



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

**METODIKA VÝPOČTU ASYNCHRONNÍHO MOTORU
MALÉHO VÝKONU**

THE METHODOLOGY FOR CALCULATION SMALL INDUCTION MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Bureš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Petr Bureš

ID: 161285

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Metodika výpočtu asynchronního motoru malého výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostudujte dostupnou literaturu o asynchronních motorech - princip, provedení parametry, charakteristiky.
2. Na základě poznatků z literatury sestavte postup návrhu malého asynchronního motoru
3. Posuďte možnosti zlepšení energetických parametrů a spotřeby aktivních materiálů, ověřte výpočtem a podle možností měřením na vzorku motoru.

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: 21.9.2015

Termín odevzdání: 31.5.2016

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

Konzultant bakalářské práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá rozbořem problematiky týkající se asynchronních motorů. Úvod se věnuje základnímu principu funkce asynchronních motorů, popisuje jednotlivé konstrukční součásti a věnuje se také stručnému popisu běžně užívaných provedení. Následující část se věnuje postupu návrhu asynchronního motoru, se zaměřením na jednofázový motor s připojeným kondenzátorem. Poslední část se zabývá pohledem na problematiku požadavků na účinnost společně s možnými metodami snižování ztrát a návrhem vylepšení účinnosti navazující na příklad návrhu motoru.

Abstract

This thesis addresses analysis of problematics concerning induction motors. The introduction is dedicated to description of basic principles of induction motor functions, describes individual construction components and also focuses on brief description of current regular design of those machines. The following section is dedicated to the design method and procedure for calculating, mainly focused on single phase induction motor with connected capacitor. The last section is focused on problematics concerning induction motor efficiency together with possible methods of loss reduction and efficiency improvement following the example of engine design.

Klíčová slova

Asynchronní motor; návrh; analýza; účinnost; konstrukce; ztráty

Keywords

Induction motor; design method; calculation; analysis; efficiency; construction; losses

Bibliografická citace

BUREŠ, P. *Metodika výpočtu asynchronního motoru malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 70 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Metodika výpočtu asynchronního motoru malého výkonu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

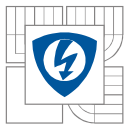
Podpis autora

Poděkování

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

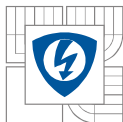
V Brně dne

Podpis autora

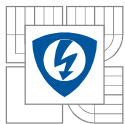


OBSAH

1 ÚVOD	13
1.1 HISTORIE	13
2 ELEKTRICKÉ STROJE	15
2.1 PRINCIP FUNKCE	15
2.1.1 INDUKCE NAPĚTÍ.....	16
2.1.2 MAGNETICKÝ OBVOD	17
2.1.3 OBVODOVÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU	18
2.1.4 ENERGETICKÁ BILANCE ASYNCHRONNÍHO STROJE	19
2.1.5 CHARAKTERISTIKY	20
2.2 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ	23
STATOR.....	23
ROTOR	23
VINUTÍ	23
LOŽISKOVÉ ŠTÍTY	23
LOŽISKOVÁ VÍČKA.....	24
SVORKOVNICE	24
VENTILÁTOR.....	24
2.3 PROVEDENÍ.....	24
2.3.1 TROJFÁZOVÝ MOTOR S KOTVOU NAKRÁTKO.....	24
2.3.2 TROJFÁZOVÝ KROUŽKOVÝ MOTOR.....	25
2.3.3 JEDNOFÁZOVÝ MOTOR S KOTVOU NAKRÁTKO	25
2.3.4 JEDNOFÁZOVÝ MOTOR S POMOCNOU FÁZÍ	25
2.3.5 JEDNOFÁZOVÝ MOTOR SE STÍNĚNÝMI PÓLY	26
2.3.6 JEDNOFÁZOVÝ MOTOR S TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM	26
3 PRINCIP A POSTUP NÁVRHU MOTORU	27
3.1 STANOVENÍ KAPACITY KONDENZÁTORU	27
3.2 STANOVENÍ HLAVNÍCH ROZMĚRŮ STROJE	29
3.3 PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A VINUTÍ	31
3.4 VÝPOČET ČINNÝCH ODPORŮ	34
3.5 VÝPOČET HLAVNÍ REAKTANCE	36
3.6 STANOVENÍ ROZPTYLOVÉ REAKTANCE STATORU	38
3.7 VÝPOČET ROZPTYLOVÉ REAKTANCE ROTORU PŘEPOČTENÉ NA STATOR	40
3.8 VÝPOČET ZTRÁT A ÚČINNOSTI.....	42
4 MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ ENERGETICKÝCH PARAMETRŮ	44
4.1 SNÍŽENÍ ZTRÁT VE VINUTÍ	45
4.2 SNÍŽOVÁNÍ ZTRÁT V MAGNETICKÉM OBVODU.....	46
4.3 SNÍŽENÍ MECHANICKÝCH ZTRÁT	46
5 NÁVRH JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	47
5.1 STANOVENÍ HLAVNÍCH ROZMĚRŮ	47

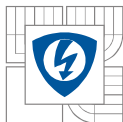


5.2 VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A VINUTÍ	48
5.2.1 VÝPOČET DRÁŽEK A VINUTÍ PRO STATOR.....	48
5.3 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO ROTOR	50
5.4 STANOVENÍ VELIKOSTI KONDENZÁTORU	52
OVĚŘENÍ NÁVRHU STROJE	52
5.5 VÝPOČET ČINNÉHO ODPORU	53
5.6 STANOVENÍ REAKTANCÍ	54
5.6.1 VÝPOČET HLAVNÍ REAKTANCE STATORU	54
5.6.2 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATORU.....	56
5.6.3 REAKTANCE ROTORU PŘEPOČTENÁ NA STATOR	57
5.7 URČENÍ ZTRÁT, MOMENTŮ, ÚČINNOSTI.....	57
5.8 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	60
6 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ ZTRÁT NAVRŽENÉHO STROJE.....	62
6.1 ANALÝZA ZTRÁT VINUTÍ STATORU	62
6.2 ZTRÁTY ROTOROVÉHO VINUTÍ	63
6.3 REDUKCE ZTRÁT V ŽELEZE	63
6.4 SNÍŽENÍ MECHANICKÝCH ZTRÁT	63
6.5 NAVRŽENÍ ÚPRAVY STROJE	64
6.5.1 ÚPRAVA Činitele plnění	64
6.6 ZMĚNA POUŽITÉHO DYNAMOVÉHO PLECHU	65
6.7 POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH ÚPRAV	66
7 ZÁVĚR.....	68
LITERATURA	70



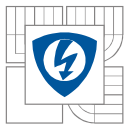
SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Vznik síly působící na rotor	15
Obr. 2: Obvodové schéma jedné fáze asynchronního motoru.....	18
Obr. 3: Schéma přeměny výkonu	19
Obr. 4: Momentová charakteristika asynchronního stroje	21
Obr. 5: Momentová charakteristika jednofázového stroje	22
Obr. 6: Momentová charakteristika pro jednofázový asynchronní motor s pomocnou fází, bez ní a s kondenzátorem pro rozběh.....	22
Obr. 7: Stanovení součinu účinnosti a účinníku u trojfázových motorů pro motory, které nemají trvale připojeno pomocné vinutí.....	29
Obr. 8: Součin účinnosti a účinníku pro motory kondenzátorové	29
Obr. 9: Magnetizační křivka plechů o měrných ztrátách 0,265W/N.....	37
Obr. 10: rozměry a) čtyřhranné drážky, b) oválné drážky	39
Obr. 11: běžně užívaná drážka kruhového tvaru	40
Obr. 12: Diagram pro určení rozptylu pro uzavřenou drážku.....	41
Obr. 13: Třídy účinnosti pro čtyřpólové motory podle IEC 60034-30.....	44
Obr. 14: Orientační náčrt tvaru navržených plechů statoru.....	50
Obr. 15: Orientační náčrt tvaru navržených plechů pro rotor.....	52
Obr. 16: Poměr ztrát v navrženém stroji.....	62
Obr. 17: Rozložení ztrát v navrženém motoru a v motoru s úpravami.....	66



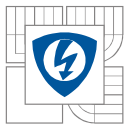
SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: určování konstanty k podle napětí sítě	28
Tabulka 2: tabulka typizovaných kapacit kondenzátorů pro různé typy strojů.....	28
Tabulka 3: Činitelé plnění pro různé typy plechů	32
Tabulka 4: plnění drážek.	32
Tabulka 5: užívané počty drážek	32
Tabulka 6: Velikosti sousledné složky proudové hustoty rotoru	34
Tabulka 7: Měrná vodivost pro typizované materiály.	35
Tabulka 8: Hodnoty $\sigma_0 \cdot 100$ typické pro vinutí s plným krokem	38
Tabulka 9: Porovnání vypočtených parametrů a hodnot udávaných firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna	60
Tabulka 10: Porovnání výsledků navrhovaných změn s původním strojem.....	66

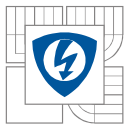


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

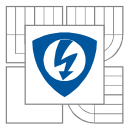
A	proudové zatížení obvodu	[A/cm]
B	magnetická indukce	[T]
B_1'	sycení jádra statoru	[T]
B_z'	sycení v zubech	[T]
b'	otevření drážky	[mm]
b_{1-4}	šířkové rozměry drážky podle obrázku	[mm]
b_1'	otevření drážky statoru ve vzduchové mezeře	[mm]
b_2'	otevření drážky rotoru ve vzduchové mezeře	[mm]
B_δ	sycení ve vzduchové mezeře	[T]
b_{z1}	šířka zubu statoru	[mm]
b_{z2}	šířka zubu rotoru	[mm]
C	kapacita	[F]
C_E	výkonová (Essonská) konstanta	[-]
d	vrtání statoru	[mm]
d_{kr}	střední průměr spojovacího kruhu	[mm]
d_{1r}	vnější průměr rotoru	[mm]
d_{2r}	průměr rotoru na dně drážky	[mm]
d_{1s}	vnější průměr statorových plechů	[mm]
d_{2s}	průměr statoru na dně drážky	[mm]
e	elektromotorická síla	[V]
$e_{\max}$	amplituda elektromotorické síly	[V]
E	efektivní hodnota elektromotorické síly	[V]
f	frekvence	[Hz]
F_m	magnetomotorická síla	[A]
G	hmotnost magnetického obvodu	[kg]
H	intenzita magnetického pole	[A/m]
h_{1-4}	rozměry hloubky drážky podle obrázku	[mm]



