční vzorek č.1.:

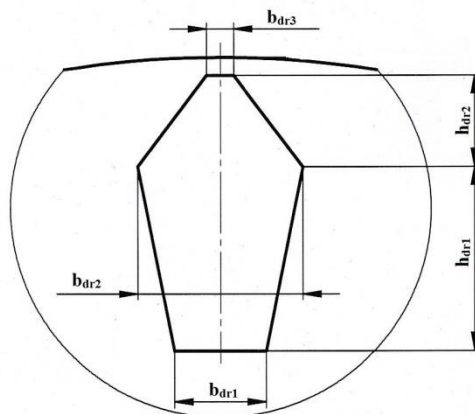
$$m_{Cu} = V_{Cu-celk} \cdot \gamma_{Cu} = 107 \cdot 10^{-6} \cdot 8960 = 0,96 \text{kg} \quad (6.10)$$

Kde $V_{Cu-celk}$ – Objem mědi ve statoru [m³],

γ_{Cu} – Hustota mědi [kg·m⁻³],

6.4.3 Hmotnost hliníku v referenčním vzorku

Výpočet spotřeby hliníku spočítáme pomocí objemu hliníku v drážkách a na obou čelech. Na ukázkou je proveden teoretický výpočet plochy drážky. Ta byla rozdělena na dva lichoběžníky a poté byly tyto dva obsahy sečteny.



Obr. 6-5 Podoba rotorové drážky. [14]

$$S_{1dr} = \frac{(b_{dr1} + b_{dr2}) \cdot h_{dr1}}{2} \quad (6.11)$$

Kde b_{dr1} – šířka spodní části drážky [mm],
 b_{dr2} – šířka nejširší části drážky [mm],
 h_{dr1} – výška drážky od spodní části po nejširší část drážky [mm],

$$S_{2dr} = \frac{(b_{dr2} + b_{dr3}) \cdot h_{dr2}}{2} \quad (6.12)$$

Kde b_{dr2} – šířka nejširší části drážky [mm],
 b_{dr3} – šířka vrchní části drážky [mm],
 h_{dr2} – výška drážky od nejširší po vrchní část drážky [mm],

Celková plocha drážky:

$$S_{dr} = S_{1dr} + S_{2dr} = 35,2 \text{ mm}^2 \quad (6.13)$$

Objem jedné drážky referenčního vzorku o délce rotorové drážky $l_{Fe-r} = 60 \text{ mm}$. Vliv natočení drážek do šroubovice je skrze citlivý údaj započítán do rezervy ve výpočtu celkové hmotnosti hliníku:

$$V_{dr} = S_{dr} \cdot l_{Fe-r} = 35,2 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 2,11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (6.14)$$

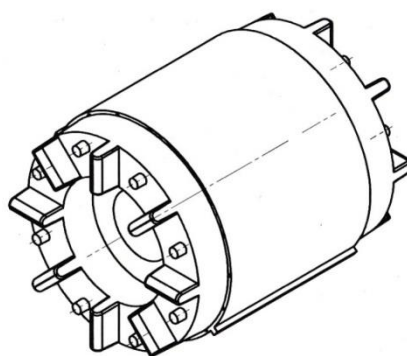
Kde l_{Fe-r} – délka drážky v rotorovém paketu [m],

Celkový objem hliníku v drážkách:

$$V_{dr-celk} = V_{dr} \cdot Q_r = 2,11 \cdot 10^{-6} \cdot 17 = 35,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (6.15)$$

Kde Q_r – počet drážek rotoru [-],

Dále byl proveden výpočet objemu čela, který se skládá z prstence a z osmi lopatek pro chlazení rotoru a ventilaci vzduchu v motoru. Skrze citlivé údaje je tento objem již vyčíslen.



Obr. 6-6 Podoba rotoru bez hřídele. [14]

$$V_{\text{čelo-rot}} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Celkový objem hliníku v rotoru:

$$V_{Al} = (2 \cdot V_{\text{čelo-rot}}) + V_{dr-celk} = (2 \cdot 25 \cdot 10^{-6}) + 35,9 \cdot 10^{-6} = 85,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (6.16)$$

Kde $V_{\text{čelo-rot}}$ – objem jednoho čela rotorového paketu [m^3],

Hmotnost spotřebovaného hliníku pro základní vzorek č.1. i s dostatečnou rezervou 50% která představuje přetoky, zatekliny, natočení drážek apod. Počítá se zde s recyklací zbytku hliníku.

$$m_{Al} = V_{Al} \cdot \gamma_{Al} \cdot 1,5 = 85,9 \cdot 10^{-6} \cdot 2700 \cdot 1,5 = 0,35 \text{ kg} \quad (6.17)$$

