

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ZLEPŠENÍ ENERGETICKÝCH PARAMETRŮ JEDNOFÁZOVÝCH ASYNCHRONÍCH MOTORŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

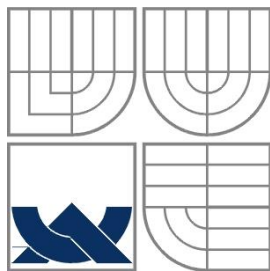
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

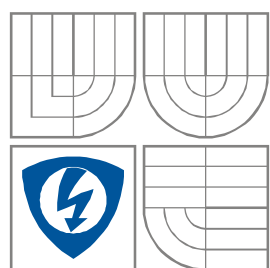
Leoš Dospěl

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

Zlepšení energetických parametrů jednofázových asynchronních motorů

Improving energy parameters of single phases induction motors

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

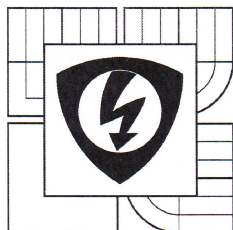
Leoš Dospěl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

BRNO, 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Leoš Dospěl

Ročník: 3

ID: 146810

Akademický rok: 2014/15

NÁZEV TÉMATU:

Zlepšení energetických parametrů jednofázových asynchronních motorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zhodnoťte vybrané typy malých asynchronních motorků
2. Analyzujte jeden konkrétní typ stroje
3. Navrhněte způsoby zvýšení účinnosti na příkladu malého stroje
4. Ověřte orientačním výpočtem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PETROV, G. N. Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - synchronní stroje. 1. vyd. Praha: Academia Praha, 1982. ISBN 509-21-857.
- [3] 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: 22. 9. 2014

Termín odevzdání: 2.6.2015

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

Konzultanti bakalářské práce:



doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalářská práce *Zlepšení energetických parametrů jednofázových asynchronních motorů* se zabývá problematikou snížení ztrát u jednofázového asynchronního motoru J22VV506 od firmy ATAS Elektromotory Náchod a.s.. První část práce se zabývá teorií asynchronních motorů a je zde popsána problematika vzniku ztrát a jejich snížení. V druhé části je proměřen daný motor a vypočítána účinnost stroje a navrhnuty způsoby snížení ztrát. V poslední části je proměřen motor s navrženou úpravou.

Abstract

Bachelor thesis *Improving energy parameters of single-phase induction motors* deals with issues of lowering the losses of a small single-phase induction motor J22VV506 from ATAS Elektromotory Náchod a.s.. The first part deals with the theory of asynchronous motors and the issue of losses and their reduction is described in this part as well. In the second part engine parameters are measured and calculated efficiency of the machine and suggested ways to reduce losses. In the last part is measuring motor with the proposed regulation.

Klíčová slova

Asynchronní motor; účinnost; ztráty; analýza; měření nakrátko; měření naprázdno; točivé magnetické pole; výkon; momentová charakteristika; ztráty ve vinutí

Keywords

Induction motor; efficiency; losses; analysis; short-circuit test; no-load measurement; rotating magnetic field; torque characteristics; torque characteristics; winding losses

Bibliografická citace

DOSPĚL, L. *Zlepšení energetických parametrů jednofázových asynchronních motorů* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 43 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma **Zlepšení energetických vlastností jednofázových asynchronních motorů** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

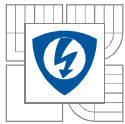
Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících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

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

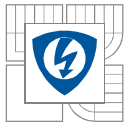
Děkuji vedoucímu semestrální práce **prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.** za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne Podpis autora

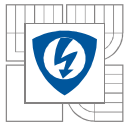


Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
ÚVOD.....	13
1 ASYNCHRONNÍ STROJE	14
1.1 ÚČINNOST ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	14
1.2 ROZDĚLENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ.....	14
1.2.1 MOTOR S VINUTÝM ROTOREM	15
1.2.2 MOTOR S KOTVOU NAKRÁTKO	15
1.3 POROVNÁNÍ JEDNOFÁZOVÉHO A TROJFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	15
1.4 TŘÍFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR ZAPOJENÝ JAKO JEDNOFÁZOVÝ	16
1.5 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	18
1.5.1 VZNIK TOČIVÉHO MAGNETICKÉHO POLE	18
1.5.2 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA.....	18
1.5.3 ŘÍZENÍ OTÁČEK ASYNCHRONNÍHO MOTORU	20
1.5.4 ZÍSKÁNÍ ZABĚRNÉHO MOMENTU	20
1.5.5 KAPACITNÍ ROZBĚH	21
1.5.6 ODPOROVÝ ROZBĚH.....	21
1.5.7 FÁZOROVÉ DIAGRAMY.....	21
1.5.8 VELIKOST KAPACITY KONDENZÁTORU PRO TRVALÝ CHOD	24
1.5.9 ASYNCHRONNÍ MOTOR SE STÍNĚNÝM PÓLEM	24
2 ANALÝZA JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU J22VV506	26
2.1 MĚŘENÍ MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY	27
2.2 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	28
2.3 MĚŘENÍ NAKRÁTKO.....	29
2.4 MĚŘENÍ ODPORŮ VINUTÍ	29
2.5 SKLUZ MOTORU J22VV506	29
3 ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI	30
3.1 ZTRÁTY ASYNCHRONNÍHO MOTORU	30
3.2 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI.....	31
3.2.1 ZTRÁTY VE VINUTÍ.....	31
3.2.2 ZTRÁTY V MAGNETICKÉM OBVODU	32
3.2.3 MECHANICKÉ A DODATEČNÉ ZTRÁTY	33
3.3 VÝPOČET ZTRÁT V ŽELEZE A MECHANICKÝCH ZTRÁT MOTORU J22VV506	33
3.4 VÝPOČET ZTRÁT VE VINUTÍ MOTORU J22VV506.....	35
3.5 NAVRHNUTÉ ÚPRAVY.....	36
4 OVĚŘENÍ NÁVRHU.....	38

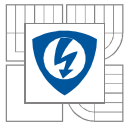


5 ZÁVĚR	42
LITERATURA	43



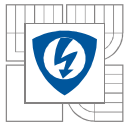
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Rotorové vinutí nakrátko-klec[11].....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2 Připojení k jednofázové síti do konfigurace trojúhelník s pomocným kondenzátorem [12].....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3 Směr otáček se provede přepojením kondenzátoru [12].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4 Připojení k jednofázové síti do konfigurace trojúhelník přes jednofázový frekvenční měnič [12]</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 5 Vznik momentové charakteristiky jednofázového asynchronního motoru[3].....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 6 Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru, průběhy.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 7 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru bez vytvořeného fázového posuvu v pomocné fázi [3].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 8 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s odporovou pomocnou fází [3].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 9 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s indukčností v pomocné fázi [3].....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 10 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází pro kapacitní rozběh [3]</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 11 a) Konstrukční uspořádání, b) Momentová charakteristika motoru se stíněným pólem[8]</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 12 Jednofázový asynchronní motor J22VV506.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 13 Momentová charakteristika J22VV506.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 14 Energetická bilance výkonů a ztrát asynchronního motoru [4]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 15 Závislost ΔP_{Fe} a ΔP_{mech} na čtverci poměru napětí k jmenovitému napětí</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 16 Závislost měrných ztrát na magnetické indukci</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 17 BH křivky</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 18 Měření upraveného jednofázového asynchronního motoru.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 19 Závislost ΔP_{Fe} a ΔP_{mech} na napětí.....</i>	<i>41</i>



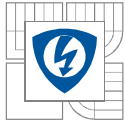
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Jmenovité hodnoty J22VV506</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 2 Zatěžovací charakteristika J22VV506.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 3 Měření naprázdno J22VV506.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 4 Měření nakrátko J22VV506</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 5 Měření odporu vinutí.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 6 Vypočtené hodnoty ztrát z měření</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 7 Vypočtené hodnoty ztrát ve vinutí statoru</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 8 Zatěžovací charakteristika</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 9 Měření nakrátko</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 10 Změřené odpory při teplotě okolí 23,2°C.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 11 Měření naprázdno</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 12 Vypočítané hodnoty ztrát v železe a mechanických.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 13 Ztráty ve vinutí statoru</i>	<i>41</i>

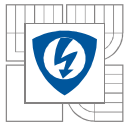


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

I	Proud	[A]
I_1	Proud odebíraný ze zdroje	[A]
I_{10}	Proud na hlavním vedení naprázdno	[A]
I_h	Proud na hlavním vedení	[A]
I_{pom}	Proud na pomocném vedení	[A]
U	Napětí	[V]
U_1	Napětí na hlavním vedení	[V]
U_{pom}	Napětí na pomocném vedení	[V]
p	Počet pól párů	[-]
P	Výkon motoru	[W]
P_0	Výkon motoru naprázdno	[W]
P_1	Příkon motoru	[W]
P_{1k}	Příkon motoru nakrátko	[W]
η	Účinnost	[-]
$\cos\varphi$	Účinitík	[-]
δ	Vzduchová mezera	[mm]
m	Počet fází	[-]
ΔP	Celkové ztráty motoru	[W]
ΔP_{Cu}	Jouleovy ztráty	[W]
ΔP_{Al}	Ztráty ve vinutí rotoru	[W]
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe	[W]
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty	[W]
ΔP_d	Dodatečné ztráty	[W]
P_δ	Výkon přes vzduchovou mezera	[W]
ΔP_h	Hysterezní ztráty	[W/Kg]
ΔP_v	Ztráty vířivými proudy	[W/Kg]
K_h	Koeficient závisející na materiálu a tloušťce plechů	[-]
K_v	Koeficient závisející na materiálu a tloušťce plechů	[-]
R	Elektrický odpor	[Ω]
R_h	Odpor hlavního vinutí	[Ω]
R_p	Odpor pomocného vinutí	[Ω]



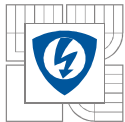
R_t	Odpor vinutí při teplotě ϑ	[Ω]
R_0	Odpor při teplotě 20 °C	[Ω]
R_{rh}	Odpor rotoru vůči hlavnímu vinutí statoru	[Ω]
Φ	Magnetický tok	[Wb]
α	Teplotní odporový součinitel	[K^{-1}]
ρ	Měrný elektrický odpor	[$\Omega m^2 m^{-1}$]
s	Skluž asynchronního motoru	[-]
M	Moment motoru	[Nm]
ω	Úhlová rychlost magnetického pole	[rad/s]
n	Otáčky motoru	[min^{-1}]
S	Zdánlivý výkon	[VA]
Q	Jalový výkon	[Var]
L	Délka	[m]
S_o	Průřez drátu	[mm^2]
B	Magnetická indukce	[T]
f	Frekvence	[Hz]
C	Elektrická kapacita	[F]
ϑ	Teplota	[°C]
$\Delta\vartheta$	Rozdíl teplot	[°C]
l	Osová délka	[m]
N	Počet závitů	[-]



ÚVOD

Asynchronní motor je nejvíce rozšířeným typem elektromotoru. Jde o točivý elektrický stroj poháněný střídavým proudem. Asynchronní motor neboli indukční, jak se mu někdy říká, se skládá ze dvou částí, pevného statoru a pohyblivého rotoru. Stator je složen z nosné kostry motoru, statorových plechů a statorového vinutí. Rotor, který je nalisovaný na hřídeli, se skládá z rotorových plechů s drážkami, do kterých se vkládají vodiče vinutí nebo je přímo odlita klec rotoru. Jednofázové asynchronní motory se vyrábějí převážně s klecovou kotvou.

V této práci bude hlouběji rozebrána problematika jednofázového asynchronního motoru. Tyto motory se vyrábějí pro malé výkony do 2kW a jsou používány tam, kde není potřeba regulovat otáčky motoru během jeho chodu. Příklady využití najdeme v každé domácnosti od kompresoru na ledniče, po sekačky, ruční nářadí, ventilátory a vysavače. Pro naše účely byl vybrán motor J22VV506 od firmy ATAS Elektromotory Náchod a.s., který je nejvíce prodáváním jednofázovým motorem. Tento motor je zde proměřen a na základě měření jsou vyhodnoceny jeho ztráty a celková účinnost. Dále jsou navrženy možnosti zvýšení účinnosti. Firma ATAS, na základě teoretických poznatků, vyrobila vylepšený motor, na kterém jsou provedena stejná měření a vypočítaná účinnost.



1 ASYNCHRONNÍ STROJE

1.1 Účinnost asynchronních motorů

Velkou část celkové spotřeby elektrické energie tvoří elektrické pohony. V průmyslu se odhaduje jejich spotřeba elektrické energie na 70%. Elektrické motory mají však velké využití i mimo průmysl, jako pohon ventilátorů klimatizačních jednotek a čerpadel. Z důvodů převážně dlouhodobého běhu těchto strojů, se kvůli úspoře elektrické energie klade velký důraz na jejich účinnost a tím na nižší spotřebu.

V roce 1998 se začal používat systém klasifikace a označování pro nízkonapěťové motory na střídavý proud. Ve spolupráci EU s evropskou organizací výrobců motorů a silové elektroniky CEMEP jsou motory rozděleny do různých tříd účinností.

V roce 2008 byl zaveden nový standard pro klasifikaci trojfázových asynchronních motorů IEC (Mezinárodní elektrotechnická komise). Předchozí klasifikace z CEMEP byla nahrazena rozdělením do tříd účinnosti EFF1, EFF2 a EFF3, kde EFF1 měla nejvyšší účinnost.

Nová klasifikace je následující:

- IE1 - standardní účinnost (Standard),
- IE2 - zvýšená účinnost (High),
- IE3 - velká účinnost (Premium),
- IE4 - velmi velká účinnost (Super Premium).