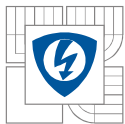
h_{celk}	celková hloubka drážky	[mm]
I	elektrický proud	[A]
I_A	elektrický proud procházející hlavním vinutím	[A]
I_{dt}	sousledná složka proudu v rotorové tyči	[A]
I_μ	magnetizační proud	[A]
k_d	plnění drážky bez drážkové izolace	[-]
k_{Fe}	činitel plnění železa	[-]
k_{Cu}	činitel plnění mědi	[-]
k_h	konstanta hysterezních ztrát	[-]
k_e	konstanta vířivých ztrát	[-]
k_s	poměr mezi vrtáním statoru a vnějším průměrem statoru	[-]
$k_{\delta 1}$	Carterův činitel pro stator	[-]
$k_{\delta 2}$	Carterův činitel pro drážkování rotoru	[-]
l	délka statorového železa	[mm]
l_t	délka rotorové tyče	[m]
l_z	střední délka závitů	[m]
m	počet fází	[-]
m	hmotnost	[kg]
m_{js}	hmotnost jha statoru	[kg]
m_{zs}	hmotnost zubů statoru	[kg]
M	moment	[Nm]
M_{max}	maximální moment (zvratu)	[Nm]
N	počet závitů vinutí	[-]
N_A	počet závitů hlavního vinutí	[-]
n_s	synchronní otáčky	[ot/min]
P	výkon	[W]
P_1	příkon	[W]
ΔP_d	ztráty dodatekové	[W]



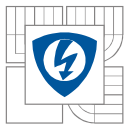
ΔP_{Cu}	ztráty v mědi	[W]
ΔP_{Cuz}	ztráty v mědi od zpětné složky	[W]
ΔP_{Cus}	ztráty v mědi od sousledné složky	[W]
$\Delta P_{Cui}''$	výkon odbrzděný zpětným pólem	[W]
ΔP_{Cu0}	ztráty v mědi od zpětné složky naprázdno	[W]
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	[W]
ΔP_{mech}	ztráty mechanické	[W]
$p_{1,0}$	ztrátové číslo použitého plechu	[W/kg]
q	počet drážek na pól a fázi	[-]
q	počet drážek obsazených uvažovaným vinutím	[-]
Q_1	počet drážek na statoru	[-]
Q_{1A}	počet drážek pro hlavní vinutí	[-]
Q_2	počet drážek na rotoru	[-]
Q_{celk}	celkový počet drážek	[-]
Q_p	počet drážek statoru na pól	[-]
R	elektrický odpor	[Ω]
R_t	odpor jedné tyče rotoru	[Ω]
R_t'	odpor tyče s přírážkou na kruh přepočtený na stator	[Ω]
R_{kr}	odpor spojovacích kruhů	[Ω]
s	skluz	[-;%]
s_{zv}	skluz zvratu	[-;%]
S	průřez	[mm ²]
S	zdánlivý příkon	[VA]
S_A	průřez hlavního vinutí	[mm ²]
S_A'	průřez vodiče hlavního vinutí s izolací	[mm ²]
S_D	plocha drážky bez izolace	[mm ²]
S_{kr}	průřez spojovacího kruhu	[mm ²]



S_t	průřez rotorové tyče	[mm ²]
$\check{s}$	délka zešíkmení	[mm]
t	čas	[s]
U_m	magnetické napětí	[A]
$U_{m\delta}$	magnetické napětí ve vzduchové mezeře	[A]
U_{mz1}	magnetické napětí zubů statoru	[A]
U_{mz2}	magnetické napětí zubů rotoru	[A]
U_{mj1}	magnetické napětí jha statoru	[A]
U_{mj2}	magnetické napětí jha rotoru	[A]
V_{Cu}	objem vinutí	[m ³]
v	rychlost	[m/s]
X_{20}	diferenční rozptyl klecového rotoru	[Ω]
X_{2d}	drážkový rozptyl klecového rotoru přepočtený na stator	[Ω]
X_{2q}	reaktance rozptylu od natočení drážek	[Ω]
X_{rA}	rozptylová reaktance hlavního vinutí	[Ω]
X_{A0}	diferenční rozptyl	[Ω]
X_{Ad}	rozptyl v drážce	[Ω]
$X_{A\check{e}}$	rozptyl přes čela vinutí	[Ω]
X_{Aq}	rozptyl statoru způsobený natočením drážek	[Ω]
X_h'	hlavní reaktance pro samotnou vzduchovou mezeru	[Ω]
y	krok cívk	[-]
$2p$	počet pólových dvojic	[-]
$\cos\varphi$	účinník	[-]
η	účinnost	[-;%]
α	komplexní výraz	[-]
α	úhel mezi drážkami	[°]
γ	měrná vodivost	[S/mm ²]
δ	vzduchová mezera	[mm]



δ'	efektivní vzduchová mezera	[cm]
δ''	ekvivalentní vzduchová mezera	[mm]
ε_1	poměrný úbytek napětí na rozptylové reaktanci	[-]
ε_2	poměrný úbytek napětí na zpětné vnitřní impedanci	[-]
Λ	magnetická vodivost obvodu	[H]
λ	poměr rozměrů drážky	[-]
λ_z	rozptyl přes hlavy zubů	[-]
λ_d	vodivost drážky	[S]
χ	činitel vinutí	[-]
χ'	činitel rozlohy	[-]
χ''	činitel zkrácení kroku	[-]
χ_A	činitel efektivity závitů hlavního vinutí	[-]
χ_t	činitel natočení rotorových drážek	[-]
ρ_{Fe}	hustota elektrotechnických plechů	[kg/m ³]
σ_A	proudová hustota	[A/mm ²]
σ_{A0}	součinitel diferenčního rozptylu	[-]
σ_{20}	součinitel diferenčního rozptylu rotoru	[-]
σ_{dt}	proudová hustota sousledné složky	[A/mm ²]
τ	pólová rozteč	[mm]
τ	rozteč drážky	[mm]
τ_{1s}	rozteč drážek horní části statorového jha	[mm]
μ	permeabilita	[H/m]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
ϕ	magnetický indukční tok	[Wb]
$\phi_{\max}$	maximální hodnota magnetického indukčního toku	[Wb]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]



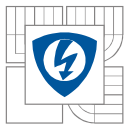
1 ÚVOD

Asynchronní stroje jsou typickým zástupcem střídavých elektrických točivých strojů, jsou téměř výhradně využívány jako motory s otáčivým či lineárním pohybem a patří díky svým vlastnostem mezi jedny z nepoužívanějších strojů vůbec. Mezi jejich nesporné výhody patří zejména konstrukční jednoduchost, která vede ke zvýšení spolehlivosti i nenáročnosti stroje, a v neposlední řadě také kladně ovlivní samotnou cenu stroje, ale také dovoluje přizpůsobit konstrukci stroje pro prakticky jakékoliv prostředí. Existuje možnost ovládání na dálku stykačem nebo pomocí samočinného spínače. Další výhodou je také poměrně jednoduché využití asynchronního stroje jak v třífázové soustavě, tak v jednofázovém provedení. Právě pro tyto nepřeberné výhody má asynchronní stroj v dnešní době širokou škálu uplatnění, a to jak v domácnostech (chladničky, ventilátory, čerpadla), tak v průmyslu (motorové pohony, čerpadla). Vyrábí se ve výkonovém rozsahu v řádech jednotek wattů až do tisíců kilowatt.

1.1 Historie

S vynalezením baterie (Alessandro Volta, 1800), generace magnetického pole (Hans Christian Oersted, 1820), solenoidu (André-Marie Ampère, 1820) a elektromagnetu (William Sturgeon, 1825) byly položeny základy pro elektrické stroje. To vedlo několik vynálezců této doby, aby přišli na to, jak by se dala elektrická energie přeměnit na mechanickou. To se jako prvním povedlo anglickému fyzikovi Michaelovi Faradayovi. Ten vytvořil jednoduché zařízení skládající se ze zavěšeného měděného vodiče, jehož druhý konec byl ponořen ve sklenici se rtutí, ve které byl ponořen magnet. Průchodem proudu vodičem poté došlo k rotaci vodiče kolem magnetu. První rotující zařízení pracující na základě elektromagnetismu bylo zařízení anglického matematika Petera Barlowa nazvané Barlowovo kolo. Jednalo se o měděný disk hvězdovitěho tvaru, připojený na vodič. Vždy jeden ze zubů měděného kola se dotýkal rtuti, která byla nalita v jamce přípravku, a kolem ní byly připevněny dva silné magnety. Při připojení zdroje napětí docházelo k osovému průchodu elektrického proudu přes měděné kolo až do jamky se rtutí, na jejíž dně byl připojen vodič. Vznik magnetického pole nutil kolo k otáčení. Rychlost otáčení závisela na velikosti magnetického pole a velikosti procházejícího proudu. Roku 1827 vynalezl uherský fyzik Štefan Jedlík další model elektromotoru – jednalo se o elektromagnety rotující v cívce. Jedlík se navíc podílel na vynalezení komutátoru a sepsání principu dynama. Až pruský fyzik Moritz Hermann von Jakobi roku 1834 zkonstruoval první využitelný elektrický točivý stroj podobný takovým, jaké známe dnes – krouticí moment motoru vznikl díky stacionárním a rotujícím elektromagnetům a proudy v jednotlivých cívkách se přepínaly v daném časovém okamžiku díky speciálnímu komutátoru. Jacobiho stroj tehdy dokázal uzvednout těleso o hmotnosti kolem dvanácti liber s rychlostí asi jedné stopy za sekundu, což je ekvivalent asi 15 wattů mechanického výkonu. Na základě tehdejších poznatků se rozběhl závod vynálezců o konstrukci lepšího elektromotoru. Významnými vynálezci, kteří se podíleli na zdokonalení elektromotorů v mnoha směrech byli zejména Moritz von Jakobi v Prusku, Američan Charles G. Page, Skot Robert Davidson aj.

Prvotní snaha byla, aby v budoucnu existovaly elektricky poháněné stroje, které by konkurovaly tehdejším parním strojům, ale překážkou elektromobilů se stala cena galvanických článků, kvůli kterým nemohly elektromobily parnímu stroji konkurovat, ale navíc byl ekvivalent



s použitím galvanických článků až 25x dražší než parní stroj. Situace se začala měnit až s vynálezem elektrického generátoru (dynamo). Faradayovy indukční zákony odstartovaly vývoj generátorů, které by nahradily a překonaly galvanické články. Na základě těchto zákonitostí sestavil Hippolyte Pixii ranou formu střídavého generátoru. Tento stroj jako náhrada klasických baterií musel být vybaven komutátorem pro usměrnění proudu. Další pokrok byl zaznamenán roku 1856, kdy Němec Werner Siemens představil základní generátor s vinutím v drážkách.