Kde γ_{Al} – Hustota hliníku [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

V tomto výpočtu hmotnosti aktivní materiálů byl výpočet proveden pro základní model se základními parametry. K porovnání byly vybrány další tři vzorky stejného motoru se zvýšenou účinností s následujícími parametry:

Tab. 6-4 Tabulka porovnání základních parametrů jednotlivých vybraných vzorků a porovnání s referenčním. [14], [7]

vzorek	l_{Fe}	n_{plech}	d_{Cu}	N	η	Poznámka
č	mm	-	%	%	%	
1	60	120	100	100	78,4	Základní m.
2	60	120	118,87	96,7	80,4	
3	70	140	105,66	86,9	80,0	
4	70	140	113,2	93,5	81,3	

Stejným způsobem výpočtu hmotnosti jako pro základní model byly vypočítány i hmotnosti aktivních materiálů pro ostatní vzorky.

Tab. 6-5 Tabulka vypočítaných hmotností jednotlivých aktivních materiálů pro jednotlivé vzorky.

vzorek	m_{Fe}	m_{Cu}	m_{Al}	η	Poznámka
č	kg	kg	kg	%	
1	6,82	0,96	0,35	78,4	Základní m.
2	6,82	1,31	0,35	80,4	
3	7,95	0,97	0,37	80,0	
4	7,95	1,20	0,37	81,3	

6.5 Výpočet ceny aktivním materiálů

6.5.1 Výpočet ceny železa pro jednotlivé vzorky

Nejprve se pomocí vypočítané hmotnosti železa přiřadí hrubé ceny vzorků od jednotlivých výrobců případně dodavatelů plechů.

Tab. 6-6 Tabulka vypočtených celkových cen dynamového plechu M700-50A pro jednotlivé vzorky od různých výrobců.

Firma	Cena za kg	Vzorek č.1 a 2	Vzorek č.3 a 4	Poznámky
	Kč	Kč	Kč	
Kovintrade	25	170,5	198,8	C_{2-Fe}
Flashsteel	28	191,0	222,6	
Almarinvest	25,5	173,9	202,7	C_{3-Fe}
U.S. Steel Košice	21	143,2	167,0	C_{1-Fe}
Thyssenkrupp Steel Europe AG	28,4	193,7	225,8	
Burwill Holdings Limited	12,9	88,0	102,6	
AVIC INTL	12,6	85,9	100,2	
Wuxi Sanzhou	18,8	128,2	149,5	

Pro konečné cenové zhodnocení byly vybrány tři cenově nejdostupnější firmy dodávající plechy M700-50A. Kritériem nebyla jen cena, ale i sídlo. Vybírali se firmy se sídlem v Evropě. Z těchto tří cen je spočítán aritmetický průměr, který slouží jako průměrná cena plechů M700-50A za kg.

Průměrná cena elektrotechnického plechu za kilogram od firem: Kovintrade, Almarinvest a U.S. Steel Košice.

$$C_{prům-Fe} = \frac{C_{1-Fe} + C_{2-Fe} + C_{3-Fe}}{3} = \frac{21 + 25 + 25,5}{3} = 23,8 \text{ Kč} \quad (6.18)$$

6.5.2 Výpočet ceny mědi pro jednotlivé vzorky

Obdobně jako u železa jsou vyčísleny ceny spotřebované mědi jednotlivých vzorku od různých výrobců či dodavatelů.

Tab. 6-7 Tabulka vypočtených celkových cen smaltovaného vodiče IEC 317-13 teplotní třídy 200 °C pro jednotlivé vzorky od různých výrobců.

Firma	Cena za kg	Vzorek č.1	Vzorek č.2	Vzorek č.3	Vzorek č.4	Poznámka
	Kč	Kč	Kč	Kč	Kč	
Gral – elektromotory s.r.o.	201,6	193,5	264,1	195,6	241,9	C _{3-Cu}
Copperplus	186,2	178,7	243,9	180,6	223,4	C _{2-Cu}
Labara s.r.o.	183,3	176,0	240,1	177,8	220,0	C _{1-Cu}
Elviko s.r.o.	214,9	206,3	281,5	208,5	257,9	
Eurodrut sp. zo.o.	232,3	223,0	304,3	225,4	278,8	
Marmakas	280,0	268,8	366,8	271,6	336,0	
Gomelcable	170,6	163,7	223,4	165,4	204,7	

Opět byly vybrány tři cenově nejdostupnější firmy měděné lakované vodiče dle normy IEC 317-13 GR2. Kritériem bylo opět i sídlo v Evropě.