Od 1. ledna roku 2012 musí mít všechny motory účinnost alespoň třídy IE2. V kroku 2 návrhu nařízení se vyžaduje, aby všechny elektrické motory s výkony 7,5 až 375 kW, od 1. ledna roku 2015 měly účinnost alespoň třídy IE3.

Mezi dva nejvýznamnější Evropské dodavatele motorů patří Siemens a ABB. Tyto firmy běžně nabízejí motory s třídou IE2 a IE3 a začaly vyrábět i motory s třídou IE4 [6,7].

1.2 Rozdělení asynchronních strojů

Asynchronní stroje jsou nejrozšířenější kvůli jejich jednoduché výrobě a nenáročné údržbě. Dělíme je podle jejich využití na:

- a) Motor
- b) Generátor
- c) Brzda

Asynchronní motor je elektrický stroj, který slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou. Podle způsobu napájení je rozdělujeme na:

- a) Jednofázové
- b) Dvoufázové
- c) Trojfázové
- d) Vícefázové

Asynchronní motor se skládá ze statoru a rotoru. Rotory se vyrábějí ve dvou provedeních, a to:

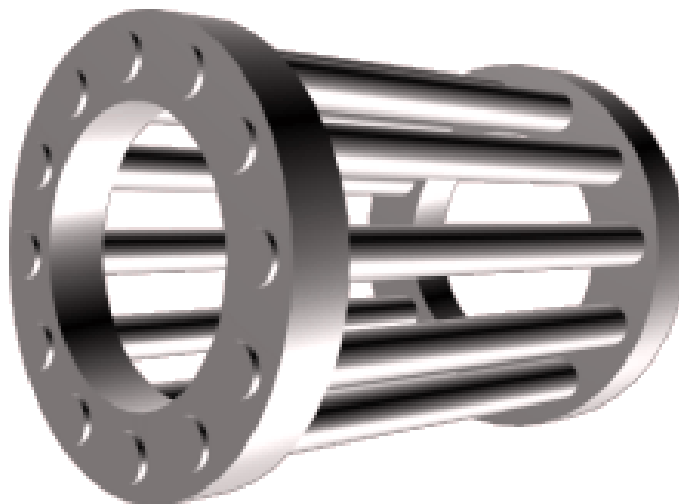
- a) S vinutou kotvou
- b) S kotvou nakrátko

1.2.1 Motor s vinutým rotorem

Motor s vinutým rotorem má rotor s drážkami, ve kterém je navinuto rotorové trojfázové vinutí, zapojené do hvězdy a zřídka do trojúhelníku. Na hřídeli spolu s vinutým rotorem jsou umístěny sběrné kroužky, které slouží k propojení přes sběrné kartáče s rotorovým spouštěčem a tím lze zmenšit škodlivý záběrný proud motoru a zvětšit záběrný moment[3].

1.2.2 Motor s kotvou nakrátko

U motoru s kotvou nakrátko je rotor odlit z hliníku nebo mědi, avšak kvůli drahé a velmi náročné výrobě se měděný rotor používá jen zřídka. Výhodou je nepřítomnost sběrných kartáčů, vysoká účinnost, nízká cena a jednoduchost zapojení. Nevýhodou je složité řízení otáček a polohy rotoru a tedy nutnost frekvenčního měniče[3].



Obrázek 1 Rotorové vinutí nakrátko-klec[11]

1.3 Porovnání jednofázového a trojfázového asynchronního motoru

Trojfázový asynchronní motor má v drážkách statoru navinuto vinutí tří fází. Je tedy potřeba takovýto stroj napájet z třífázové sítě. Jejich využití je od jednotek wattů až po velké výkony cca 15 MW.

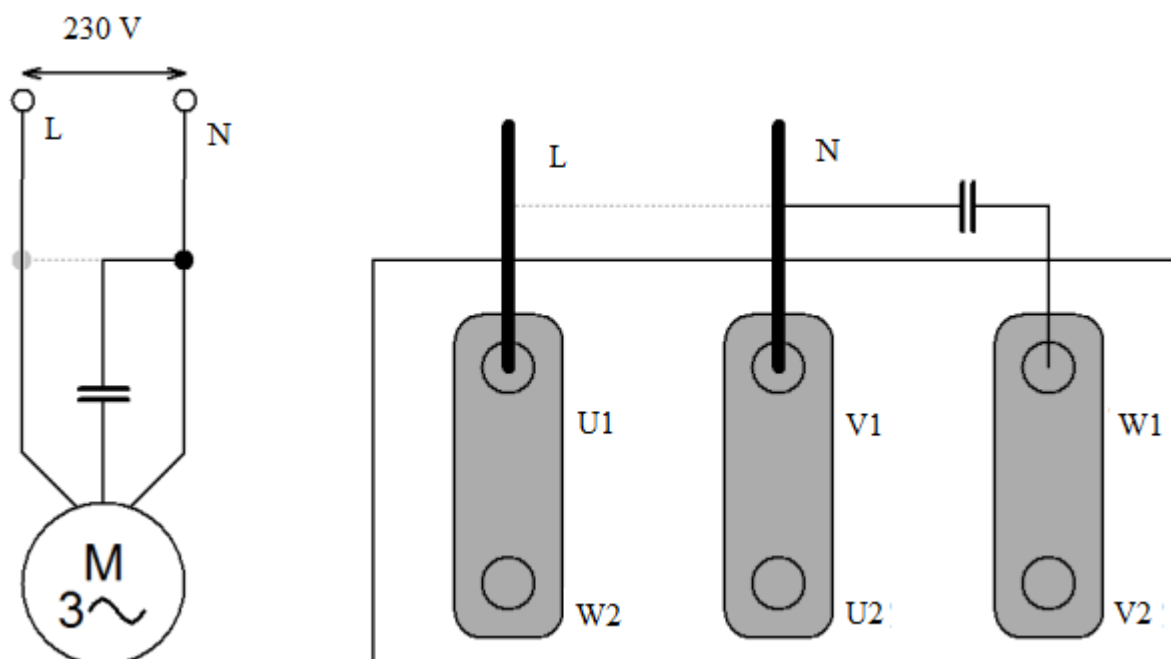
Jednofázové asynchronní motory se vyrábějí pro malé výkony do 2 kW. Jejich nespornou výhodou je jejich napájení z jedné fáze. Využití trojfázových motorů je spojeno s nutností trojfázové sítě, která obzvlášť v domácnostech a malovýrobnách může chybět. Výhoda využití dvoupólové zásuvky však znamená snížení jeho výkonu a to až o polovinu. Další nevýhoda je těžký rozběh. Asynchronní motor napájený jednou fází se sám nerozběhne a má nulový záběrný moment[5].

1.4 Třífázový asynchronní motor zapojený jako jednofázový

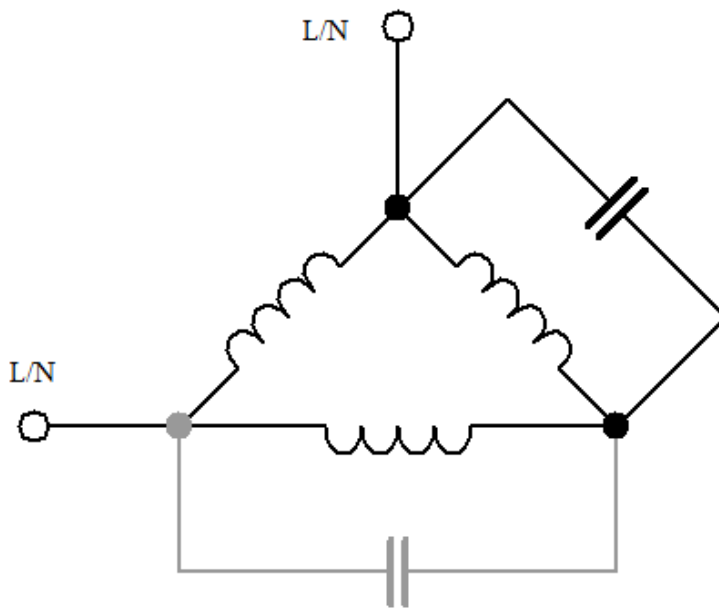
Při přepojení třífázového asynchronního motoru na jednofázovou síť, bude motor pokračovat v chodu při sníženém výkonu přibližně o 20%. Avšak motor se sám od sebe nerozběhne. Rozběh se uskutečňuje dvěma způsoby. Třífázový asynchronní motor lze připojit k jednofázové síti do konfigurace trojúhelník s pomocným kondenzátorem. Toto zapojení se nazývá Steinmetzovo. Kondenzátor se připojí do odpojené fáze motoru. Připojením kondenzátoru vytvoříme eliptické magnetické pole. Velikost kondenzátoru se volí podle vztahu:

$$C = \frac{3180}{U} \cdot I_S \quad [\text{F}] \quad (1)$$

Takto zapojený motor bude pracovat se sníženým výkonem maximálně 70% jmenovitého výkonu a sníží se i záběrný moment o cca 50%. Změna směru otáčení se provádí přepojením kondenzátoru na druhou fázi, viz Obrázek 3. Kondenzátor musí být kvůli vlivu rezonancí navržen na vyšší provozní napětí, než je špičkové napětí v síti. Toto zapojení je časté u míchaček a čerpadel. Výhoda je nízká cena kondenzátoru a nevýhodou je nízký výkon a nelze regulovat rychlost motoru.

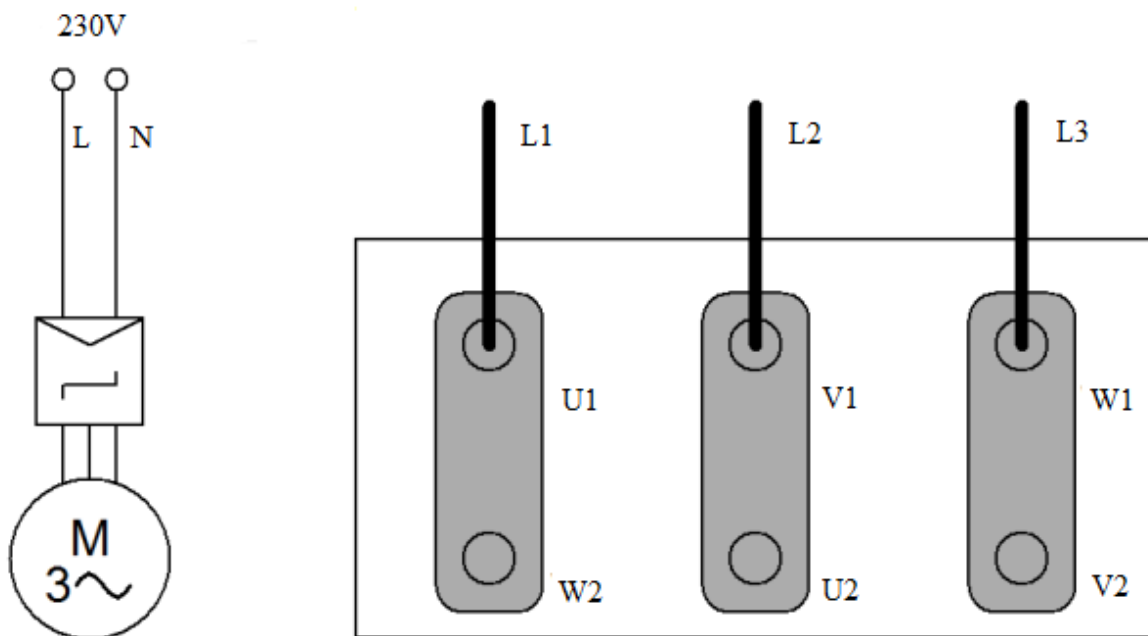


Obrázek 2 Připojení k jednofázové síti do konfigurace trojúhelník s pomocným kondenzátorem [12]

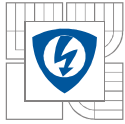


Obrázek 3 Směr otáček se provede přepojením kondenzátoru [12]

Další způsob zapojení třífázového asynchronního motoru na jednofázovou síť je do konfigurace trojúhelník přes jednofázový frekvenční měnič. Při tomto zapojení motor běží na plný výkon. Výhodou tohoto zapojení je možnost řídit otáčky motoru. Nevýhodou je zvýšení odběrového proudu a cena frekvenčního měniče [4][12].



Obrázek 4 Připojení k jednofázové síti do konfigurace trojúhelník přes jednofázový frekvenční měnič [12]



1.5 Jednofázový asynchronní motor

Jednofázový asynchronní motor se liší od trojfázového tím, že ve statoru je ve $2/3$ navinuto vinutí jedné fáze a ve zbytku vinutí rozběhové. Vyrábějí se převážně s kotvou nakrátko. Motor s kotvou na krátko má vinutí rotoru trvale spojeno nakrátko, do rotorových drážek jsou vloženy masivní tyče spojeny po obou stranách vodivými kruhy[3].