V 70. letech 19. století vedl vzrůst počtu obyvatel a rozšiřování měst ke zvyšování požadavků na energii – nejvíce energie bylo spotřebováváno právě na osvětlení měst. Tento fakt nadále vedl ke snaze vyvinout větší a výkonnější generátory. Roku 1860 představil Antonio Pacinotti svůj model dynama, které využívalo prstencový rotor s drážkami s uzavřeným mnohazávitovým vinutím. 1861 shrnul James Clark Maxwell všechny dosud známé poznatky o elektromagnetismu a sestrojil příslušné rovnice, které se využívají dodnes. V roce 1871 využil Zénobe Gram Pacinottiho nápadu a zdokonalil jeho model, tím vzniklo vynález prstence kotvy produkující hladké stejnosměrné napětí. Roku 1867 dále W. Siemens vynalezl první dynamo se sériovým buzením, a roku 1873 poté s F. Hefner-Alteneckem Siemens sestrojil motor s bubnovým rotorem, který je již velmi blízký dnešní stavbě motorů.

Stejnoseměrné elektrické motory nejprve našly uplatnění zejména v městské hromadné dopravě. W. Siemens roku 1879 představil první elektrickou železnici, kde bylo využíváno jeho generátoru i motoru se sériovým buzením. Rostoucí nároky rozrůstajících se měst a průmyslu vedly k zaměření na efektivnější výrobu a také přenos elektrické energie, zvyšovalo se přenášené napětí, což však mělo negativní vliv na komutátory, takže se dostával do popředí střídavý proud. Toho využili Nikola Tesla a Galileo Ferraris a nezávisle na sobě začali oba experimentovat s vlivem a využitím zapojení více fází a roku 1885 G. Ferraris představil první indukční motor pracující se dvěma fázemi. Ferrari však bohužel chybně usoudil, že vícefázové motory nebudou schopny překročit účinnost 50% a o stroje nebude zájem, na základě čehož od nápadu upustil. Na myšlenku roku 1887 navázal Friedrich August Haselwander a postavil první třífázový generátor s vyniklými póly. Dále Teslovu a Ferrarisovu myšlenku zdokonalil Michael Dobrowolsky, který sestavil prototyp klasického třífázového klecového asynchronního motoru, který se užívá dodnes. Dobrowolsky také studoval možnosti využití zapojení hvězda trojúhelník. Až konečně roku 1899 jsou v patentu Jonase Wenströma popsány všechny komponenty trojfázového stroje a dochází k experimentálnímu využití elektrických strojů při výrobě a využití elektrické energie. Začátkem 20. století se začaly rozvíjet základní teorie elektrických strojů a unifikuje se metodika jejich návrhu, výpočtu i konstrukce. Pro Evropu je zaveden jednotný kmitočet 50Hz a pro USA 60Hz. Na základě získaných poznatků se stroje stávají menšími a výkonnějšími s využitím pokroku techniky a využitím materiálu s lepšími magnetickými vlastnostmi. [14]

2 ELEKTRICKÉ STROJE

2.1 Princip funkce

Magnetomotorická síla ve společném působení s vytvořenými proudy začne vytvářet moment; ten následně začíná otáčet hřídeli právě ve směru točení točivého magnetického pole.

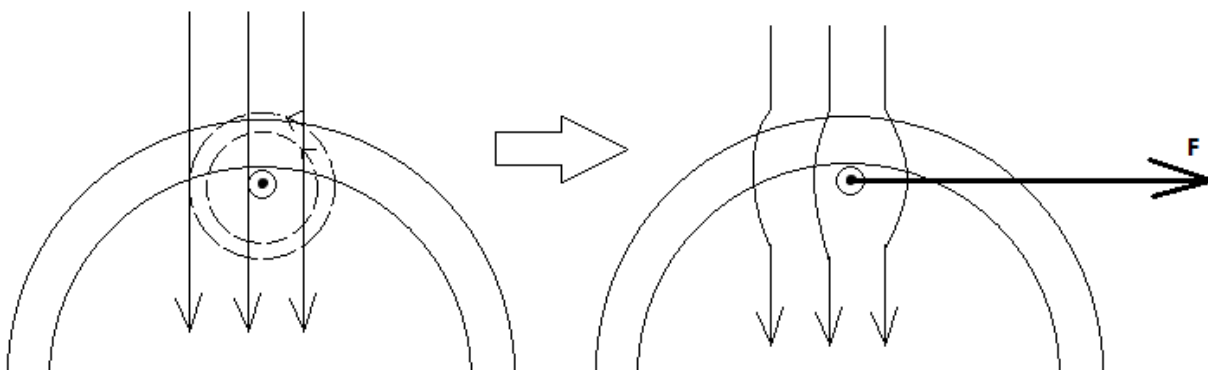
Elektrický točivý stroj tedy musí být schopen zastávat dvě různé funkce současně:

1. tvořit elektromotorickou sílu (magnetické napětí), která je nutná pro práci točivého stroje
2. generovat pole magnetické, které je využito k přeměně energie.

Přeměna energie probíhá v aktivních částech stroje, které tedy můžeme dělit na dvě základní:

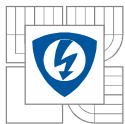
1. elektrická část – složena ze dvou a více vinutí
2. magnetická část – tvořena magnetickým obvodem a feromagnetikem

Pokud připojíme statorové vinutí ke zdroji třífázového proudu, tak protékající proud vytvoří točivé magnetické pole pohybující se v prostoru. Toto pole bude tvořit elektromotorickou sílu, která následně vyvolá proud i v uzavřeném vinutí, které společně s magnetickým polem vytvoří elektromagnetické pole, které následně způsobí otáčení rotoru, a to ve směru, kterým se otáčí samo magnetické pole. [12]



Obr. č. 1: Vznik síly působící na rotor [4]

Takto rozpohybovaný rotor se bude otáčet pomaleji (asynchronně), protože právě to je podmínkou pro vytvoření elektromotorické síly. Takovémuto opoždění říkáme skluz. Vyšší skluz potom zvyšuje proud rotorem, a díky tomu potom může stroj překonat vyšší mechanický odpor. S rostoucím zatížením však dochází k poklesu otáček.



2.1.1 Indukce napětí

Základním fyzikálním principem, který umožňuje elektrickým strojům fungovat je indukce elektromotorické síly změnou magnetického pole v čase, jejíž zákon je popsán takto:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

A popisuje, že změnou magnetického pole uzavřeným elektrickým obvodem se indukuje elektromotorická síla rovná změně toku v čase.

Samotné magnetické pole se potom může měnit dvěma způsoby – časově nebo prostorově. Při časové změně se mění počet indukčních čar magnetického toku ϕ , který prochází elektrickým obvodem. Takovéto změny toku potom můžeme dosáhnout zejména změnou proudu magnetickým obvodem. Rovnice (1) poté popisuje, že časový průběh elektromotorické síly je derivační čarou změny magnetického toku v čase. Takováto změna magnetického toku nemůže být skoková, a stejně tak i indukovaná elektromotorická síla se nemůže měnit skokem. Ke změně tedy u elektrických strojů dochází harmonicky – sinusově, což je zapříčiněno tím, že obvod je buzen sinusovým proudem a okamžitá hodnota toku potom je:

$$\phi = \phi_{\max} \cdot \sin \omega t \quad (2)$$

Jestliže potom do vztahu (1) dosadíme (1.1), získáme vztah popisující okamžitou hodnotu indukované elektromotorické síly.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -\omega \phi_{\max} \cos \omega t \quad (3)$$

Amplituda elektromotorické síly, která má z důvodu derivace kosinový průběh potom vypadá takto:

$$e_{\max} = -\omega \phi_{\max} \quad (4)$$

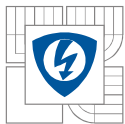
Efektivní hodnota síly potom bude rovna:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \phi_{\max} = \pi \sqrt{2} f \phi_{\max} \quad (5)$$

Magnetické pole se v elektrických točivých strojích však mění prostorově. Velikost magnetického procházejícího smyčkou se mění z důvodu pohybu smyčky v magnetickém poli. Při rovnoměrném pohybu rotoru stroje v magnetickém poli s indukcí B dochází k soustředění pole směrem do železa a elektromotorická síla se poté indukuje pouze na délce železa l , což je efektivní délka vodiče.

Efektivní hodnota indukované elektromotorické síly je pro tuto smyčku potom rovna:

$$e = 2Bvl \quad (6)$$



Jestliže však dochází k rovnoměrnému pohybu smyčky pod póly, je pole homogenní a elektromotorická síla e je potom stálá. Pokud se poté vodiče smyčky posunou mezi póly, neindukuje se nic, což je zapříčiněno tím, že se pole nemění. Jestliže se však vodiče smyčky dostanou pod opačný pól, začíná se indukovat síla opačné polarity, a proto ve všech elektrických točivých strojích s prostřídánými póly se indukují střídavá elektromotorická síla.

V praxi však místo elektromotorické síly smyčky jako celku počítáme elektromotorické síly pro jednotlivé vodiče, ze kterých se smyčka skládá. [5]

2.1.2 Magnetický obvod

U asynchronního stroje tvoří magnetický obvod pláty z dynamoplechů o tloušťce okolo 0,5mm, které jsou izolovány a následně připojeny k sobě do tvaru válce a spojeny.

Uzavřená cesta magnetického toku, který protéká elektrickým strojem je popisována jako magnetický obvod. Skutečnost je však taková, že magnetické pole vyplňuje i celý prostor okolo cívek. Správným uspořádáním těchto cívek potom dokážeme soustředit magnetický tok do prostoru, ve kterém se elektromagnetickou indukcí mění.

Existuje však i takový tok, který se přeměny energie neúčastní a je nežádoucí; tento tok se nazývá rozptylový. Čím menší je potom rozptylový tok tím lepší má stroj vlastnosti z hlediska magnetické využitelnosti.