Průměrná cena měděného lakovaného vodiče pro vinutí za kilogram od firem: Labara s.r.o., Copperplus, Gral s.r.o.

$$C_{prům-Cu} = \frac{C_{1-Cu} + C_{2-Cu} + C_{3-Cu}}{3} = \frac{183,3 + 186,2 + 201,6}{3} = 190,4 \text{ Kč} \quad (6.19)$$

6.5.3 Výpočet ceny hliníku pro jednotlivé vzorky

Zde je stanovena průměrná cena 1kg hliníku za březen 2018 dle LME (podle kurzu USD 29.3.2018) a při režijních nákladech 15%.

$$C_{prům-Al} = 48,9 \text{ Kč}$$

6.6 Výpočet celkové ceny jednotlivých vzorků a porovnání vzorku

Zde se již zkompletuje cena za jednotlivé aktivní materiály, jejichž cena se získá vynásobením hmotnosti daného materiálu průměrnou cenou za daný materiál. Poté se tyto ceny sečtou a vznikne celková cena daného vzorku.

Tab. 6-8 Tabulka cen jednotlivých aktivních materiálů, celková cena, procentuální zvýšení účinnosti a ceny motoru jednotlivých vzorků oproti referenčnímu vzorku z průměrné ceny aktivních materiálů na trhu.

vzorek	C_{Fe}	C_{Cu}	C_{Al}	C_{motor}	Zvýšení η	Zvýšení ceny	Poznámka
č	Kč	Kč	Kč	Kč	%	%	
1	162,3	182,7	17,2	362,2	-	-	ref. model
2	162,3	249,4	17,2	428,9	2,0	18,4	
3	189,2	184,7	18,1	392,0	1,6	8,2	
4	189,2	228,5	18,1	435,8	2,9	20,3	

Pro porovnání jednotlivých vzorků bylo procentuální zvýšení ceny oproti referenčnímu vzorku vyděleno procentuálním zvýšením účinnosti daného vzorku. Vznikne tak procentuální hodnota, říkající o kolik procent se zvedne cena referenčního vzorku při zvýšení účinnosti právě o 1%.

Tab. 6-9 Tabulka sloužící ke srovnání zvýšení ceny při zvýšení účinnosti η o 1% oproti referenčnímu vzorku z průměrné ceny aktivních materiálů na trhu.

vzorek	C_{motor}	Zvýšení η	Zvýšení ceny	Zvýšení ceny při zvýšení η o 1%	Poznámka
č	Kč	%	%	%	
1	362,2	-	-	-	ref. model
2	428,9	2,0	18,4	9,2	
3	365,4	1,6	8,2	5,1	
4	407,3	2,9	20,3	7	

Zde je již vidět ekonomický důsledek při zvyšování účinnosti různými opatřeními. Nejlépe dopadl vzorek č.3, na kterém je větší průměr vodiče statorového vinutí o 5,66 %, snížený počet závitů o 13,1 %, prodloužený magnetický obvod o 14.29 % a zlepšení účinnosti o 1,6 %.

7 ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce bylo úkolem prostudovat dosavadní závěrečné práce, týkající se zvyšování účinnosti malých asynchronních elektromotorů. Po nastudování těchto prací byl zúžen výběr na ekonomicky nejvýhodnější opatření vedoucí ke zlepšení účinnosti na malých asynchronních motorech. S výhodou byly vybrány ty opatření, které se týkaly stejného sériově vyráběného elektromotoru firmy ATAS a.s. o výkonu 600W, který byl na této fakultě několikrát testován spolu s několika různě upravenými vzorky. Výhodou tohoto výběru byla i možnost přímé konzultace a spolupráce výrobcem jak v oblasti technické podpory, tak i v oblasti obchodu.

Mezi ekonomicky nejatraktivnější opatření vedoucích ke zlepšení účinnosti oproti referenčnímu vzorku byly vybrány takto upravené vzorky:

4. Větší průměr vodiče statorového vinutí o 18,87 %, snížený počet závitů o 3,3 %, zlepšení účinnosti o 2 %
5. Větší průměr vodiče statorového vinutí o 5,66 %, snížený počet závitů o 13,1 %, prodloužený magnetický obvod o 14,29 % , zlepšení účinnosti o 1,6 %
6. Větší průměr vodiče statorového vinutí o 13,21 %, snížený počet závitů o 6,5 %, prodloužený magnetický obvod o 14,29 % , zlepšení účinnosti o 2,9 %