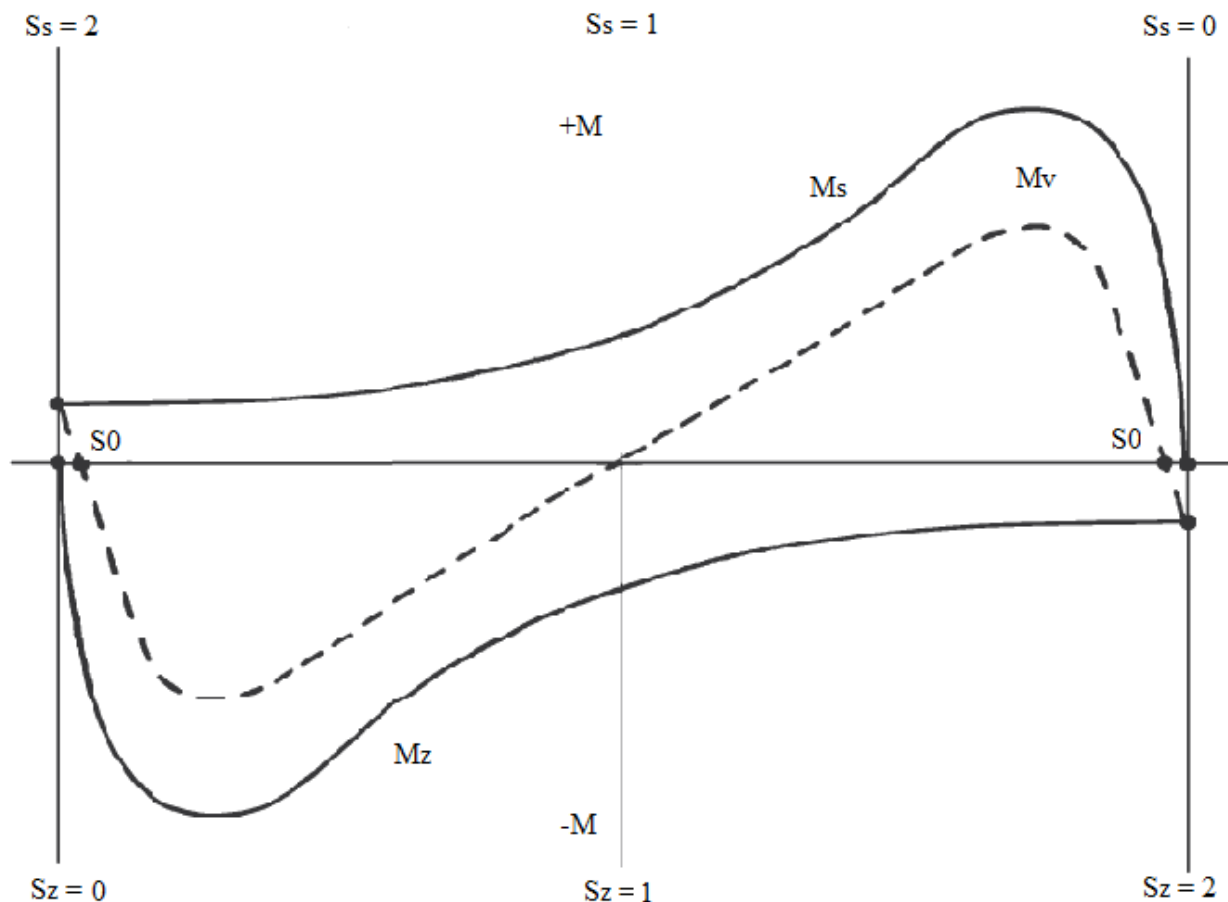
1.5.1 Vznik točivého magnetického pole

Připojíme-li motor na trojfázovou síť, vytvoří se zde točivé magnetické pole. Průchodem střídavého proudu, posunutého navzájem o 120° , statorovým vinutím, zde vznikne točivé magnetické pole a motor se roztočí bez mechanického pohybu. U jednofázového asynchronního motoru tomu tak není. Na statoru se vytvoří pulsující magnetické pole a rotor se neroztočí. Chová se jako transformátor se sekundárním vinutím nakrátko. Aby se vytvořilo točivé magnetické pole, je zapotřebí nejméně dvou cívek pootočených proti sobě o 90° a napájených dvěma proudy také pootočenými o úhel φ nejlépe 90° elektrických, aby byl chod motoru co nejefektivnější [1][3].

Pro rozběh jednofázového asynchronního motoru potřebujeme proud pomocného (rozběhového) vinutí opozdit nejlépe o 90° elektrických, abychom dosáhli kruhového magnetického pole. Téměř vždy se tento problém řeší připojením kondenzátoru.

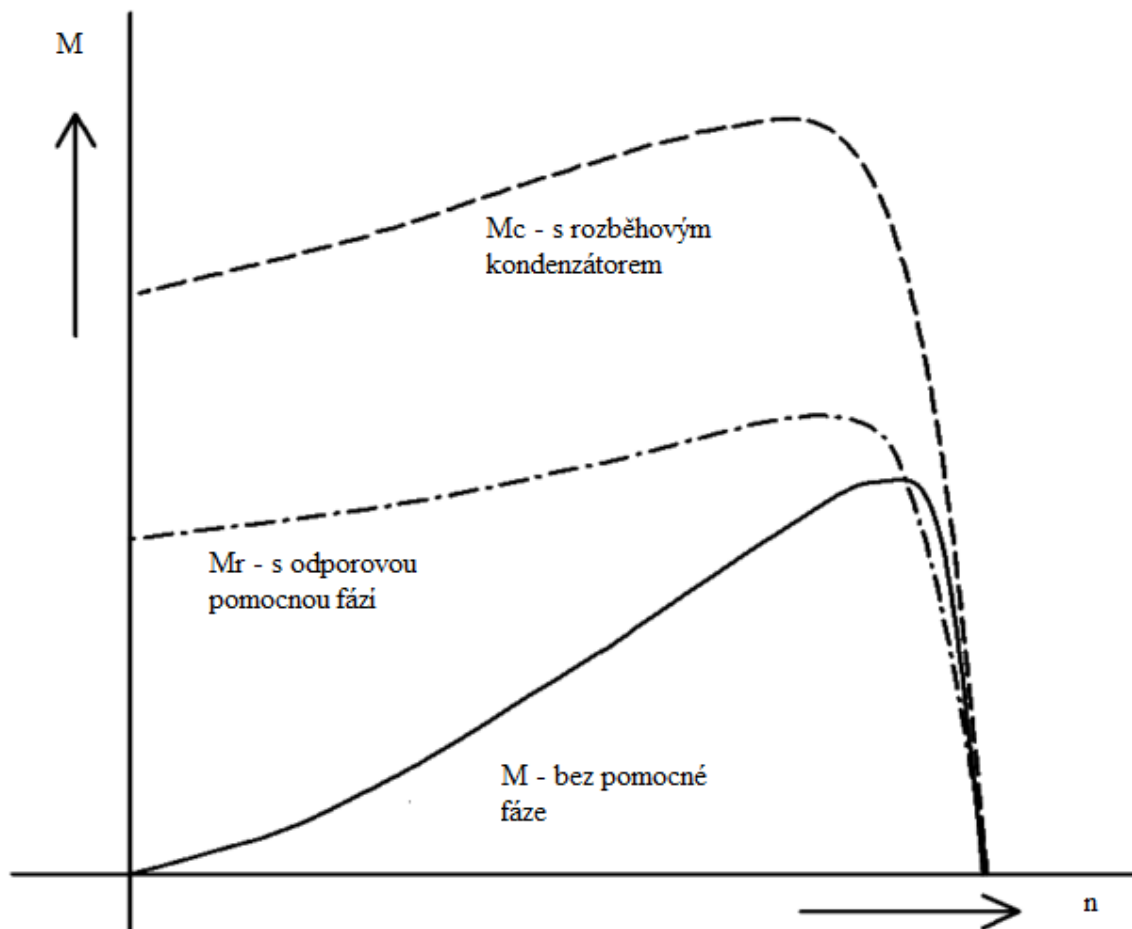
1.5.2 Momentová charakteristika

Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru je rovna součtu dvou charakteristik M_s a M_z . Z charakteristik vyplývá, že motor nikdy nedosáhne synchronních otáček, protože by vznikl záporný moment. Jeho charakteristika je pro oba směry otáčení stejná. Nevýhodou je nulový záběrný moment.



Obrázek 5 Vznik momentové charakteristiky jednofázového asynchronního motoru[3]

Na Obrázku 6 vidíme momentovou charakteristiku získanou po připojení pomocného vinutí s rozběhovým kondenzátorem a bez něj. Jak jde vidět, připojením získáme záběrný moment potřebný k rozběhu motoru.



Obrázek 6 Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru, průběhy bez pomocné fáze, s odporovou pomocnou fází a rozběhovým kondenzátorem[3]

1.5.3 Řízení otáček asynchronního motoru

Řízení otáček asynchronního motoru je závislá na frekvenci napájení f , počtu pólových dvojic p a skluzu motoru s . A je dán vztahem:

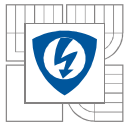
$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad [\text{min}^{-1}] \quad (2)$$

Ze vztahu (2) lze odvodit tři způsoby řízení otáček asynchronního motoru.

- Změnou počtu pólů dosáhneme skokové změny otáček.
- Změnou frekvence pomocí frekvenčního měniče, které je plynulé a hospodárné
- Změnou skluzu, který se realizuje pomocí odporového spouštěče zapojeného do rotorového obvodu. Tato varianta je však možná pouze u kroužkových motorů. Výhodou je jednoduché řízení, avšak dochází ke ztrátám na rezistorech.

1.5.4 Získání záběrného momentu

V současnosti se jednofázové asynchronní motory vyrábějí výhradně s pomocným vinutím. Aby vznikl potřebný fázový posun mezi hlavním a pomocným vinutím, tak se pomocné vinutí zapojuje s induktivním, odporovým a nejčastěji kapacitním charakterem. Po roztočení rotoru se, nejčastěji odstředivým vypínačem, pomocná fáze odpojí. Pomocná fáze nejjednoduššího jednofázového vinutí se souměrnými cívkami se připojí k hlavní fázi paralelně. Rozdílnými



vlastnostmi obou větví vznikne fázový posun φ menší než 90° . Je-li fázový posun menší než 90° nevznikne točivé magnetické pole kruhové, ale eliptické. To může mít za následek hluk, ale pro rozběh motoru to stačí. Daného fázového posunu v pomocném vinutí docílíme zapojením činného odporu, nebo kondenzátoru do série.

1.5.5 Kapacitní rozběh

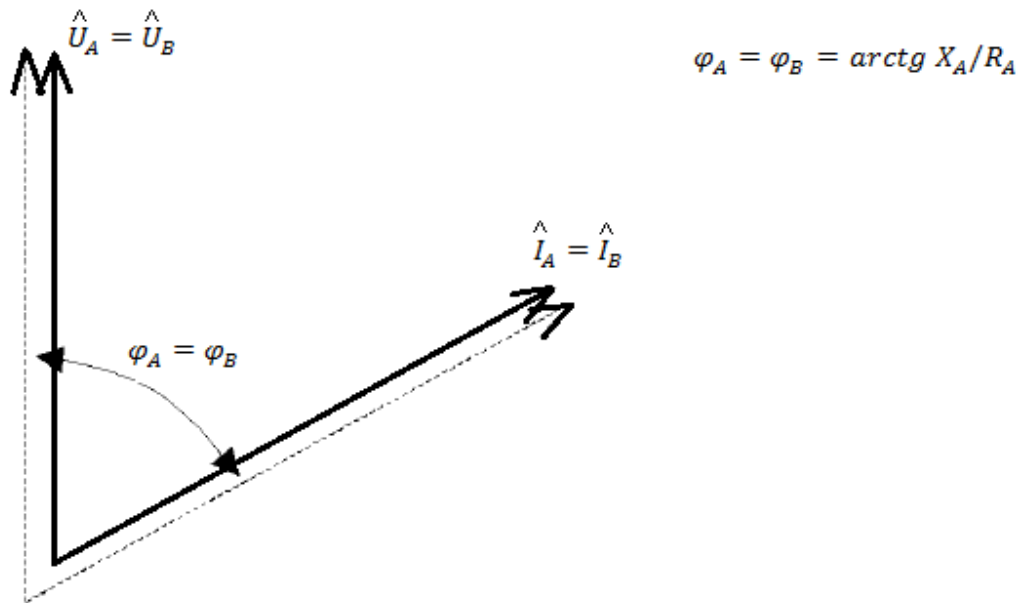
Jak již bylo zmíněno, jednofázový asynchronní motor při eliptickém magnetickém poli hlučí, a proto se do rozběhového obvodu zapojuje kondenzátor. Výhradně se používá malý a lehký kondenzátor s pevným dielektrikem, který je dimenzován na krátkodobé zatížení. Díky rozběhovému kondenzátoru lze dosáhnout až čtyřnásobku záběrného momentu při zmenšeném záběrném proudu. Velké využití si našlo toto zapojení u pohonu kompresorových chladniček, které potřebují velký záběrný moment. Kruhového magnetického pole, a tedy tichého chodu, s největším záběrným momentem lze dosáhnout pouze kapacitním rozběhem. Avšak je to možné pouze v okolí jmenovitého výkonu [8].

1.5.6 Odporový rozběh

Zvětšení odporu pomocného vinutí můžeme docílit více možnostmi. Jeden ze způsobů je zvětšit odpor vinutí. Snížení průřezu vinutí však není vhodné kvůli proudu protékajícímu obvodem, který by mohl následně vinutí přetavit. Proto se zvýší počet závitů. Avšak poslední závity jsou navinuty v opačném směru, aby se nezměnilo buzení cívky. Dalším způsobem je změna materiálu. Měděné vinutí se obvykle nahrazuje mosazným. Třetí způsob je tzv. bifilární vinutí, které má nižší indukčnost než vinutí hlavní. Bifilární vinutí je navinuto smyčkou z vodiče, který má stejný počet závitů navinutých v obou směrech. Rozběhové vinutí je dimenzováno na krátkodobé zatížení, a proto se po rozběhu odpojuje. Nejčastěji se používá odstředivého vypínače na hřídeli motoru. Kvůli poruchovosti je však dnes často nahrazeno časovým relém. Dále se může použít odpojení trojpólovým přepínačem[8].