Magnetický obvod popisuje Hopkinsonovým zákonem, což je obdoba Ohmova zákonu pro magnetismus. Magnetický tok je poté vyjádřen jako součin magnetomotorické síly F_m a magnetické vodivosti samotného obvodu Λ [3]:

$$\phi = F_m \cdot \Lambda \quad (7)$$

Odkud magnetomotorická síla je vyjádřena jako součet všech proudů spřažených s magnetickým obvodem, tedy:

$$F_m = \sum I \quad (8)$$

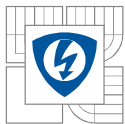
Pro výpočet však musíme obvod rozdělit na části tak, aby platilo, že jednotlivé části budou mít po délce l konstantní průřezy S , potom se magnetická vodivost vypočítá takto:

$$\Lambda = \mu \cdot \frac{S}{l} \quad (9)$$

Kde μ je permeabilita prostředí dána vztahem

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (10)$$

Kde $\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$ je permeabilita vakua a μ_r je relativní permeabilita.



Pro uzavřený elektrický obvod potom pro magnetomotorickou sílu platí:

$$F_m = \oint H dl \quad (11)$$

Což v praxi nahrazujeme jednoduchým součtem

$$F_m = \sum U_m \quad (12)$$

Přičemž U_m jsou magnetická napětí užitá k potlačení toku skrze jednotlivé součásti obvodu

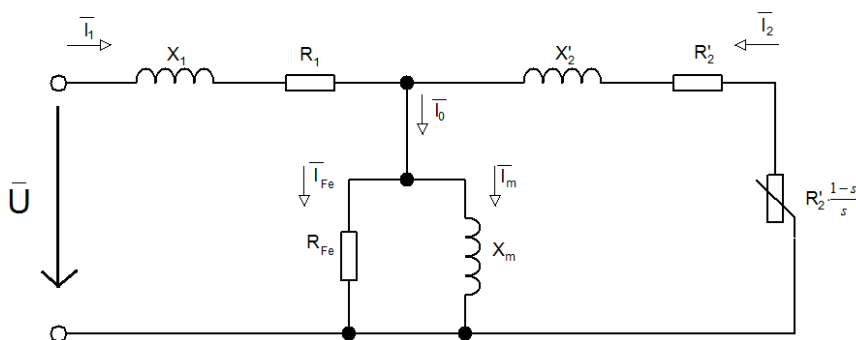
Pro element s konstantní intenzitou bude magnetické napětí potom:

$$U_m = \frac{\phi}{\Lambda} = \frac{B \cdot l}{\mu} = Hl \quad (13)$$

Vzhledem k tomu, že magnetické vlastnosti určují ve značné míře vlastnosti samotného stroje, je potřeba pro každý užitý materiál proměřit magnetizační křivku. [5]

2.1.3 Obvodový model asynchronního motoru

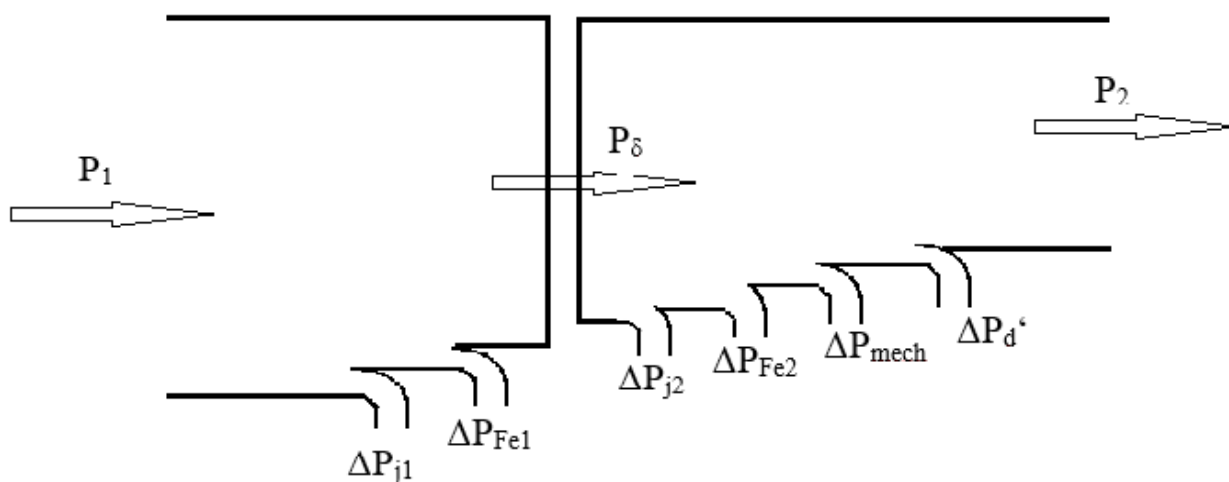
Podobně jako transformátor má i asynchronní motor své náhradní schéma v podobě T článku s rozdílem v podobě měnicího se odporu závislého na skluzu. Statorové i rotorové vinutí má zaznačen stejný magnetický obvod, přičemž obě vinutí mají svůj odpor i indukčnost. Veličiny v obvodu s indexem 1 znázorňují příslušné parametry pro statorovou část, rotorové části potom náleží číslo 2. [13]



Obr. č. 2: Obvodové schéma jedné fáze asynchronního motoru

2.1.4 Energetická bilance asynchronního stroje

V dnešní době se samozřejmě klade velký důraz na co nejvyšší účinnost u navrhovaného stroje, to je potom přímo spojené s nutností redukovat ztráty ve stroji samotném. Účinnost jako taková je dána poměrem dodaného příkonu do stroje vzhledem k čistému výkonu vycházejícího ze stroje. Vyšší účinnost tedy potom znamená, že motor dokáže využít větší množství dodané energie a přeměnit větší část této energie na energii požadovanou, to znamená, že se méně energie ztratí v důsledku nežádoucích vlivů daných konstrukcí stroje.



Obr. č.3: Schéma přeměny výkonu

Příkon se sníží o ztráty vinutí statoru a o ztráty v železe statoru, pak se následně přes vzduchovou mezeru díky točivému poli přenáší do rotoru. Tam je následně zredukován o ztráty vinutí rotoru a ztráty v železe. Dále se část spotřebuje na pokrytí ztrát mechanických (mezi které spadají i ventilační) a nakonec o ztráty dodatekové. Jako výsledek vychází čistý využitelný výkon.

Ztráty vznikající při práci elektrického stroje:

Elektrické – způsobeny průchodem proudu vinutím a dalšími vodivými obvody

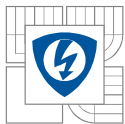
Magnetické – ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy ve feromagnetických součástech, které leží v magnetickém poli

Mechanické – zapříčiněny třením ložisek, třením na kartáčích a třením o vzduch, patří sem i ztráty ventilační

Dielektrické – ztráty v izolaci, která leží v působení střídavého elektrického pole

Ztráty v železe

Ztráty v železe statoru (vířivé a hysterezní) jsou úměrné bezmála kvadrátu frekvence. Ztráty rotorového železa bývají většinou zanedbatelné, ale při záběru s dlouhým rozběhem, kde jsou ztráty způsobeny na základě kmitočtu sítě, se musí tyto ztráty uvažovat. Na povrchu plechu obou částí vznikají také ztráty povrchové způsobené změnou magnetického toku na základě rozdílu indukce v drážce a zubu. Z důvodu střídání zubů a drážek v rotoru se vyskytují také ztráty pulzační. Významnější jsou ztráty v mědi statoru stroje dány vztahem



Ztráty ve vinutí

Jedná se prakticky o Jouleovy tepelné ztráty, teda energii která se vlivem průchodu proudu vodiči přemění na teplo a nejenže vlivem snížení výkonu oproti příkonu vede ke snížení účinnosti, ale také má za důsledek nežádoucí ohřívání stroje.

$$P_{Cu} = RI^2 \quad (14)$$

Mechanické ztráty

Ztráty mechanické jsou u asynchronního stroje složeny ze ztrát třecích, daných třením v ložiskách a případně i na kroužcích, a ztrát ventilačních.

2.1.5 Charakteristiky

Elektrické točivé stroje mohou být popsány několika typickými charakteristikami, na základě nichž jsme schopni následně určit jednotlivé ztráty stroje, či získat informace o režimu, ve kterém stroj pracuje, stejně tak jako informace o otáčkách při významných hodnotách momentu, skluzu apod.

Stav naprázdno – je takový stav, kdy běží motor bez jakékoliv zátěže na hřídeli. Rotor se točí s téměř synchronními otáčkami a znatelné ztráty jsou pouze ventilační a třecí. Proud rotorem je zanedbatelný, podobně jako ztráty vinutí rotoru. Stroj zapojený v takovém stavu odebírá činný výkon na pokrytí ztrát a hlavně výkon jalový, užitý k vytvoření magnetického pole. Účinník dosahuje malých hodnot (kolem 0,1).