Po výběru vzorků následovala vyhodnocení vlivu těchto opatření na hmotnost aktivních materiálů jako je železo, měď a hliník. Aby bylo možné tato opatření vyhodnotit bylo nejprve nutné zjistit použité materiály z výkresové dokumentace. Pro magnetický obvod byl na všech vzorcích použit elektrotechnický plech s obchodním označením M700-50A, pro vinutí statoru byl použit smaltovaný vodič s označením ČSN IEC 317-13 GR2 UL teplotní třídy 200°C. V případě vinutí rotoru, byl použit hliník. Výpočet hmotnosti jednotlivých aktivních materiálů, byl proveden s pokud možno největším citem na citlivé rozměry, které si výrobce nepřeje zveřejnit. Poté bylo potřeba provést průzkum ceny těchto artiklů na trhu. Ceny byly zjišťovány telefonicky a emailem u výrobců případně dodavatelů. Dotaz na cenu byl vždy vztažen na nejmenší možné odebírané množství a bez dopravy. Z těchto cen byly vybrány vždy tři nejvýhodnější výrobci jak pro měď, tak pro plechy a jejich ceny byly zprůměrovány. Výběr výrobců byl omezen na oblast Evropy skrze náklady na dopravu. Tyto zprůměrované ceny již sloužily k výpočtu hrubé ceny každého vzorku. U každého vzorku byla vypočítána hmotnost použitého aktivního materiálu. Vypočtená hmotnost byla poté vynásobena průměrnou cenou za daný materiál. Z těchto cen bylo provedeno vyčíslení procentuálního zvýšení ceny oproti referenčnímu vzorku. Toto procentuální zvýšení ceny bylo také vztaženo na 1% zvýšení účinnosti, čímž můžeme lépe porovnat ekonomickou efektivnost.

Z výsledku (viz Tab. 6-8 a Tab. 6-9) je vidět, že základní vzorek a vzorek č.3 mají cenu nejbližší a to při zvýšení o 1,6 % druhým nejvýhodnějším opatřením je vzorek č.4 jenž má účinnost vyšší o 2,9 % a posledním nejvýhodnějším opatřením je vzorek č.2 se zvýšením účinnosti o 2,0 %, jenž má největší zvýšení ceny oproti základnímu vzorku v přepočtu na 1% zvýšení účinnosti.

Z výše uvedeného vyhodnocení je také vidět, že pro zvýšení účinnosti i o téměř 3% procenta stačilo pouhé prodloužení mg. obvodu a přepočet průměru použitého vodiče a počtu závitů.

8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] TŘÍSKA, Jiří. *Zapojování asynchronních motorů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. ISBN 04-503-66.
- [2] PETROV, Georgij Nikolajevič a Břetislav BENDA. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - Synchronní stroje*. Praha: Prometheus, 1982. ISBN 21-055-82.
- [3] HOMOLA, Ladislav. *Elektrické stroje na střídavý proud díl II. Asynchronní stroje*. IV. opravené vydání. Praha: I. L. Kober v Praze.
- [4] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. ISBN 36 174-57.
- [5] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Praha: ČVUT, 1997.
- [6] KLESKEŇ, Bohumír. *Elektrotechnická měření: Měření v elektrotechnice*. Praha: STNL, 1976. ISBN 04-532-76.
- [7] MACH, M. *Analýza ztrát asynchronních motorů malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 120 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..
- [8] PALSOVICS, N. *Vliv počtu rotorových tyčí na ztráty malého asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Mach, Ph.D..
- [9] NOVOTNÝ, J. *Analýza možností zvýšení účinnosti asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Mach.
- [10] ŠIŠÁK, D. *Rozbor ztrát malých asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 69 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach.
- [11] BINEK, M. *Vliv délky magnetického obvodu na účinnost jednofázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach, Ph.D.
- [12] *London Metal exchange* [online]. London: HKEX Company, 2018 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://www.lme.com/>
- [13] PLÍŠEK, O. *Analýza vlivu materiálu magnetického obvodu na účinnost asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 83 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach.
- [14] *Interní výkresová dokumentace*. ATAS Náchod, 2009.
- [15] ŽALKOVSÝ, A. *Vliv délky magnetického obvodu na účinnost malého asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 66s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

-
- [16] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoprůdé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [17] HOLUB, Gustav. Nové třídy účinnosti asynchronních motorů. *Elektro* [online]. 2013, 2013, **2013**(6), 2 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43677.pdf>
- [18] *Electrical Steel - Cogent*. Newport -South Wales: Cogent power, 2005. [online]. 2005 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/ELEC2311/T2006/NOFP.pdf>