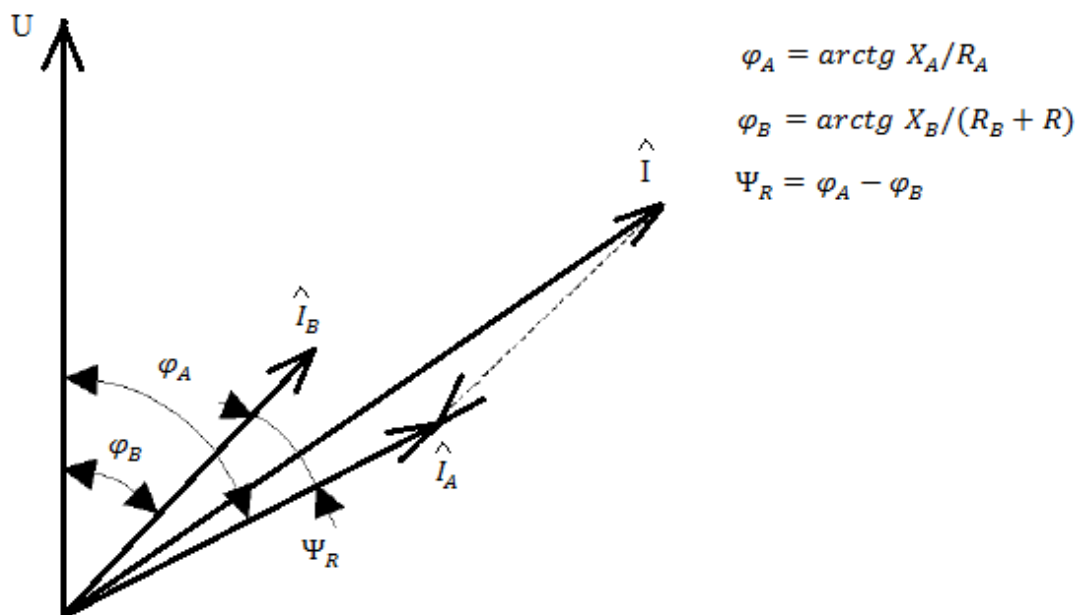
1.5.7 Fázorové diagramy

Při zapojení samostatné pomocné fáze se mezi fázorem hlavní a pomocné fáze nevytvoří žádný fázový posun, viz Obrázek 7. Bez vzniklého fázového posunu se motor nerozběhne.



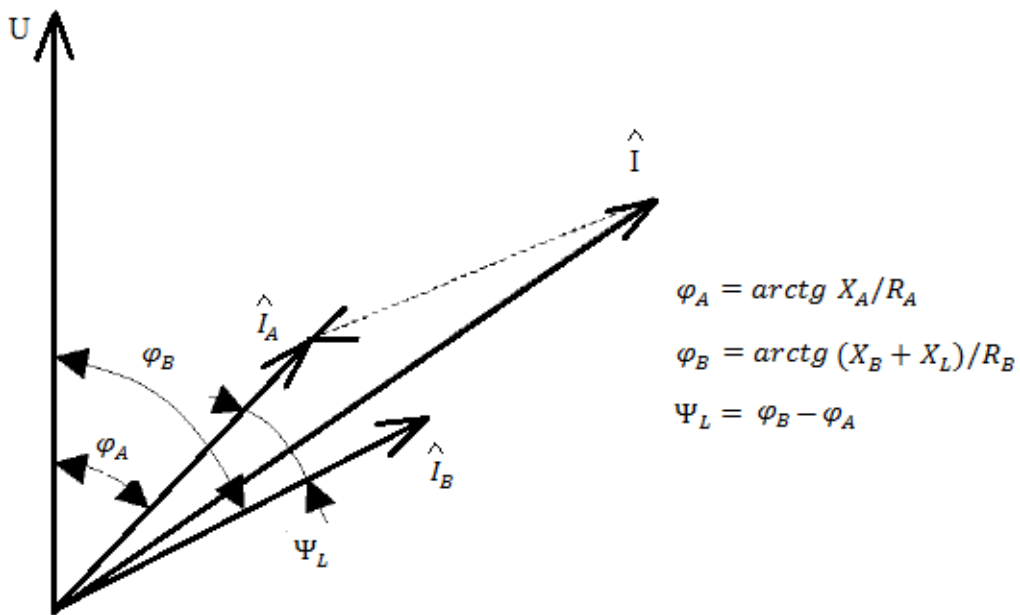
Obrázek 7 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru bez vytvořeného fázového posuvu v pomocné fázi [3]

Připojíme-li k pomocné fázi jednofázového asynchronního motoru odporový spouštěč, změní se nám fázorový diagram.



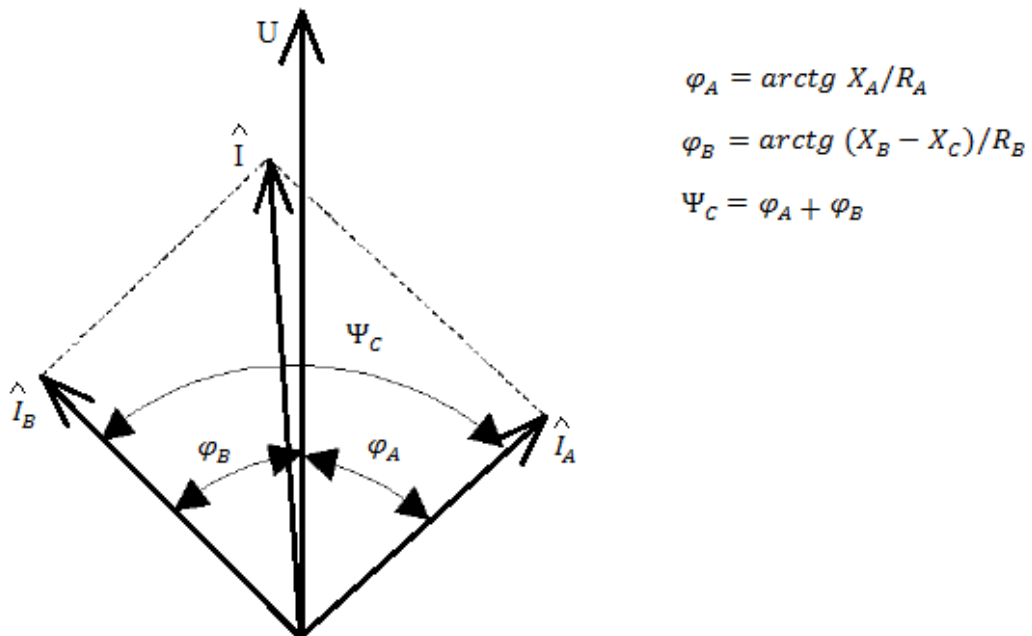
Obrázek 8 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s odporovou pomocnou fází [3]

Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru po připojení cívky do pomocné fáze.

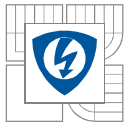


Obrázek 9 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru indukčnosti v pomocné fázi [3]

Poslední nejpoužívanější varianta je připojení kondenzátoru do pomocné fáze.



Obrázek 10 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází pro kapacitní rozběh [3]



Tato varianta se používá pro zlepšení vlastností při rozběhu. Z fázorových diagramů lze usoudit, že pouze u zapojení s kondenzátorem lze docílit pravého úhlu mezi proudy v jednotlivých vinutích a vytvoření kruhového magnetického pole a tím snížení hluku.

1.5.8 Velikost kapacity kondenzátoru pro trvalý chod

Pro návrh kondenzátoru k jednofázovému asynchronnímu motoru platí, že při napájecím napětím 230V a kmitočtu 50 Hz je zapotřebí kondenzátoru o velikosti 68 μF na 1 kW výkonu. Z toho vyplývá, že velikost kondenzátoru je závislá na velikosti výkonu motoru, jeho napájecího napětí a frekvenci. Vztahy pro určení velikosti kondenzátoru jsou empirické, kdy se výsledná hodnota se zjišťuje pomocí experimentálně určených konstant. Nejpresnější určení velikosti kondenzátoru dosáhneme pomocí metody provozního optima. Vztahy převzaty z literatury [11].

$$C = 68 \cdot P \quad [\mu\text{F}] \quad (3)$$

Obecný vztah pro výpočet kapacity kondenzátoru.

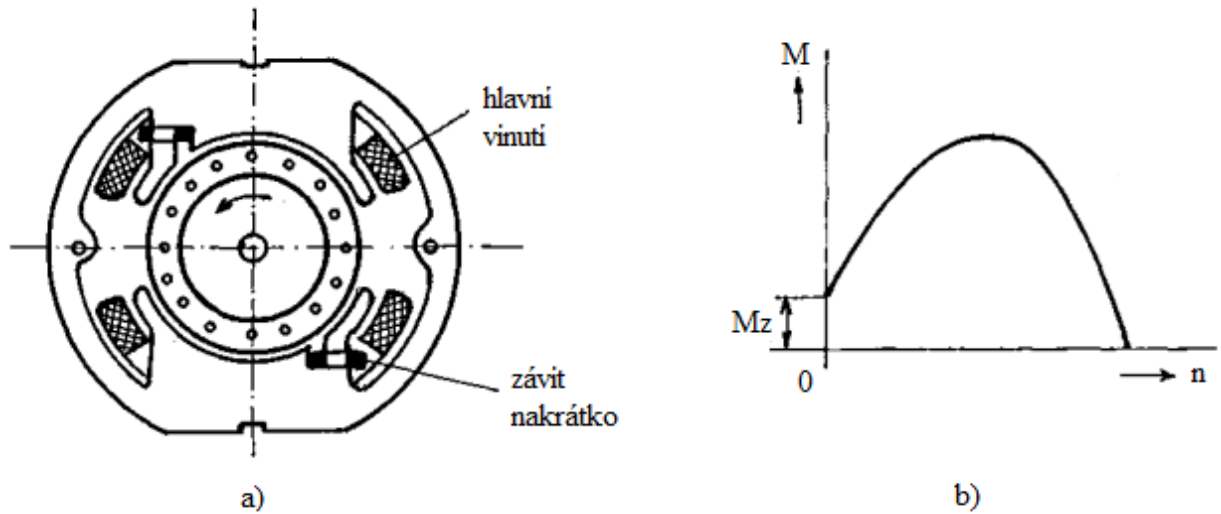
$$C = \frac{P}{U^2 \cdot f} \quad [\mu\text{F}] \quad (4)$$

Kde C je kapacita kondenzátoru, U je napájecí napětí, f je frekvence a P výkon jednofázového motoru v kW [11].

1.5.9 Asynchronní motor se stíněným pólem

U jednofázových asynchronních motorů se stíněným pólem má statorový svazek plechů vyniklé póly s cívkami hlavního vinutí. Vložením měděného pásku spojeného nakrátko do nesouměrného zářezu docílíme stínění části pólu. Průchodem střídavého proudu vinutím statoru vzniká pulsující magnetické pole, jeho působením protéká proud závitem nakrátko. Ten vytváří rovněž pulsující magnetické pole, které působí v každém okamžiku proti poli hlavního vinutí a vzniká zde v odstíněné části pólu časové zpoždění magnetického toku. V důsledku toho se posune amplituda magnetického toku na povrchu pólu od nestíněné části po stíněnou a vznikne točivé magnetické pole ve stejném směru. Směr otáčení je neměnný a závisí na umístění závitů na krátko.

Motory se stíněnými póly se vyrábějí u malých spotřebičů s lehkým rozběhem. Uplatňují se u motorů do výkonu 20W (ventilátory). Účinnost dosahuje malých hodnot a to $\eta = 0,1 - 0,25$ a účinník $\cos \varphi = 0,6$. Tyto motory se vyznačují velmi malým záběrným momentem. Výhoda jednofázových asynchronních motorů se stíněnými póly je jednoduchá a levná konstrukce. Směr otáčení je určen polohou stínících závitů. To znamená, že tyto motory se mohou otáčet pouze jedním směrem. Vzduchová mezera bývá $\delta = 0,3 - 0,5 \text{ mm}$ [5].



Obrázek 11a) Konstrukční uspořádání, b) Momentová charakteristika motoru se stíněným pólem[8]

2 ANALÝZA JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU J22VV506

Pro měření byl vybrán jednofázový asynchronní motor J22VV506, od společnosti ATAS elektromotory Náchod a.s., který je nejvíce sériově vyráběný motor. Tento motor má měděné vinutí statoru a rotor nakrátko. Štítkové hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 1.



Obrázek 12 Jednofázový asynchronní motor J22VV506

Tabulka 1 Jmenovité hodnoty J22VV506

Jednofázový asynchronní motor		
Výrobce:	ATAS elektromotory NÁCHOD a.s.	
TYP:	J22VV506	
P ₁	880	[W]
P	550	[W]
n	2650	[min ⁻¹]
C	16	[μF]
U	220-240	[V]
f	50	[Hz]
I	4,1	[A]
IP 54		

Motor J22VV506 byl změřen v laboratoři VUT na Technická 12. Na motoru byla měřena momentová charakteristika okolo jmenovitého bodu zatížení, zkouška naprázdno a nakrátko. Aby měření odpovídalo trvalému běhu stroje, bylo provedeno na zahřátém motoru.

2.1 Měření momentové charakteristiky

Měření momentové charakteristiky bylo proměřeno v okolí jmenovitého bodu a to pro 2650 otáček za minutu a změřeného jmenovitého momentu 1,98 Nm. Výsledky měření byly zaznamenány do Tabulky 2a výsledná momentová charakteristika je zobrazena na Obrázku 13.