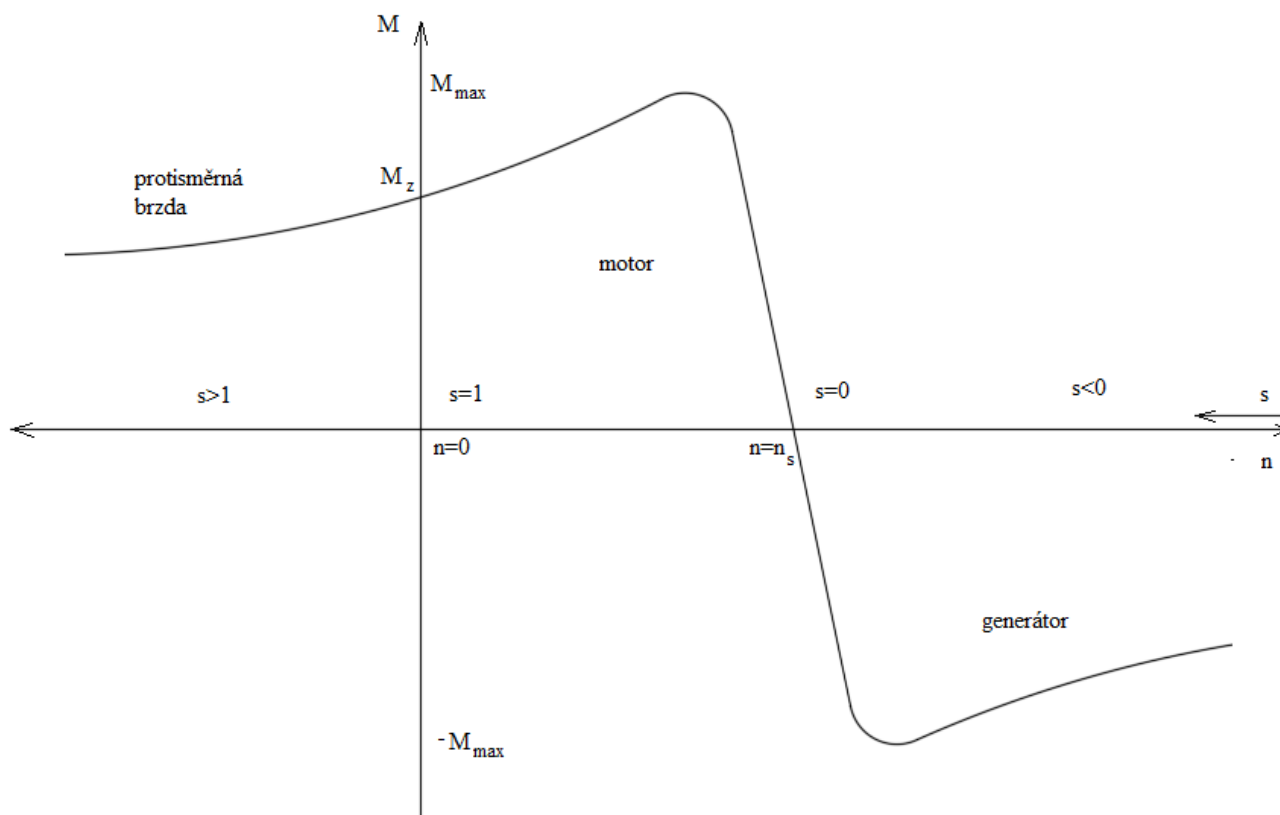
Charakteristika naprázdno – Jedná se o závislost proudu naprázdno na napětí a měří se od cca 30% jmenovitého napětí, kdy stroj nabíhá na plné otáčky. Poté, co stroj naběhne na jmenovité otáčky, se změní i průběh charakteristiky z lineárního na exponenciální. Potom jsou otáčky konstantní, podobně jako mechanické ztráty. Ztráty v železe se mění s kvadrátem napětí.

Stav nakrátko – stav, při kterém je motor zabrzděný (otáčky jsou rovny nule). Točivé pole statoru a rotoru působí proti sobě a výsledný tok je potom velmi nízký. Při měření nakrátko velmi rychle roste proud a již při malých hodnotách napětí dosahuje jmenovité hodnoty.

Charakteristika nakrátko – Jak již bylo zmíněno, proud velmi rychle narůstá již při nízkých hodnotách napětí. Charakteristika je zpočátku lineární, poté se zakřivuje. Ztráty v železe jsou malé, projevují se hlavně ztráty Jouleovy kvůli průchodu proudu. Účinník se téměř nemění. Ztráty nakrátko jsou závislé na kvadrátu proudu.

Momentová charakteristika – momentovou charakteristikou je závislost momentu na otáčkách a jeho souvislosti se skluzem. Charakteristika potom popisuje chování motoru při různém skluzu. Důležitými body charakteristiky jsou záběrný moment, kdy motor zabírá při roztáčení a moment zvratu (maximální) a jemu odpovídající skluz zvratu, kde se mění sklon z kladných hodnot na záporné. Výpočet momentu popisuje Klossův vztah.

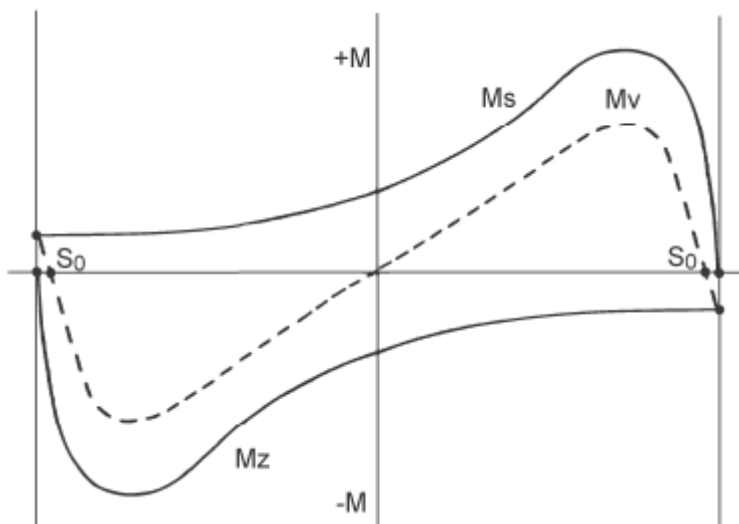
$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{sv}}{s}} \quad (15)$$



Obr. č. 4: Momentová charakteristika asynchronního stroje [7]

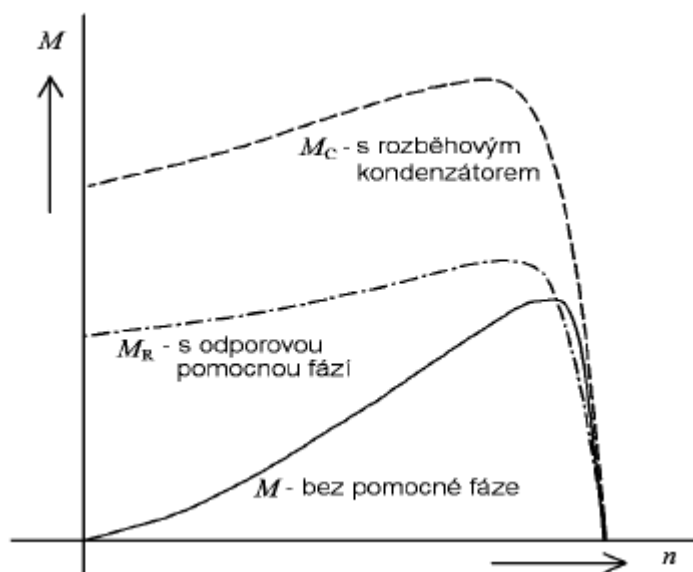
Obrázek popisuje momentovou charakteristiku pro třífázový asynchronní stroj. V prvním dílu charakteristiky má stroj skluz větší než 1 a chová se jako protisměrná brzda. V druhé části se stroj ocitá v klasickém motorickém režimu, otáčky se pohybují pod synchronními, pro $n=0$ je vyznačen záběrný moment přítomný při rozběhu. Vyznačeny jsou i moment maximální (zvratu) a moment jmenovitý, kolem kterého se motor pohybuje v pracovní oblasti, kde se otáčky poměrně málo proměňují se zátěží. Při otáčkách vyšších než synchronních pracuje stroj v generátorickém režimu.

Momentová charakteristika jednofázového stroje – Jednofázový stroj by sám o sobě tvořil pouze jedno pulsující magnetické pole, které je možno si představit jako výsledek součtu dvou točivých magnetických polí, které se pohybují proti sobě. Při vzájemném působení magnetického pole statoru a rotorových proudů dochází k vytváření momentů M_s a M_z , které působí proti sobě. Magnetická pole tedy působí na totožné ose a jednofázový motor se tak neroztočí ani naprázdno z toho důvodu, že se nevytvoří žádný výsledný moment, který by byl nenulový.

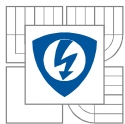


Obr. č. 5: Momentová charakteristika jednofázového stroje [8]

Je tedy nutno vytvořit záběrný moment. Je potřeba roztočit motor působením vnějšího impulzu, to má za následek uvedení motoru do pohybu v jednom ze směrů. To se poté řeší zapojením prvků, které umožňují vytvoření vhodného momentu a roztočení stroje.



Obr. č. 6: Momentová charakteristika pro jednofázový asynchronní motor s pomocnou fází, bez ní a s kondenzátorem pro rozběh



2.2 Konstrukční uspořádání

Asynchronní motor je složen z několika základních částí, kde každá zastává svou jedinečnou funkci a je nezbytná pro správný chod stroje. Části jsou upravovány v rámci možností zdokonalení a upravovány podle požadavků tak, aby byly co nejlépe zastávat danou funkci a byly přizpůsobeny danému prostředí. Základními částmi jsou pevný stator, do nějž je vložený pohyblivý rotor, přičemž v obou částech je vloženo samostatné vinutí. Na rotor je potom napojena hřídel, která otočným pohybem přenáší moment. [2]

Stator

Největší část celého asynchronního motoru, která je nepohyblivá. Kostra je zhotovena z litiny nebo kovů, které jsou nemagnetické, svazek statoru nabývá tvaru dutého válce a je zhotoven z plechů elektrotechnické oceli o tloušťce kolem 0,3 až 0,5 mm, které jsou slisovány a spojeny ocelovými pásky. Na vnitřním obvodu statoru jsou vytvořeny drážky určené pro uložení vinutí. Vinutí uložené ve statoru potom bývá obvykle provedeno jako trojfázové, ale i jedno- či dvojfázové vinutí je možnou alternativou. Z ventilačních důvodů jsou potom na statoru také vyvedeny kanálky o šířce asi 10mm které pomáhají odvodu tepla.

Rotor

Pohyblivá část válcového tvaru složená z plechů pro elektrotechniku. Na jeho vnějším obvodu jsou opět vyvedeny příslušné drážky určené k uložení vinutí. Vinutí je provedeno jako mnohopólové, což mimo jiné umožňuje změnit vlastnosti stroje pouhým převinutím. Rotor samotný je potom pevně spojen s hřídelí. Existují dvě běžná provedení rotoru, a to s klecí nakrátko, který má vinutí zhotoveno z tyčí z mědi, které jsou vloženy do drážek. Tyče jsou upevněny pomocí kruhů z mědi nebo mosazi. Druhou možností provedení je potom kroužkový vinutý rotor, který má vinutí tvořeno izolovanými vodiči, které jsou taktéž uloženy v drážkách.

Vinutí

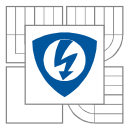
Vinutí elektrického točivého stroje je jeho zásadní částí protože má za úkol tvořit magnetické napětí, které je potřebné k práci stroje, a také musí budit magnetické pole, což je dále potřeba pro přeměnu energie. Běžně používaným materiálem je měď, a to zejména kvůli svým dobrým vodivostním vlastnostem.

Dělí se:

- a) Podle počtu fází – jednofázové, dvoufázové, trojfázové, vícefázové
- b) Podle způsobu provedení – cívkové, tyčové
- c) Podle počtu drážek na pól a fázi – s celým počtem drážek, zlomková
- d) Podle vrstev uložení – jednovrstvé, dvouvrstvé, vícevrstvé

Ložiskové štíty

Bývají provedeny ze stejného materiálu jako kostra statoru, kryjí část celého motoru a upevňují ložisková víčka. Podle ČSN 35 002 mohou nabývat různých tvarů, což umožňuje flexibilitu výroby a napomáhá k všestrannému využití stroje. Štíty jsou upravovány pro ložiska kluzná či valivá.



Ložisková víčka

Slouží k upevnění hřídele s ložisky k ložiskovým štítům. Jejich funkce je vymezení plochy pohybu ložisek a ochrana před prachem a nečistotami.

Svorkovnice

Určena k upevnění zakončení vinutí, které se na základě rozšířených parametrů a daných požadavků da různě spojovat podle napětí v síti. Svorky jsou propojovány tzv. spojnicemi, které se vyrábí z měděných plechů a nabývají různých tvarů i provedení.

Ventilátor

Jeho hlavní úlohou je zajistit dostatečné chlazení vinutí a kostry točivého stroje. Jedná se o součást, která je velmi důležitá zejména u větších strojů, protože regulací teploty a tím i ztrát ovlivňuje výkon stroje. Pokud by se ventilátor odstavil, mohlo by u větších strojů rychle dojít ke zničení přehřátím.

2.3 Provedení

Asynchronní motory se ze základu dělí podle počtu fází na jednofázové a trojfázové. Dále se potom jedná na základě konstrukce o motory s kotvou nakrátko nebo motory kroužkové a dále se dělí podle úprav a variací. [2]

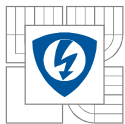
2.3.1 Trojfázový motor s kotvou nakrátko

Svazek statoru utváří mezikruží tvořené dynamoplechy. V drážkách vnitřního obvodu je potom vloženo vinutí. Nejčastějším provedením je vodorovný patkový tvar. Rotor od statoru potom dělí vzduchová mezera a celou konstrukci potom kryje kostra společně s předním ložiskovým štítem a zadním štítem s hřídelí. Rotorové vinutí je propojeno trvale do stavu nakrátko, je utvořeno z masivních tyčí, které jsou spojeny vodivými kruhy po obou stranách.

Motor s kotvou nakrátko disponuje malým skluzem a vysokou účinností. Nevýhodou je však malý záběrný moment a vysoký proud při rozběhu. To je v praxi řešeno pomocí statorového odporového spouštěče nebo spouštěcího transformátoru. Využívá se rozběhu hvězda – trojúhelník k redukci rozběhového proudu.

2.3.1.1 Motor s dvojitou klecí

Tento model vznikl jako řešení problému týkajícího se zlepšení záběrného momentu při přijatelném záběrném proudu. Toto provedení obsahuje dvě samostatná vinutí, kde první je uloženo poblíž okraje rotoru a je složeno z mosazných tyčí a druhé leží hlouběji v drážkách a tvoří ho tlusté měděné tyče. Vnější klec je typická svým vysokým odporem a malou reaktancí, kdežto vnitřní má naopak malý odpor a vysokou reaktanci.



2.3.1.2 Motor s vírovou klecí

Zhotoveno na základě odlití hliníku přímo do drážek, a to pod tlakem. Rotorový proud se při rozběhu drží v horních částech drážek, opět kvůli rozdílu v reaktanci. Při navyšování otáček potom dochází ke snižování frekvence proudu rotorem a zmenšení reaktance tyčí. Proud se poté rozkládá po průměru tyče. Obecná funkce takovéto klece je tedy velmi podobná jako funkce klece dvojité, ale vírová klec je mnohem častější zejména díky nižším výrobním nákladům.

2.3.2 Trojfázový kroužkový motor

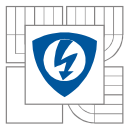
Byl navržen pro těžké rozběhy tak, aby zachytil nedostatky motorů s kotvou nakrátko, a tak je výsledkem vyšší záběrný moment při spouštění. Na rotoru je uloženo trojfázové vinutí v jednotlivých drážkách, jehož začátky jsou připojeny na hřídeli na kroužky, na kterých jsou připevněny uhlíkové kartáče. Kartáče leží v drážkách a jsou tlačeny pružinami ke sběracím rotorovým kroužkům. U motorů větších rozměrů a výkonů se vinutí rotoru krátce po rozběhu pomocí specifického mechanismu propojí nakrátko a také se odklopí kartáče. Vzhledem k nutnosti brát ohled na velikost proudu, který přenáší kartáče, musí se brát ohled na velikost napětí vzhledem k výkonu motoru. Aby kroužkový motor byl schopen produkovat maximální záběrný moment při současném malém proudovém nárazu, je potřeba zapojit k motoru vhodný spouštěč.

2.3.3 Jednofázový motor s kotvou nakrátko

Od trojfázového se liší zejména provedením vinutí statoru. To má totiž přibližně ve dvou třetinách drážek vloženou hlavní fázi a ve zbytku potom fázi pomocnou, která bývá obvykle připojena paralelně k vinutí fáze hlavní. K zajištění fázového posunu se užívá kondenzátor buď při rozběhu, nebo trvale připojený. Možností je však také zapojení pomocného odporu; nevýhodou této metody je však horší účinek.

2.3.4 Jednofázový motor s pomocnou fází

Vnější vzhled je velmi podobný trojfázovému, jediným výrazným rozdílem je připojený kondenzátor. Rotorem je kotva nakrátko, statorem je opět soustava dynamoplechů s drážkami. Stator však obsahuje dvě různá vinutí – hlavní (pracovní) a pomocné (rozběhové). Vinutí hlavní fáze je uloženo ve dvou třetinách drážek. Takto zapojené vinutí potom vytváří pulzující magnetické pole, které však není schopné samostatného rozběhu motoru. Tento problém se řeší vložением vinutí do zbývajících drážek, což potom vede k vytvoření pomocné fáze, jejíž osa je pootočená o 90°. K zajištění fázového posunu se užívá kondenzátor buď při rozběhu, nebo trvale připojený. Pomocné vinutí je tvořeno drátem menšího průřezu a je navrženo pouze na krátkodobý chod. Poté, co dojde k rozběhu motoru se rozběhové vinutí odpojuje, a to buď ručně, nebo odstředivým či elektromagnetickým vypínačem. Směr otáčení je závislý na zapojení cívek hlavního a pomocného vinutí.



2.3.5 Jednofázový motor se stíněnými póly

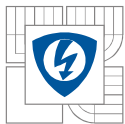
Jedná se o nejjednodušší a zároveň nejspolehlivější jednofázové motory s asynchronními otáčkami. Je proveden s vyniklými póly, přičemž část toku je na jednotlivých pólech vždy odstíněna pomocí závitu nakrátko; ve kterém je potom indukován časově posunutý proud oproti hlavnímu toku. Takto vytvořený tok se sčítá s tokem hlavním a může dojít k roztočení stroje. Motory jsou široce využívány u jednoduchých pohonů, kde se neklade důraz na vysokou účinnost a co nejnižší provozní teplotu. Motory tohoto typu jsou zpravidla konstruovány jen pro malé výkony. Vzhledem k tomu, že smysl otáčení stroje je pevně určen polohou stínících závitů, nelze změnit směr otáčení. Rotor bývá zásadně proveden jako klecový a jeho drážky jsou natočeny o jednu rozteč, tím se dosáhne možnost rozběhu nezávisle na poloze rotoru.

2.3.6 Jednofázový motor s trvale připojeným kondenzátorem

Mimo jednofázové motory s pomocným vinutím se u některých zařízení s úspěchem vyskytuje využití motorů s trvale připojeným kondenzátorem. Takovéto motory disponují dvoufázovým vinutím, které je napájeno jednofázovou sítí. Vnější provedení motoru je velmi podobné motoru jednofázovému s pomocnou fází nebo třífázovému s kotvou nakrátko, na vnější konstrukci však bývá připojen kondenzátor. Stator obsahuje dvě vinutí, která jsou provedena jako samostatná a pootočena o 90° . Vinutí jsou vložena do stejného počtu drážek. Vinutí jsou potom napájena právě přes trvale připojený kondenzátor a prochází jimi proud s fázovým posunem. Tím se vytvoří dvoufázové točivé pole roztáčející stroj žadaným směrem. Směr točení takto konstruovaných motorů lze měnit přepínačem.

Použití trojfázového motoru napájeného z jednofázové sítě:

Pro každý trojfázový asynchronní motor existuje možnost poměrně jednoduchého připojení na jednofázovou síť na základě odpojení fází, jedinou podmínkou je, aby motor nebyl zatížen na plný výkon. Tato schopnost je závislá na konstrukčním uspořádání vinutí. Základní podmínkou je, aby měl trojfázový motor zapojeno vinutí pro napětí jednofázové sítě, na kterou je připojován; to se provádí pomocí přepojení do trojúhelníku nebo do hvězdy. Někdy je však potřeba provést hlubší zásah a přepojit samotné cívky vinutí, což se provádí s ohledem na samotné provedení vinutí a počet pólů. Motor může pracovat i ve dvojfázovém zapojení, ale nedokáže se sám roztočit, to je vyřešeno krátkým připojením kondenzátoru při rozběhu, který nahrazuje třetí fází. Rozběhový kondenzátor zároveň dokáže vylepšit rozběhové parametry stroje, jmenovitě se jedná o záběrný moment. Kapacita kondenzátoru se upravuje pro optimální velikost elektrického proudu, při které má stroj klidný běh a udržuje si potřebný výkon. Při správném návrhu lze takto dosáhnout až 75-95% původního výkonu při účinnosti okolo 0,5. Motor po takovéto úpravě má však vyšší příkon než trojfázové provedení a při nesprávně navrženém kondenzátoru může docházet k přehřívání.



3 PRINCIP A POSTUP NÁVRHU MOTORU

Před samotným začátkem výpočtu parametrů stroje je potřeba určit základní konstrukční řešení stroje, včetně ohledu na ventilaci a krytí. Samotný postup výpočtu se může lišit na základě mnoha parametrů, proto se volí takové kroky, které nejvíce vyhovují volené konstrukci a zaručují co nejmenší opakování výpočtů. Existuje však poměrně unifikovaný přehled pořadí postupu návrhu asynchronního stroje:

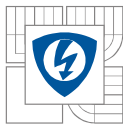
1. Stanovení základních veličin odpovídajících zadaným požadavkům
2. Stanovení hlavních rozměrů stroje
3. Návrh vinutí, rozměrů drážek, rozměrů jha pro stator a rotor
4. Výpočet magnetického obvodu
5. Stanovení odporů a reaktancí
6. Stanovení účinníku, ztrát, účinnosti, charakteristik, případná změna návrhu a následný přepočet
7. Stanovení tepelných a ventilačních vlastností stroje
8. Předběžný výpočet, určení namáhání konstrukce s ohledem na případné vibrace a jiné vlivy
9. Ekonomický výpočet

Vzhledem k tematickému zaměření projektu a ohledu na velmi specifické požadavky pro výpočet, porovnání a hodnocení výhodnosti získaných výsledků se tato práce nebude posledními body zabývat.