Tabulka 2 Zatěžovací charakteristika J22VV506

U _I	I _I	φ _I	P	Q	S	U _{pom}	I _{pom}	φ _{pom}	M	n	I _h	φ _h
[V]	[A]	[°]	[W]	[VAr]	[VA]	[V]	[A]	[°]	[Nm]	[min ⁻¹]	[A]	[°]
233,1	4,825	21,30	1048,0	408,6	1124,9	233,2	1,668	45,15	2,508	2525	4,429	41,49
233,2	3,949	25,57	830,6	397,4	920,8	233,2	1,746	44,42	1,988	2662	3,731	51,65
233,7	3,337	31,98	661,4	413,0	779,8	233,7	1,805	44,45	1,508	2761	3,402	63,04
233,8	2,872	41,54	502,6	445,4	671,6	233,8	1,860	45,03	1,009	2846	3,331	75,46
234,0	2,675	54,24	365,8	507,9	626,0	234,0	1,914	45,85	0,509	2918	3,552	86,29
234,1	2,680	63,70	278,0	562,3	627,3	234,1	1,949	46,40	0,163	2964	3,817	92,35

Pro změřené hodnoty blízké jmenovitým otáčkám $n = 2662$ ot/min a momentu $M = 1,988$ Nm vypočítáme účinnost motoru.

$$\eta = \frac{P}{P_1} \quad [-] \quad (5)$$

Kde P_1 je změřený příkon 830,6 W a P výkon určený vztahem.

$$P = M \cdot \omega \quad [W] \quad (6)$$

Dosaďme-li do rovnice (5) a (6) dostaneme účinnost motoru J22VV506.

$$P = M \cdot \omega = 1,988 \cdot 2\pi \cdot \frac{2662}{60} = 554,18 \quad [W] \quad (7)$$

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{554,18}{830,6} = 0,667 \quad [-] \quad (8)$$

Účinnost při jmenovitém bodě nám vyšla 66,7 %. Dále určíme proud, který prochází hlavním vinutím. Pro výpočet musíme znát charakter proudu v pomocném vinutí a charakter proudu odebíraného ze sítě. Velikost proudu procházejícího hlavním vinutím získáme odečtením fázoru pomocného vinutí od fázoru celkového proudu. Proud odebíraný ze sítě je induktivního charakteru a proud v pomocné fázi je kapacitní. Vztahy převzaty z literatury [11].

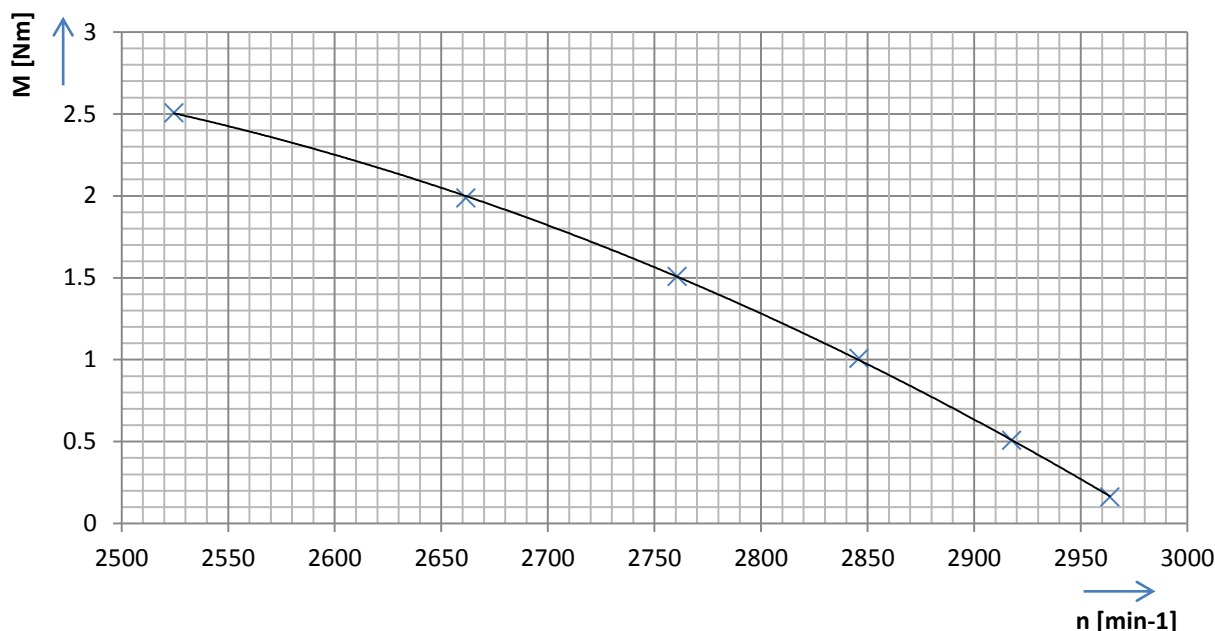
$$I_h \angle \varphi_h = I_1 \angle (-\varphi_1) - I_{Pom} \angle (\varphi_{Pom}) \quad [A; ^\circ] \quad (9)$$

$$I_h \angle \varphi_h = I_1 \angle (-\varphi_1) - I_{Pom} \angle (\varphi_{Pom}) \quad [A; ^\circ] \quad (9)$$

dostaneme výsledný proud pro první řádek Tabulky 2.

$$4,825 \angle (-21,30^\circ) - 1,668 \angle (45,15^\circ) = 4,429 \angle (-41,49^\circ) A \quad (10)$$

Momentová charakteristika v oblasti pracovního bodu



Obrázek 13 Momentová charakteristika J22VV506

2.2 Měření naprázdno

Měření naprázdno proběhlo při odpojeném kondenzátoru. Při měření naprázdno budeme měnit vstupní napětí od 110 % po 30 % jmenovitého vstupního napětí. Skluz motoru je při chodu naprázdno malý a můžeme ho zanedbat a tím i ztráty v železe rotoru. Změřené hodnoty jsou zaznamenány v Tabulce 3.

Tabulka 3 Měření naprázdno J22VV506

U ₁ [V]	I ₁₀ [A]	P ₀ [W]	Q ₀ [VAr]	S ₀ [VA]	U _{pom} [V]	n [min ⁻¹]
255,4	5,221	374,6	1279,9	1333,6	255,5	2953
229,5	3,651	226,6	806,6	837,9	229,5	2962
210,6	2,923	165,5	592,7	615,4	210,6	2964
191,8	2,424	125,3	447,9	465,1	191,9	2965
170,4	1,984	93,6	324,8	338,0	170,4	2963
150,1	1,648	72,6	236,4	247,3	150,1	2959
128,5	1,357	57,4	164,6	174,3	128,5	2951
107,5	1,123	46,6	111,4	120,7	107,5	2934
86,0	0,937	39,2	70,4	80,6	86,0	2904

2.3 Měření nakrátko

Asynchronní motor při měření nakrátko je zabrzděn dynamometrem a simuluje stav spouštění. Naměřené hodnoty takto zapojeného motoru nám určují charakteristické vlastnosti při spouštění motoru, jako záběrový moment a záběrový proud. Pro měření nakrátko nemůžeme namáhat stroj na jmenovité napětí, protože stroj se netočí a tedy i nechladí. Vlivem procházejícího proudu by se mohl poškodit. Naše měření bylo provedeno od 8 % do 60 % jmenovitého napětí

Tabulka 4 Měření nakrátko J22VV506

U _I	I _I	φ _I	P	Q	S	U _{pom}	I _{pom}	φ _{pom}	M	I _h	φ _h
[V]	[A]	[°]	[W]	[VAr]	[VA]	[V]	[A]	[°]	[Nm]	[A]	[°]
19,7	0,669	42,54	9,7	8,9	13,2	19,73	0,139	77,15	0,057	0,748	51,83
40,6	1,645	33,84	55,5	37,2	66,8	40,61	0,257	79,20	0,073	1,762	41,56
61,6	2,625	30,58	139,2	82,3	161,7	61,62	0,370	79,72	0,111	2,775	37,76
80,8	3,507	29,01	247,9	137,5	283,5	80,84	0,472	79,85	0,170	3,687	35,97
105,3	4,623	27,55	431,5	225,1	486,7	105,28	0,603	79,84	0,271	4,838	34,38
124,6	5,493	26,43	613,0	304,6	684,5	124,63	0,708	79,84	0,373	5,732	33,24
141,4	6,178	25,29	789,8	373,1	873,5	141,42	0,798	79,76	0,477	6,432	32,17

2.4 Měření odporů vinutí

Pomocí multimetru byl změřen odpor hlavního a pomocného vinutí za studena, při pokojové teplotě $\vartheta = 22,1$ °C. Poté byl motor spuštěn a měření proběhlo po dvou hodinách chodu, aby byl motor zahřát na provozní teplotu. Měření odporů bylo opakováno před každým měřením.

Tabulka 5 Měření odporu vinutí

Měření	R _h	R _p
	[Ω]	[Ω]
Za studena	3,840	8,024
Naprázdko	4,567	9,544
Nakrátko	4,476	8,912
Momentová char.	4,567	9,544

2.5 Skluz motoru J22VV506

U asynchronních motorů se otáčky liší od synchronních. Tento rozdíl se nazývá skluz. Tento skluz je vyjádřen vztahem:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3000 - 2650}{3000} = 0,1167 \quad (11)$$

Kde n jsou jmenovité otáčky a n_s synchronní otáčky motoru, které jsou definovány vztahem:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ min}^{-1} \quad (12)$$

3 ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI

Elektrické stroje slouží k vzájemné přeměně mechanické a elektrické energie. Při této přeměně se část energie mění na teplo, které dále zahřívá stroj. Toto teplo nazýváme ztráty a je nedílnou součástí všech elektrických strojů.

3.1 Ztráty asynchronního motoru

Výkon, který motor odebírá ze sítě, se označuje jako P_1 a je nazýván příkonem. Příkon se určí jako součin napětí, proudu a účinníku. Výkon stroje se označuje písmenem P a je vždy menší než příkon. Celkové ztráty motoru získáme odečtením výkonu P od příkonu P_1 . Tyto ztráty se mění ve stroji na teplo a zahřívají ho tím. Vzorce převzaty z literatury [4].

$$P_1 = m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad [W] \quad (13)$$

Kde m je počet fází, U_1 napětí na jedné fázi, I_1 je proud fází a $\cos\varphi$ je účinník.

$$\Delta P = P_1 - P \quad [W] \quad (14)$$

Celkové ztráty ΔP v motoru můžeme rozdělit do několika skupin. Průchodem proudu ve vinutí statoru i rotoru vznikají Jouleovy ztráty ΔP_{Cu} dále ztráty v železe ΔP_{Fe} , mechanické ztráty ΔP_{mech} vzniklé třením a větráním a dodatečné ztráty ΔP_d , které se pohybují v rozmezí 0,5-1 % výkonu stroje.

Jouleovy ztráty závisí na odporu vinutí R přepočítaného na dovolené oteplení podle třídy izolace, druhé mocnině proudu I a počtu fází m .

$$\Delta P_{Cu1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad [W] \quad (15)$$

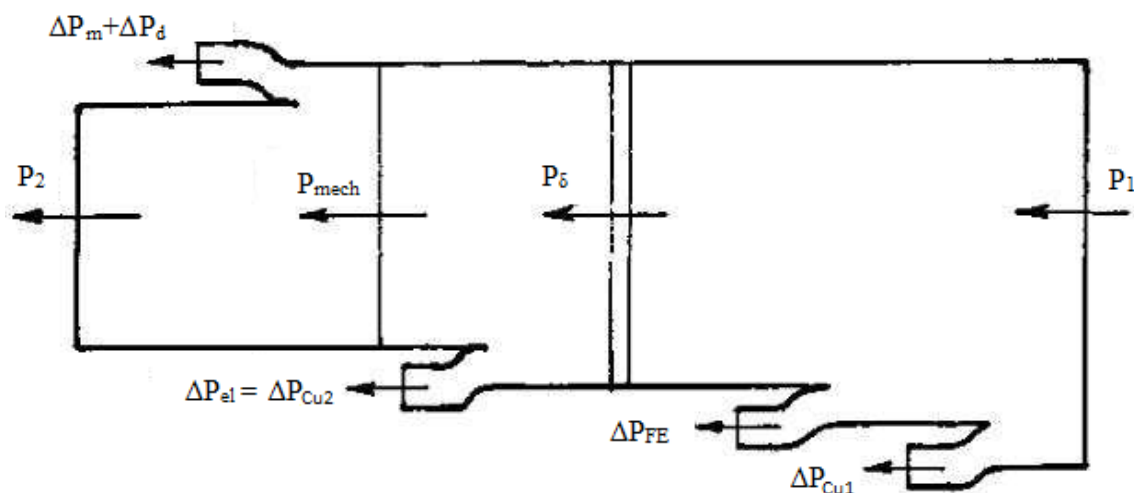
$$\Delta P_{Cu2} = s \cdot P_\delta \quad [W] \quad (16)$$

Kde P_δ je výkon přes vzduchovou mezeru a s je skluz. Výkon P_δ určíme jako součin momentu M a úhlové rychlosti magnetického pole statoru ω_1 .

$$\Delta P_\delta = M \cdot \omega_1 = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \quad [W] \quad (17)$$

Kde p je počet pólových dvojic a n otáčky magnetického pole statoru. Skluz se dá určit z poměru Jouleových ztrát ve vinutí rotoru a výkonu přes vzduchovou mezeru P_δ .

$$\frac{P_{Cu2}}{P_\delta} = s \quad [-] \quad (18)$$



Obrázek 14 Energetická bilance výkonů a ztrát asynchronního motoru [4]

Účinnost η je rovna podílu výkonu P k příkonu P_1 .

$$\eta = \frac{P}{P_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (19)$$

Účinitník $\cos\varphi$ je fázový posun mezi napětím a proudem, který vzniká vlivem indukčního charakteru motoru. Je roven podílu činného výkonu P a zdánlivého výkonu S [4 9].