Tato část práce se bude věnovat metodice a postupu návrhu asynchronního motoru v jednofázovém provedení. Výpočtová část návrhu asynchronního stroje v provedení jednofázovém neumožňuje využít některá zjednodušení užívaná při návrhu trojfázového stroje – to je dáno tím, že při užití běžných zjednodušení by u výpočtu jednofázového motoru docházelo k výrazným nepřesnostem. Základem je tedy sestavit co nejpresnější nezkrácený postup návrhu jednofázového stroje s ohledem na zadané parametry a požadované konstrukční provedení stroje[1].

3.1 Stanovení kapacity kondenzátoru

Pro zvolený návrh je nutné zvolit velikost připojeného kondenzátoru; k tomu poslouží několikero empirických vzorců. Pro vyšší přesnost lze využít metody provozního optima, která dosahuje vysoce přesných výsledků. Jistou možností je také použít více než jeden z empirických vzorců užívaných k výpočtu velikosti kondenzátoru. Výsledky se následně porovnají a zvolí se co nejvhodnější vyhovující kondenzátor z řady běžně prodávaných. U takových pohonů, kde není záběrný moment stěžejním parametrem, lze použít menší a levnější kondenzátor. Tam kde vyžadujeme velký záběrný moment, musíme zainvestovat do dražšího kapacitoru o vyšší kapacitě.



Empirické vzorce užívané k výpočtu velikosti kondenzátoru:

$$C = 0,29 \cdot k \cdot P \quad (16)$$

Konstanta k je závislá na síťovém napětí a nabývá hodnot:

U [V]	k [-]
110	200
230	68
400	25

Tabulka č. 1: určování konstanty k podle napětí sítě

$$C = 68 \cdot P \quad (17)$$

$$C = \frac{P}{U \cdot f^2} \quad (18)$$

Po vypočtení požadované velikosti kondenzátoru je následně vhodné porovnat výsledek s tabulkou typizovaných kondenzátorů používaných pro různé typy i zapojení strojů a následně vybrat vhodný kondenzátor z běžně vyráběné řady.

Výkon motoru [W]	Rozběhový kondenzátor [μF]	Trvale připojený kondenzátor [μF]
100-200	8-10	5-8
200-300	10-16	8-12
300-500	16-24	10-16
500-750	25-40	16-25
750-1000	40-51	25-35

Tabulka č. 2: tabulka typizovaných kapacit kondenzátorů pro různé typy strojů.

Při určování kondenzátoru metodou provozního optima je stěžejní informací provozní optimum kondenzátorového motoru. Na základě této informace poté volíme poměr mezi velikostí kondenzátoru a počtem závitů pomocného vinutí. Pro užití této metody je však nutná znalost základní rovnice motoru s přídatným vinutím i impedancí.

Základním stavebním kamenem pro návrh elektrického stroje je v první řadě stanovení konstrukčních rozměrů stroje. Na tento krok navazuje určení parametrů a vlastností týkajících se hlavního vinutí, a v neposlední řadě také rozměrů klece rotoru. Následuje výpočet nebo volba činných odporů v obvodu a také výpočet činitelů vinutí a zjištění reaktancí. [1][8]

3.2 Stanovení hlavních rozměrů stroje

Pro určení hlavních rozměrů stroje je výhodné vycházet z rozměrů pro trojfázový stroj, které se následně přepočítají vzhledem k využití stroje na jednofázový model. Využití stroje potom závisí na použitém zapojení a velikosti této veličiny odečítáme z tabulek.

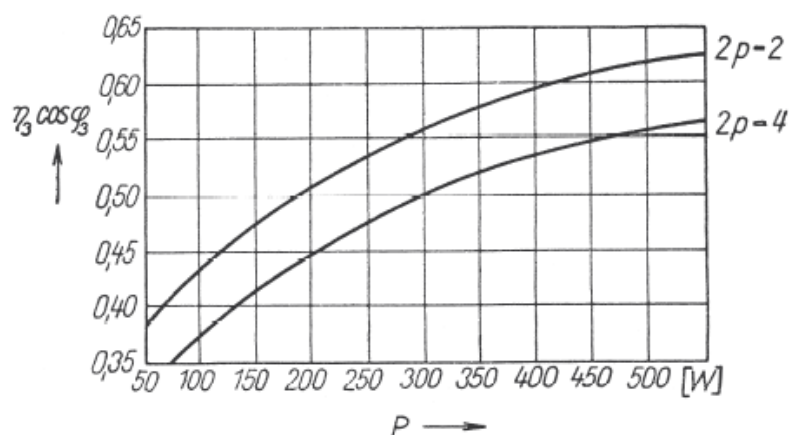
Zdánlivý příkon třífázového stroje o stejných rozměrech:

$$S_3 = \frac{\alpha \cdot P}{\cos \varphi_3 \eta_3} \quad (19)$$

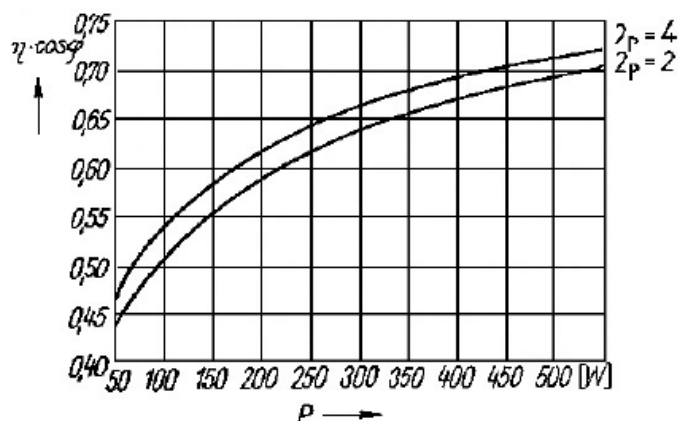
$$\text{kde } \alpha \text{ je: } \alpha = \frac{1}{\gamma} \quad (20)$$

Jestliže se jedná o návrh motoru s trvale připojeným kondenzátorem, jehož pomocné vinutí je využito naplno, lze uvažovat $\alpha \cong 1,1$.

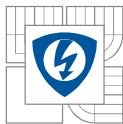
Velikost $\eta_3 \cos \varphi_3$ lze odečíst z grafu.



Obr. 7: Stanovení součinu účinnosti a účinníku u trojfázových motorů pro motory které nemají trvale připojeno pomocné vinutí [1]



Obr. 8: Součin účinnosti a účinníku pro motory kondenzátorové [1]



Pro zjištění hlavních rozměrů platí rovnice:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot (1 - \varepsilon_1) \cdot S_3 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A \cdot \chi_1 \cdot n_s} \quad (21)$$

Existuje zjednodušení použitelné pro návrh jednofázových strojů, je však omezené pouze pro dvou a čtyřpólové motory. Zjednodušení je takové, že veličiny $(1 - \varepsilon_1)$ a χ_1 lze vyjádřit jako sobě rovné. Tento krok poté zjednoduší vztah pro výpočet hlavních rozměrů následovně:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot 10^4 \cdot S_3}{B_\delta \cdot A \cdot n_s} \quad (22)$$

Kde část $\frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A}$ je možno označit jako C_E – výkonovou (Essonskou) konstantu.

Při výpočtu výkonové konstanty se volí sycení ve vzduchové mezeře v rozmezí $B_\delta = 0,5-0,6\text{T}$ a velikost proudového zatížení obvodu statoru volíme v rozmezí $A=120-200\text{A/cm}$.

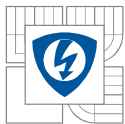
Dále je nutno určit poměr vnějšího průměru statorových plechů vůči vrtání statoru $\frac{d}{d_{1s}}$, ten se volí přibližně $k_s=0,5$ pro dvoupólový stroj a $0,6$ pro stroj čtyřpólový.

Nyní je možno určit poměr délky železa k pólové rozteči:

$$\lambda = \frac{l}{\tau} \quad (23)$$

$$\text{kde } \tau = \frac{\pi \cdot d}{2p} \quad (24)$$

Poměr λ bývá běžně pro dvoupólové stroje v rozmezí $0,6-1,0$ a u čtyřpólových pak $1,0-1,4$ [1][5]



3.3 Předběžný výpočet rozměrů drážek a vinutí

Pro výpočet proudu hlavního vinutí je nutné brát ohled na to, zda-li se jedná o motor s trvale připojeným kondenzátorem či bez něj.

Proud hlavním vinutím pro motor bez trvale připojeného kondenzátoru:

$$I_A = \frac{P_n}{\eta_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot U} \quad (25)$$

Proud pro motor s trvale připojeným kondenzátorem:

pozn.: platí však pouze pokud je pomocné vinutí plně využito během chodu (podmínkou je vhodně přizpůsobený kondenzátor), jinak se užívá předchozího vztahu.

$$I_A = \frac{P_n}{\eta_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot U \cdot (1 + k_{Cu})} \quad (26)$$

Kde k_{Cu} je poměr prostoru drážek obou vinutí

Plocha pólu ve vzduchové mezeře se vyjádří jako:

$$S = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{2p} \quad (27)$$

Indukční tok se poté získá ze vztahu:

$$\phi = \frac{l \cdot d \cdot B_\delta \cdot 10^{-4}}{p} \quad (28)$$

Počet závitů hlavního vinutí lze vypočítat následovně:

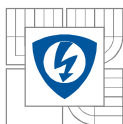
$$N_A = \frac{U \cdot (1 - \varepsilon_1)}{4,44 \cdot f \cdot \chi_A \cdot \phi} \quad (29)$$

Dále je potřeba určit šířku zubu, ta se počítá následovně:

$$b_{z1} = \frac{B_\delta}{B_{z1}} \cdot \frac{\pi \cdot d}{0,9 \cdot Q_1} \quad (30)$$

$$\text{Kde } \frac{\pi \cdot d}{Q_1} = \tau_{1s} \text{ je rozteč drážek horní části statorového zubu} \quad (31)$$

V tomto případě se užívá plnění železa o hodnotě 0,9; jinak se volí z tabelovaných činitelů plnění plechů na základě použitého typu.