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \quad [-] \quad (20)$$

3.2 Možnosti zvýšení účinnosti

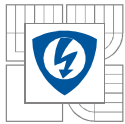
V současné době je velký tlak na zvyšování účinnosti elektrických strojů a tím úspory elektrické energie. Účinnost stroje je dána poměrem mechanického výkonu s elektrickým příkonem. Z kapitoly 1.1 můžeme vidět, že účinnosti motorů se dělí do tříd podle jejich procentuální účinnosti od IE1 do IE4. Nejméně účinná třída IE1 je dnes zakázána. Zmenšení ztrát je tedy velmi důležité hledisko při vývoji nových prototypů. Ztráty v asynchronních motorech se mění v teplo. Teoretických způsobů zmenšení ztrát je mnoho, z Obrázku 14 lze usoudit několik možností, ač některé z nich jsou pro výrobu neekonomické až nereálné.

3.2.1 Ztráty ve vinutí

Z provedeného měření je patrné, že největší ztráty vznikají ve satorovém vinutí. Jedinou možností jak zmenšit Jouleovy ztráty ve vinutí je snížit elektrický odpor satorového a rotorového vinutí. Toho lze dosáhnout změnou průřezu a materiálu vodiče. Ze vztahu (21) vidíme závislost ztrát na odporu, který se mění vlivem teploty a geometrických rozměrů, jako průřezu a délky. Vztahy převzaty z literatury [10].

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \Delta\vartheta) \quad [\Omega] \quad (21)$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S_0} \quad [\Omega] \quad (22)$$



Kde R_t je odpor vinutí při teplotě ϑ , R_0 je odpor vinutí při 20°C , α je teplotní odporový součinitel a $\Delta\vartheta$ je nárůst teploty od 20°C .

Zvětšení průřezu vinutí statoru je možno za několika předpokladů. První možností je zvětšení drážek pro vinutí. Druhou možností je zvýšení koeficientu plnění mědi $k_{p,Cu}$. V současné době výrobní procesy neumožní plné využití prostoru drážky. Koeficient plnění mědi $k_{p,Cu}$ se vypočítá jako podíl plochy, kterou zabírá vinutí S_{Cu} a plochy drážky $S_{dr} = 67,7 \text{ mm}^2$.

$$S_{Cu} = N \cdot Sv = N \cdot \pi \cdot r^2 = 80 \cdot \pi \cdot 0,3^2 = 22,61 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

$$k_{p,Cu} = \frac{S_{Cu}}{S_{dr}} = \frac{22,61}{67,7} = 0,334 \quad (24)$$

Ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{Al} vyšly jako třetí největší ztráty. Rotor vyrobený z hliníku o měrném odporu $\rho_{Al} = 0,0267 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ by se dal nahradit mědí s nižším měrným odporem $\rho_{Cu} = 0,0169 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$. Změna materiálu kotvy asynchronního motoru na měď, se ukázala velmi drahá pro její teplotu tání 1083°C oproti hliníku kde teplota tání je 660°C . Technologie pro výrobu měděných klecí kvůli vysoké teplotě jsou velmi drahé a energeticky nákladné. I tato možnost má však svoje nevýhody. Při vyšších výrobních teplotách se může vlivem tepelného namáhání poškodit elektrotechnické vlastnosti plechů. Změna materiálu s nižším měrným odporem dále ovlivní zatěžovací charakteristiku motoru a zvýší se záběrný proud odebíraný při spouštění motoru.

3.2.2 Ztráty v magnetickém obvodu

Další možností je zmenšení vzduchové mezery mezi statorem a rotorem. Tato mezera však nemůže být zmenšena natolik, aby nedocházelo ke kolizi statoru a rotoru při vibraci rotoru. Zmenšení šířky plechů statoru nebo změnou jejich materiálu dosáhneme menších ztrát v železe, které můžeme rozdělit na hysterezní a ztráty vířivými proudy [2].

Ztráty přemagnetováním vznikají změnou magnetického toku a nazývají se hysterezní ztráty. Hysterezní ztráty jsou závislé na ploše hysterezní smyčky magnetického materiálu. Úhrnné hysterezní ztráty jsou závislé na druhé mocnině magnetické indukce B , kmitočtu f a hmotnosti železných částí magnetického obvodu ξ . Tento vztah se nazývá Steinmetzův vzorec. Vzorce převzaty z literatury [10].

$$\Delta P_h = \xi f B^{1,6} \quad [\text{W/Kg}] \quad (25)$$

Pro praktické výpočty se používá upravený vzorec.

$$\Delta P_h = K_h \frac{f}{50} B^2 \quad [\text{W/Kg}] \quad (26)$$

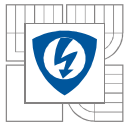
Kde K_h je koeficient závislejší na materiálu a tloušťce plechů.

Pro výpočet ztrát vířivými proudy se používá vzorec.

$$\Delta P_v = K_v \left(\frac{f}{50}\right)^2 B^2 [\text{W/Kg}] \quad (27)$$

Kde K_v je koeficient závislejší na materiálu a tloušťce plechů, f je kmitočet a B je magnetická indukce. Celkové ztráty v železe dostaneme při součtu jednotlivých ztrát a je dán vztahem.

$$\Delta P_{Fe} = 2G \left[K_h \frac{f}{50} + K_v \left(\frac{f}{50}\right)^2 \right] B^2 \quad [\text{W}] \quad (28)$$



Ze vztahů vidíme, že snížením magnetické indukce snížíme kvadraticky ztráty v železe. Magnetickou indukci lze snížit prodloužením osově délky motoru, jak můžeme vidět v následujícím vztahu: (Vztahy převzaty z literatury [14])

$$B_{max} = \frac{1}{N \cdot S} \int u(t) dt \quad (29)$$

Kde S je plocha vzduchové mezery. Změnou magnetické indukce budou ovlivněny parametry motoru. Indukované napětí a elektromagnetický moment motoru jsou závislé na osově délce l a magnetické indukci B .

$$U_i = 4,44 \cdot \phi \cdot f_1 \cdot N \cdot k_v \approx l \cdot N \cdot B \quad (30)$$

$$M = \frac{3}{2} p \cdot \text{Im}(i_r \cdot \psi_r) \approx l \cdot B \cdot \sigma \quad (31)$$

Kde N je počet závitů a σ je proudová hustota v drážce statorového vinutí. Aby nedošlo ke změně parametrů, musíme zachovat poměr mezi původními a změněnými veličinami označenými indexem 0.

$$l_0 \cdot N_0 \cdot B_0 = l \cdot N \cdot B \quad (32)$$

$$l_0 \cdot \sigma_0 \cdot B_0 = l \cdot \sigma \cdot B \quad (33)$$

3.2.3 Mechanické a dodatečné ztráty

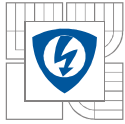
Existují tři skupiny mechanických ztrát a to ztráty způsobené třením v ložiskách, třením rotoru o vzduch a ventilační v případě, že má ventilátor. Ventilační ztráty jsou způsobeny odporem vzduchu vůči ventilátoru a tření je ovlivněno ložisky. Nejčastěji používané ventilátory jsou radiální ventilátory. Radiální ventilátory se používají u motoru s oběma směry otáčení a mají účinnost 0,15-0,2. Další ventilátory se nazývají axiální, které mají účinnost 0,3 - 0,5 podle zahnutí lopatek. Další možnost jak snížit ventilační ztráty u vysokootáčkových motorů je připojení spojky, která slouží k snížení otáček ventilátoru. Ztráty způsobené třením rotoru o vzduch ve vzduchové mezeře se mohou řešit uzavřením motoru do vakua. Tento způsob se používá u gyroskopů [14].

Další ztráty nazýváme dodatečné a jejich hodnota se pohybuje okolo 0,5 % výkonu u motorů s vinutým rotorem a 1-2 %, výjimečně 5% i motorů s kotvou nakrátko. Tyto ztráty jsou ovlivněny zatížením motoru. Jejich hodnota je určena měřením a vypočítá se z rozdílu ztrát daných z diferencí příkonu, výkonu a součtu dílčích ztrát naprázdno a nakrátko. Přídavné ztráty vznikají vlivem vyšších harmonických sil, které mají za následek vyvolání povrchové a pulsační ztráty. Kotvy nakrátko s šikmými neizolovanými tyčemi mají ztráty vlivem proudu procházejícího železem rotoru napříč od jedné tyče ke druhé a u rovných tyčí přídavné ztráty v kleci [2].

Parazitní momenty vyvolané stupňovými harmonickými můžeme omezit tím, že zešikmíme rotorové drážky o jednu statorovou rozteč. Tímto způsobem můžeme téměř vyrušit přídavné ztráty v klecové kotvě způsobeny při chodu naprázdno. Zešikmení rotorových tyčí má smysl pouze v případě, že jsou-li tyče izolované od rotorových plechů [2].

3.3 Výpočet ztrát v železe a mechanických ztrát motoru J22VV506

Pro výpočet ztrát v železe a mechanických ztrát vycházíme z naměřených hodnot získaných z měření na prázdko. Odpor rotoru vůči hlavnímu vinutí statoru R_{rh} pro jmenovitý proud. Vzorce převzaty z literatury [13]



$$R_{rh} = \frac{P_{1k}}{I_{hk}^2} - R_h = \frac{431,5}{4,838^2} - 4,476 = 13,96 \Omega \quad (34)$$

Při znalosti odporu R_{rh} můžeme vypočítat součet mechanických ztrát a ztrát v železe.

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} &= P_0 - \left(R_h + \frac{R_{rh}}{4} \right) \cdot I_{10}^2 = \\ &= 374,6 - \left(4,567 + \frac{13,96}{4} \right) \cdot 5,221^2 = 154,94 \text{ W} \end{aligned} \quad (35)$$

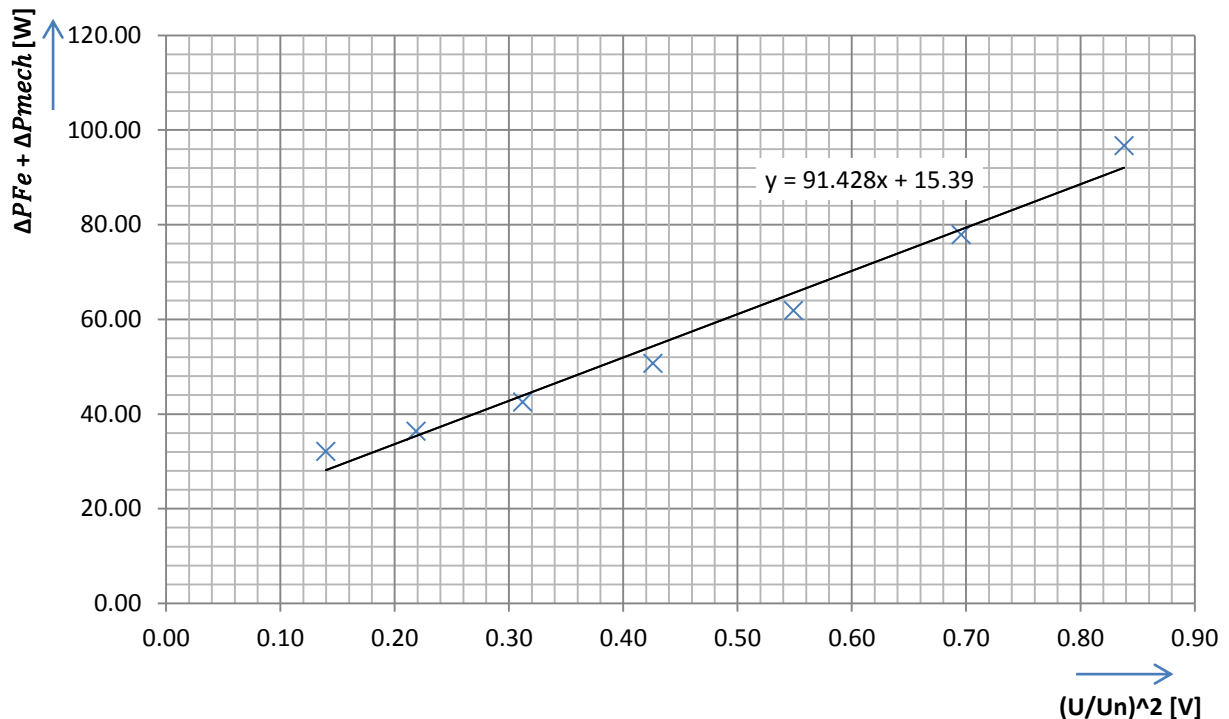
V Tabulce 6 je zobrazena změna ztrát v závislosti na napětí.

Tabulka 6 Vypočtené hodnoty ztrát z měření

U1	(U/U _n) ²	I10	P0	ΔPFE+ΔPmech	ΔPFE
[V]	[V]	[A]	[W]	[W]	[W]
255,4	1,23	5,221	374,6	154,94	139,55
229,5	1,00	3,651	226,6	119,20	103,81
210,6	0,84	2,923	165,5	96,69	81,30
191,8	0,70	2,424	125,3	77,95	62,56
170,4	0,55	1,984	93,6	61,90	46,51
150,1	0,43	1,648	72,6	50,73	35,34
128,5	0,31	1,357	57,4	42,58	27,19
107,5	0,22	1,123	46,6	36,40	21,01
86,0	0,14	0,937	39,2	32,12	16,73

Vypočítané ztráty vyneseme do grafu v závislosti na čtverci poměru napětí k jmenovitému napětí a posloupnost lineárně proložíme. Získáme velikost ztrát pro jmenovité zatížení. Z rovnice grafu získáme velikost jednotlivých ztrát. Pro jmenovité napětí jsou odečteny mechanické ztráty ΔP_{mech} přibližně 15,39 W a ztráty v železe ΔP_{Fe} jsou rovny přibližně 103,81 W.

Závislost ΔP_{Fe} a ΔP_{mech} na napětí



Obrázek 15 Závislost ΔP_{Fe} a ΔP_{mech} na čtverci poměru napětí k jmenovitému napětí

3.4 Výpočet ztrát ve vinutí motoru J22VV506

Ztráty ve vinutí statoru vypočítáme na základě Jouleova zákona dosazením do vzorce (13). Hodnoty dosadíme z měření momentové charakteristiky. Vzorce převzaty z literatury [13].

$$\Delta P_{Cu} = R_h \cdot I_h^2 + R_{pom} \cdot I_{pom}^2 = 4,567 \cdot 3,731^2 + 9,544 \cdot 1,746^2 = 92,67 \text{ W} \quad (36)$$

Tabulka 7 Vypočtené hodnoty ztrát ve vinutí statoru

U1	I1	P	I _{pom}	I _h	ΔP _{cu}
[V]	[A]	[W]	[A]	[A]	[W]
233,1	4,825	1048,0	1,668	4,429	116,14
233,2	3,949	830,6	1,746	3,731	92,67
233,7	3,337	661,4	1,805	3,402	83,95
233,8	2,872	502,6	1,860	3,331	83,67
234,0	2,675	365,8	1,914	3,552	92,59
234,1	2,680	278,0	1,949	3,817	102,79

Ztráty ve vinutí rotoru vypočítáme za předpokladu znalosti skluzu a výkonu přenášeného přes vzduchovou mezeru P_δ , který je výsledkem rozdílu příkonu, ztrát v železe a ztrát ve vinutí statoru. Hodnoty jsou dosazovány pro okolí jmenovitého proudu.

$$P_\delta = P_1 - \Delta P_{Cu} - \Delta P_{Fe} = 830,6 - 92,67 - 103,81 = 634,12 \text{ W} \quad (37)$$

Ztráty ve vinutí rotoru určíme jako součin výkonu P_δ a skluzu s .

$$\Delta P_{Al} = P_\delta \cdot s = 634,12 \cdot 0,1167 = 74 \text{ W} \quad (38)$$

Celkové ztráty určíme součtem jednotlivých ztrát mechanických, v železe, ve vinutí rotoru a statoru

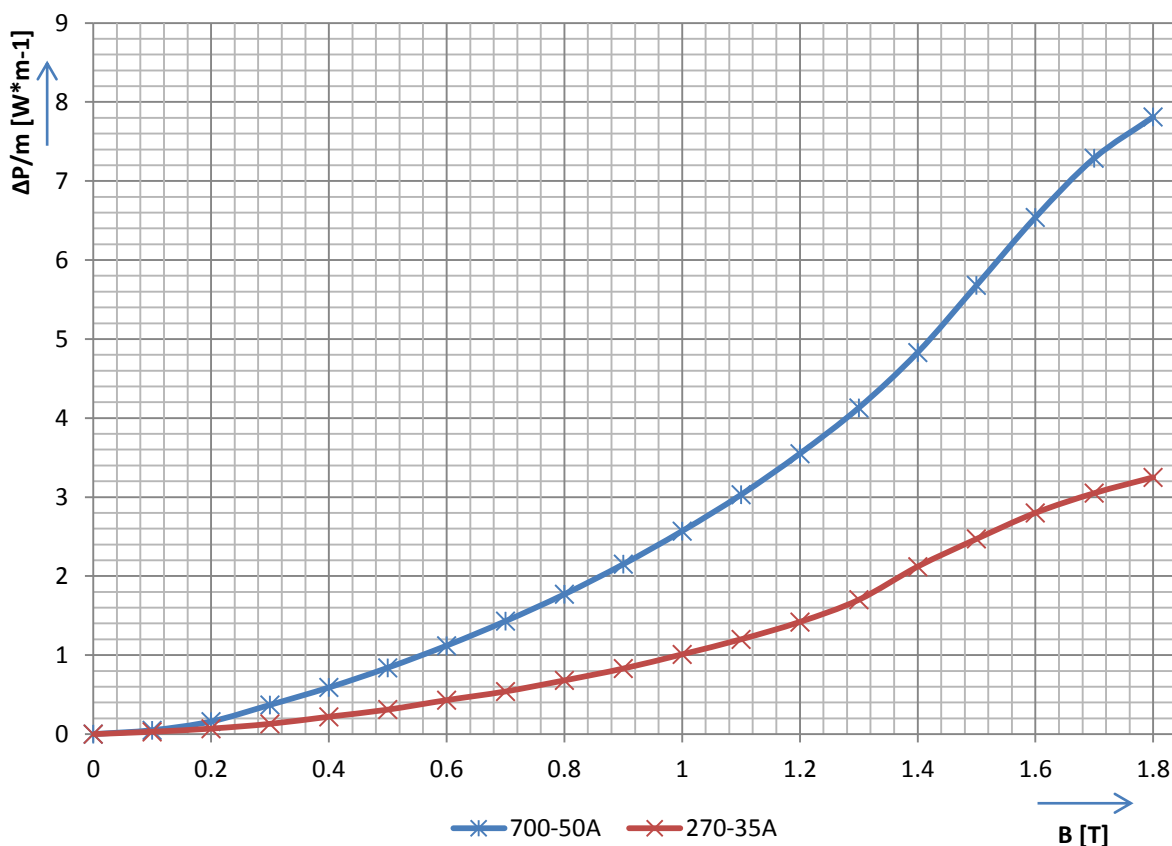
$$\Delta P = \Delta P_{mech} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Al} + \Delta P_{Cu} = 15,39 + 110,75 + 74,49 + 88,62 = 285,87 \text{ W} \quad (39)$$

3.5 Navrhnuté úpravy

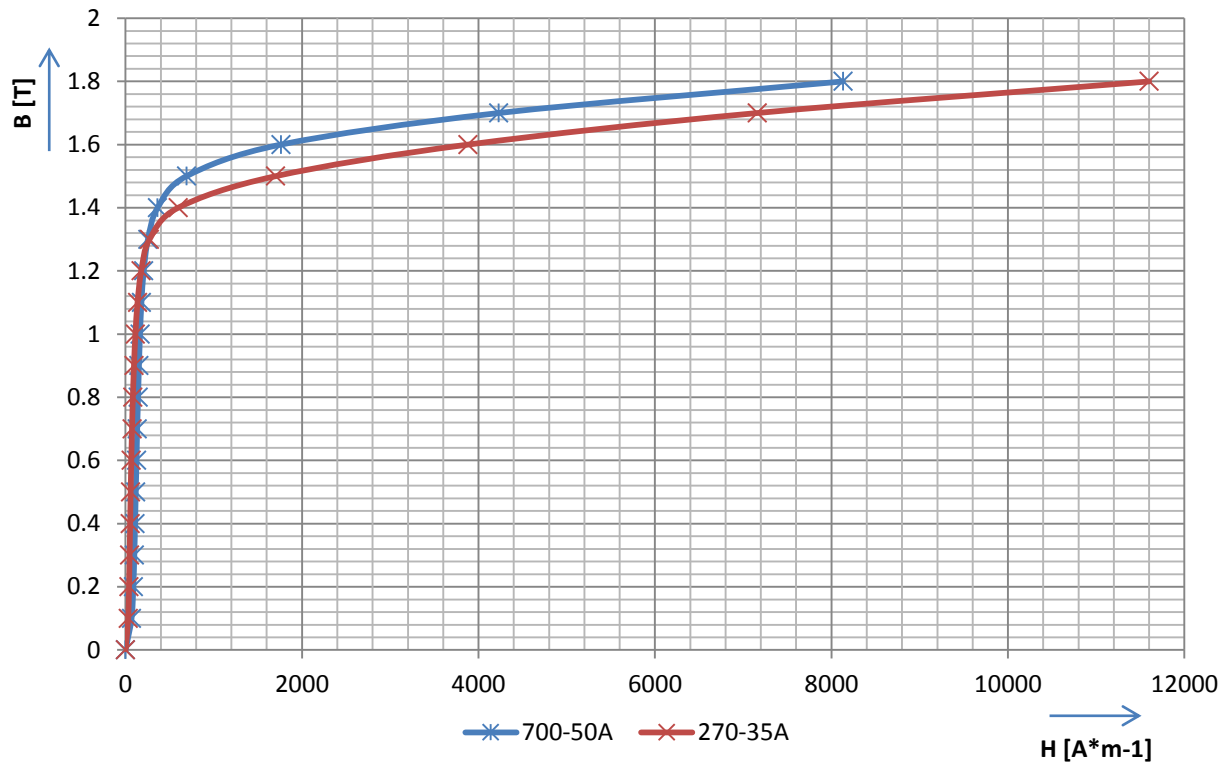
První možnost je zmenšit mechanické ztráty, ale v našem případě tuto variantu zanedbáme. Motor se otáčí na obě strany, a proto nemůžeme provést úpravu natočení lopatek ventilátoru.

Ztráty v železe můžeme zmenšit kvalitnějšími plechy s menší tloušťkou. Navrhovaná úprava je výměna plechů 700-50A za 270-35A, které mají menší měrné ztráty viz. Obrázek 16. Naopak dochází k horšímu sycení a nedosáhne se potřebné indukce. Porovnání obou BH křivek vidíme na Obrázku 17.

Třetí možnost je lépe využít drážku pro statorové vinutí a použít drát s větším průřezem. Byl zvolen o třídu větší s průměrem drátu 0,63 mm. Koeficient plnění se zvětší na $k_{p,Cu} = 0,368$.



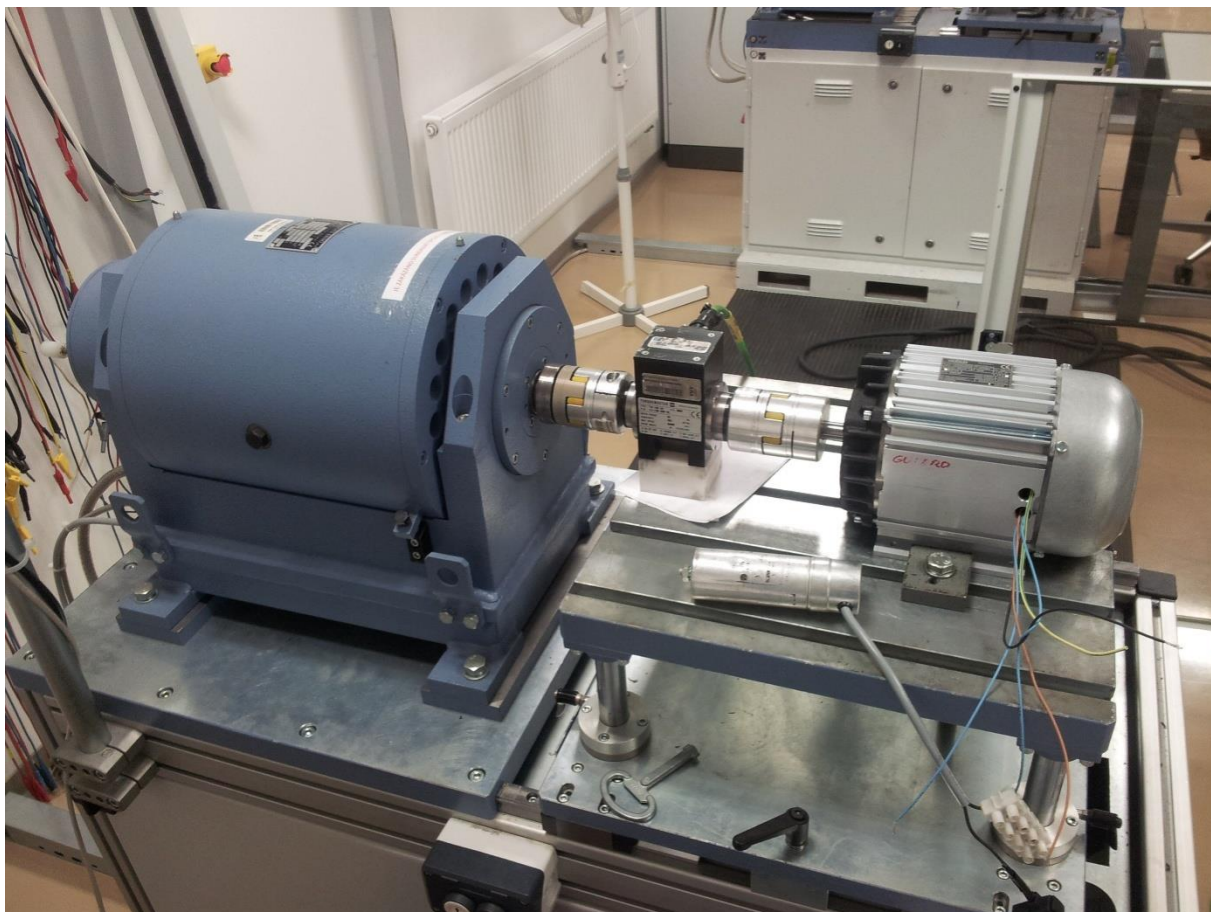
Obrázek 16 Závislost měrných ztrát na magnetické indukci



Obrázek 17 BH křivky

4 OVĚŘENÍ NÁVRHU

Firma ATAS elektromotory NÁCHOD a.s. vyrobila motor s navrženými úpravami. Motor má stejné štítkové hodnoty a vinutím o třídu větším. Dále má stroj navíc pryžové těsnění guferu, které zvětšilo mechanické ztráty. Na motoru byla provedena stejná měření a výpočty jako na neupraveném motoru.



Obrázek 18 Měření upraveného jednofázového asynchronního motoru

Tabulka 8 Zatěžovací charakteristika

U ₁	I ₁	φ ₁	P	Q	S	U _{pom}	I _{pom}	φ _{pom}	M	n	I _h	φ _h
[V]	[A]	[°]	[W]	[VAr]	[VA]	[V]	[A]	[°]	[Nm]	[min ⁻¹]	[A]	[°]
230,42	4,967	20,40	1072,7	399,0	1144,5	230,42	1,662	45,10	2,554	2534,1	4,537	39,87
230,44	3,968	23,62	837,7	366,3	914,3	230,44	1,749	44,05	1,988	2674,6	3,678	49,71
230,45	3,392	27,85	691,2	365,2	781,8	230,45	1,799	43,87	1,565	2753,4	3,304	58,99
230,46	2,809	36,01	523,6	380,6	647,3	230,46	1,854	44,14	1,053	2837,4	3,090	72,25
230,47	2,436	49,03	368,1	424,0	561,5	230,47	1,911	44,83	0,510	2912,0	3,200	85,66
230,44	2,312	60,38	263,4	463,2	532,8	230,44	1,950	45,32	0,107	2960,6	3,404	93,85

Tabulka 9 Měření nakrátko

U _I	I _I	φ _I	P	Q	S	U _{pom}	I _{pom}	φ _{pom}	M	I _h	φ _h
[V]	[A]	[°]	[W]	[VAr]	[VA]	[V]	[A]	[°]	[Nm]	[A]	[°]
20,02	0,741	41,12	11,2	9,8	14,8	20,02	0,139	77,85	0,007	0,817	49,68
40,05	1,713	33,68	57,1	38,0	68,6	40,05	0,256	79,55	0,014	1,829	41,07
60,08	2,687	30,85	138,6	82,8	161,4	60,08	0,367	80,03	0,038	2,839	37,79
80,10	3,658	29,30	255,6	143,4	293,1	80,10	0,477	80,19	0,093	3,844	36,02
100,14	4,617	28,20	407,4	218,5	462,3	100,14	0,586	80,24	0,185	4,834	34,80
120,16	5,551	27,21	593,2	305,0	667,0	120,16	0,695	80,19	0,299	5,797	33,80
140,20	6,511	26,41	817,5	406,1	912,8	140,20	0,804	80,17	0,424	6,784	32,93

Tabulka 10 Změřené odpory při teplotě okolí 23,2°C

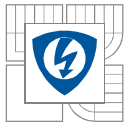
Měření	R _h	R _p
	[Ω]	[Ω]
Za studena	3,587	7,502
Naprázdko	4,034	8,393
Nakrátko	4,048	8,365
Momentová char.	4,620	8,539

Tabulka 11 Měření naprázdno

U _I	I _I	P ₀	Q	S
[V]	[A]	[W]	[VAr]	[VA]
250,51	4,880	343,9	1173,2	1222,6
230,47	3,702	241,5	818,2	853,1
210,43	2,922	180,5	587,8	614,9
190,39	2,415	141,8	437,3	459,7
170,35	2,024	114,0	325,3	344,7
150,29	1,709	94,4	238,8	256,8
130,26	1,454	80,0	171,7	189,4
110,22	1,261	70,1	120,0	138,9
90,17	1,142	63,1	81,3	103,0
70,13	1,165	60,1	55,3	81,7

Z naměřených hodnot byly vypočítány ztráty pro jmenovitý proud. Odpor rotoru vůči hlavnímu vinutí statoru je roven:

$$R_{rh} = \frac{P_{1k}}{I_{hk}^2} - R_h = \frac{407,4}{4,834^2} - 4,048 = 13,39 \Omega \quad (40)$$



Při znalosti odporu R_{rh} vypočítáme součet mechanických ztrát a ztrát v železe.

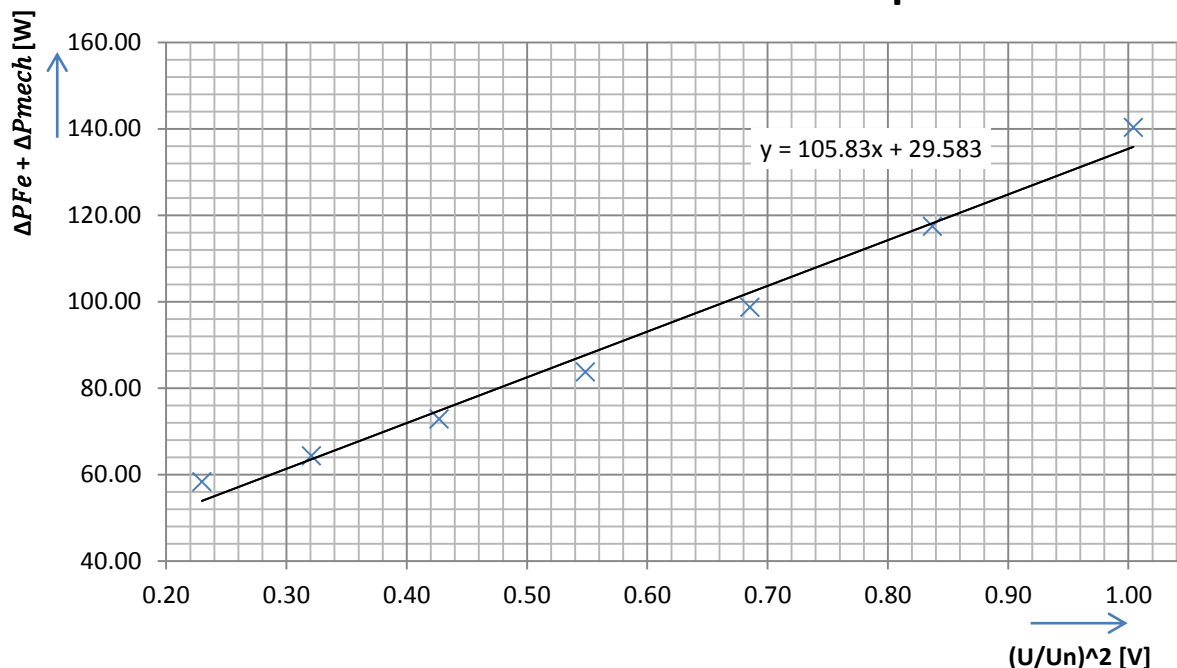
$$\begin{aligned}\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} &= P_0 - \left(R_h + \frac{R_{rh}}{4} \right) \cdot I_{10}^2 = \\ &= 343, - \left(4,034 + \frac{13,39}{4} \right) \cdot 4,88^2 = 168,11 \text{ W}\end{aligned}\tag{41}$$

Tabulka 12 Vypočítané hodnoty ztrát v železe a mechanických

U1	(U/U _n) ²	I10	P0	ΔP _{FE} +ΔP _{mech}	ΔP _{Fe}
[V]	[V]	[A]	[W]	[W]	[W]
250,51	1,19	4,880	343,9	168,11	138,53
230,47	1,00	3,702	241,5	140,34	110,75
210,43	0,84	2,922	180,5	117,48	87,89
190,39	0,69	2,415	141,8	98,75	69,17
170,35	0,55	2,024	114,0	83,76	54,18
150,29	0,43	1,709	94,4	72,84	43,26
130,26	0,32	1,454	80,0	64,39	34,81
110,22	0,23	1,261	70,1	58,36	28,78
90,17	0,15	1,142	63,1	53,47	23,89
70,13	0,09	1,165	60,1	50,08	20,50

Z charakteristiky v Obrázku 19 odečteme mechanické ztráty $\Delta P_{mech} = 29,58 \text{ W}$. A pro jmenovité napětí odečteme $P_{Fe} = 110,75 \text{ W}$.

Závislost ΔP_{Fe} a ΔP_{mech} na napětí



Obrázek 19 Závislost ΔP_{Fe} a ΔP_{mech} na napětí

Dále určíme ztráty ve vinutí statoru a rotoru.

Tabulka 13 Ztráty ve vinutí statoru

U1	I1	P	I _{pm}	I _h	ΔP_{cu}
[V]	[A]	[W]	[A]	[A]	[W]
230,42	4,967	1072,7	1,662	4,537	118,69
230,44	3,968	837,7	1,749	3,678	88,62
230,45	3,392	691,2	1,799	3,304	78,07
230,46	2,809	523,6	1,854	3,090	73,46
230,47	2,436	368,1	1,911	3,200	78,49
230,44	2,312	263,4	1,950	3,404	86,00

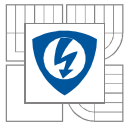
$$P_{\delta} = P_1 - \Delta P_{Cu} - \Delta P_{Fe} = 837,7 - 88,62 - 110,75 = 638,33 \text{ W} \quad (42)$$

Ztráty ve vinutí rotoru určíme jako součin výkonu P_{δ} a skluzu s .

$$\Delta P_{Al} = P_{\delta} * s = 638,33 * 0,1167 = 74,49 \text{ W} \quad (43)$$

Celkové ztráty určíme součtem jednotlivých ztrát.

$$\Delta P = \Delta P_{mech} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Al} + \Delta P_{Cu} = 29,58 + 110,75 + 74,49 + 88,62 = 303,44 \text{ W} \quad (44)$$



5 ZÁVĚR

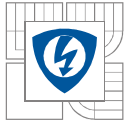
Tato bakalářská práce pojednává o zvýšení účinnosti jednofázových asynchronních motorů malého výkonu. Pro tyto účely byl vybrán nejvíce sériově vyráběný jednofázový asynchronní motor firmy ATAS Elektromotory Náchod a.s. typu J22VV506.

V první části je rozebrána problematika asynchronních strojů, zejména jednofázových. Je zde uvedeno rozdělení asynchronních strojů, jejich konstrukce, vznik točivého magnetického pole a záběrného momentu. Dále byly porovnány třífázové a jednofázové asynchronní motory a zobrazena jejich momentová charakteristika. Také byl uveden zvláštní jednofázový asynchronní motor se stíněnými póly.

Ve druhé části bylo provedeno měření naprázdno, nakrátko a měření momentové charakteristiky v okolí pracovního bodu. U jednofázového asynchronního motoru o výkonu $P = 550 \text{ W}$, pro změřené hodnoty momentu a otáček blízkých jmenovitého zatížení, byla vypočítána celková účinnost $\eta = 66,7\%$.

Dále jsou rozebrány ztráty asynchronních motorů a jejich princip. Jsou zde uvedeny způsoby jejich vzniku a způsoby jejich zmenšení a tím zvýšení účinnosti motoru. Pro daný motor jsou vypočítány jednotlivé ztráty. Pro jmenovité napětí byly odečteny mechanické ztráty ΔP_{mech} přibližně $15,39 \text{ W}$ a ztráty v železe ΔP_{Fe} jsou rovny přibližně $103,81 \text{ W}$. Ztráty ve vinutí statoru vypočítané na základě Jouleova zákona ΔP_{Cu} jsou $92,67 \text{ W}$. Poslední ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{Al} jsou 74 W . Z těchto výsledků lze vidět, že největší ztráty vznikají na vinutí statoru, a proto pro zvýšení účinnosti bylo navrženo zvýšení průřezu vodiče.

V poslední části byl změřen motor s navrženými úpravami. Mechanické ztráty se v důsledku použití pryžového těsnění gufero zvýšily na $29,58 \text{ W}$ a tím se celkové vypočítané ztráty navýšily o $6,15\%$ z $285,87 \text{ W}$ na $303,44 \text{ W}$. Ztráty ve vinutí statoru se snížily o $4,5\%$ na $88,62 \text{ W}$, ztráty ve vinutí rotoru $\Delta P_{Al} = 74,49 \text{ W}$ zůstaly shodné. Ztráty v železe vyšly $110,75 \text{ W}$, jejichž nárůst je ovlivněn nepřesností odečtení velikosti ztrát mechanických. Zvýšení průřezu vinutí se ukázalo jako vhodné.



LITERATURA

- [1] VILÍM, M. *Zvýšení účinnosti asynchronních motorů malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 60 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..
- [2] KUDA, R. *Zlepšení energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 62s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
- [3] VÁCHA, P. *Výpočet jednofázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 74 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
- [4] Volf, L. *Výpočet jednofázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 69 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
- [5] ŠTĚPINA, Jaroslav. *Jednofázové indukční motory: Celostátní vysokoškolská příručka*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957, 198 s.
- [6] Pohonnatechnika.cz. [online]. [cit. 2014-10-16]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/motory-s-vysokou-efektivitou>
- [7] Elektro. [online]. [cit. 2014-10-16]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=43677
- [8] SCHLESINGER, P. *Návrh jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 43s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
- [9] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje. Přednášky a elektronické texty*.
- [10] HÁJEK, V. a ONDRŮŠEK, Č. *Metody zvýšení účinnosti a optimalizace automobilových elektrických strojů*. Brno, 2000. VUT.
- [11] VÍCHA, A. *Analýza jednofázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach.
- [12] LMS Software. [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://mylms.cz/text-prehled-a-zapojeni-motoru/>
- [13] BOLDEA, I a S NASAR. *The induction machine handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2002, 950 p. ISBN 08-493-0004-5.
- [14] HALFAR, T. *Zlepšení energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 81 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..