Tloušťka plechů	k_{Fe}	
[mm]	Plechý lakované	Plechý s chemickou vrstvou izolace
0,5	0,92-0,95	0,95-0,97
0,35	0,89-0,93	0,93-0,97

Tab č. 3: Činitelé plnění pro různé typy plechů

Průřez A potom volíme vzhledem k vypočítanému proudu I_A takovým způsobem, aby byla proudová hustota σ_A v rozmezí 6-8,5 A/mm².

Následně můžeme určit průřez hlavního vinutí ze vztahu:

$$S_A = \frac{I_A}{\sigma_A} \quad (32)$$

Plochu drážky bez izolace poté zjistíme ze vztahu:

$$S_d = \frac{2 \cdot N_A \cdot S'_A}{Q_{1A} \cdot k_d} \quad (33)$$

kde k_d je činitel plnění, ten udává poměr součtu průřezů izolovaných vodičů k ploše drážky bez izolace. Malé motory disponují tabelovanými hodnotami pro odečítání tohoto činitele.

počet pólpárů	2	4	6
činitel plnění drážky k_d	0,41	0,39	0,37

Tabulka č. 4: plnění drážek.

Jestliže se nejedná o motor malých rozměrů, dá se činitel plnění získat ze vztahu:

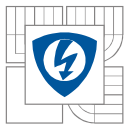
$$k'_d = \frac{2 \cdot N_A \cdot d_A^2}{Q_{1A} \cdot S_d} \quad (34)$$

Podle tohoto vztahu dosahuje činitel plnění až 70% celkové hodnoty.

Následujícím krokem je určení počtu drážek statoru a rotoru. Tyto hodnoty musí být přizpůsobeny v návaznosti na sobě – špatná volba by měla za následek nežádoucí hluk motoru, podobně jako negativní vlivy třetí a drážkové harmonické.

2p	Q_1	Q_2
2;4	24	30
2	18	30
4;6;8	36	48
2;4;8	24	36
4	32	26
2	24	18

Tabulka č. 5: užívané počty drážek (drážky jsou natočeny)



Výpočet šířky statorového jha popisuje vztah:

$$d_{1s} - d_{2s} = \frac{\phi \cdot 10^4}{B_{j1} \cdot l \cdot 0,9} = \frac{B_\delta}{B_{j1}} \cdot \frac{d}{p \cdot 0,9} \quad (35)$$

Kde hodnota B_{j1} dosahuje hodnot v rozmezí 1,3-1,5T

Podobně jako šířka zubu u statoru se počítá šířka zubu rotorového jha:

$$b_{z2} = \frac{B_\delta}{B_{z1}} \cdot \frac{\pi \cdot d}{0,9 \cdot Q_2} \quad (36)$$

Sycení železa u zubů rotoru B_{z1} volíme v rozmezí 1,5-1,8T.

Obdobně jako výpočet šířky statorového jha se dá získat šířka jha rotorového:

$$d_{1r} - d_{2r} = \frac{\phi \cdot 10^4}{B_{j2} \cdot l \cdot 0,9} = \frac{B_\delta}{B_{j2}} \cdot \frac{d}{p \cdot 0,9} \quad (37)$$

Přičemž hodnotu B_{j2} opět volíme v rozmezí 1,3-1,5T.

Při volbě průřezu vodivého materiálu postupujeme podle vzorce:

$$I_{dt} = \frac{s \cdot U \cdot (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2 \cdot \chi_A \cdot N \cdot R'_t} \quad (38)$$

Kde hodnotu $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ volíme

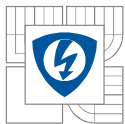
Výsledný skluz je možné na základě zejména praktických zkušeností odhadnout, nebo se dá vypočítat ze vzorce:

$$R'_t = \frac{(1-s) \cdot s \cdot U^2 \cdot (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 \cdot Q_2 \cdot \chi_t}{4 \cdot N_A^2 \cdot \chi_A^2 \cdot (P \cdot \Delta P''_{Cui} + \Delta P)} \quad (39)$$

Dalším krokem návrhu je výpočet proudové hustoty sousledné složky, ta je dána vztahem:

$$\sigma_{dt} = \frac{I_{dt}}{S_t} \quad (40)$$

Hodnota proudové hustoty se následně musí porovnat s tabulkovými údaji pro daný stroj a typ klece, přičemž velikost proudové hustoty musí být zajištěna buďto stejná, nebo nižší, než jaký jí připadá údaj v tabulce. [1][5][8]



Rotor	Druh stroje	σ_{dt}
Měděná klec	Dvoufázové nebo trojfázové souměrné stroje	7-8
	Kondenzátorové motory	6-7
	1f motory bez trvale připojeného pomocného vinutí	3,5-5
Hliníková klec	Dvoufázové nebo trojfázové souměrné stroje	4-5
	Kondenzátorové motory	4-4,5
	1f motory bez trvale připojeného pomocného vinutí	2-3

Tab. č. 6: Velikosti sousledné složky proudové hustoty rotoru

3.4 Výpočet činných odporů

Následný výpočet rotorového odporu, nebo jeho volba, je bezmála samostatnou kapitolou při návrhu. Parametry odporu totiž ovlivňují jmenovitý skluz, moment zvratu i záběrný moment, podobně jako momenty přídavné. Moment zvratu se snižuje s rostoucím odporem a také se s rostoucím odporem zvyšuje jmenovitý skluz. Jestliže je jedním z našich primárních požadavků vysoký moment zvratu, potřebujeme zajistit větší průřez materiálu vodiče. K návrhu tedy přistupujeme s představou týkající se např. požadavku na jmenovitý skluz, velikost momentu zvratu, požadavku na proudovou hustotu apod. Existují však také případy, kdy průřez vodiče volíme, a následně kontrolujeme proudovou hustotu [1][5].

Pro výpočet jak hlavního, tak i pomocného vinutí statoru platí vztah:

$$R_1 = \frac{N \cdot I_z}{\gamma \cdot S_t} \quad (41)$$

Odpor tyče u rotoru je získatelný ze vztahu:

$$R'_t = R_t + \frac{R_{kr}}{2 \sin^2 \frac{p \cdot \pi}{Q_2}} \quad (42)$$

Tento vzorec popisuje odpor tyče zároveň s odporem spojovacích kruhů rotoru.

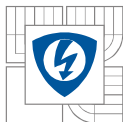
Odpor samotné tyče rotoru poté bude:

$$R_t = \frac{l_t}{\gamma \cdot S_t} \quad (43)$$

Odpor jednoho spojovacího kruhu bude následně:

$$R_{kr} = \frac{\pi \cdot d_{kr}}{\gamma \cdot S_{kr} \cdot Q_2} \quad (44)$$

Měrná vodivost γ se odečítá z tabulek pro typizované užívané materiály



Materiál	Teplota ϑ [°C]	γ [Sm/mm ²]
měď	20	56
	70	47
	20+ $\Delta\vartheta$	56
		$1+0,0037\Delta\vartheta$
elektrolytický hliník	20	34
	70	28
	20+ $\Delta\vartheta$	34
		$1+0,0037\Delta\vartheta$
mosaz	20	11
	70	12
	20+ $\Delta\vartheta$	11
		$1+0,0015\Delta\vartheta$

Tabulka č. 7: Měrná vodivost pro typizované materiály.

Odpor celé klece rotoru přepočítáme na stator pomocí následujícího vztahu:

$$R_2 = \frac{4m \cdot (N_1 \chi_1)^2}{Q_2 \cdot \chi_t^2} \cdot \left[R_t + \frac{R_{kr}}{2 \cdot \sin^2 \frac{p \cdot \pi}{Q_2}} \right] \quad (45)$$

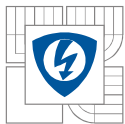
V následujícím kroku je nutno zjistit činitel vinutí χ - ten je vyjádřen poměrem mezi algebraickým a geometrickým součtem napětí u cívek tvořících vinutí fáze. Činitel vinutí dále můžeme rozdělit na činitele rozlohy χ' a zkrácení kroku χ'' .

Činitel rozlohy můžeme získat ze vztahu:

$$\chi' = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (46)$$

$$\text{Kde } \alpha = \frac{360}{Q_{celk}} \quad (47)$$

$$\text{a } q = \frac{Q_{Al}}{2p} \quad (48)$$



Činitel zkrácení toku je následně popsán vztahem:

$$\chi'' = \sin \frac{y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (49)$$

Kde $\frac{y}{\tau}$ vyjadřuje poměr kroku cívky vzhledem k pólové rozteči

Pro většinu případů motorů jsou drážky klece rotoru uzpůsobeny zešíkmením tak, aby se dosáhlo lepších výsledků průběhů momentové charakteristiky.

Pokud uvažujeme takovéto zešíkmení, platí pro činitel vinutí následující vztah:

$$\chi_t = \frac{\sin \frac{\check{s} \cdot \pi}{2 \cdot \tau}}{\frac{\check{s} \cdot \pi}{2 \cdot \tau}} \quad (50)$$

3.5 Výpočet hlavní reaktance

Hlavní reaktance je veličina závisící na magnetickém toku, který prochází do rotoru skrze vzduchovou mezeru. Výsledné magnetické napětí u obvodu, vztažené na pól pár, je nutné určit pro následný výpočet hlavní reaktance ze vztahu [1]:

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mz1} + U_{mz2} + U_{mj1} + U_{mj2} \quad (51)$$

Z čehož magnetické napětí ve vzduchové mezeře získáme ze vztahu:

$$U_{m\delta} = 1,6 \cdot 10^4 \cdot \check{\delta} \cdot B_\delta \quad (52)$$

Přičemž efektivní vzduchovou mezeru získáme takto:

$$\check{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot \delta \quad (53)$$

Carterovy činitele pro stator a rotor můžeme stanovit ze vzorce:

$$k_\delta = \frac{\tau_d}{\tau_d + \delta - \frac{3}{4}b'} \quad (54)$$

Magnetické napětí na zubech statoru bude:

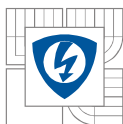
$$U_{mz1} = H_{z1} \cdot h_{celk} \quad (55)$$

Magnetické napětí jha statoru:

$$U_{mj1} = H_{j1} \cdot d_1 \quad (56)$$

Magnetické napětí na zubech rotoru:

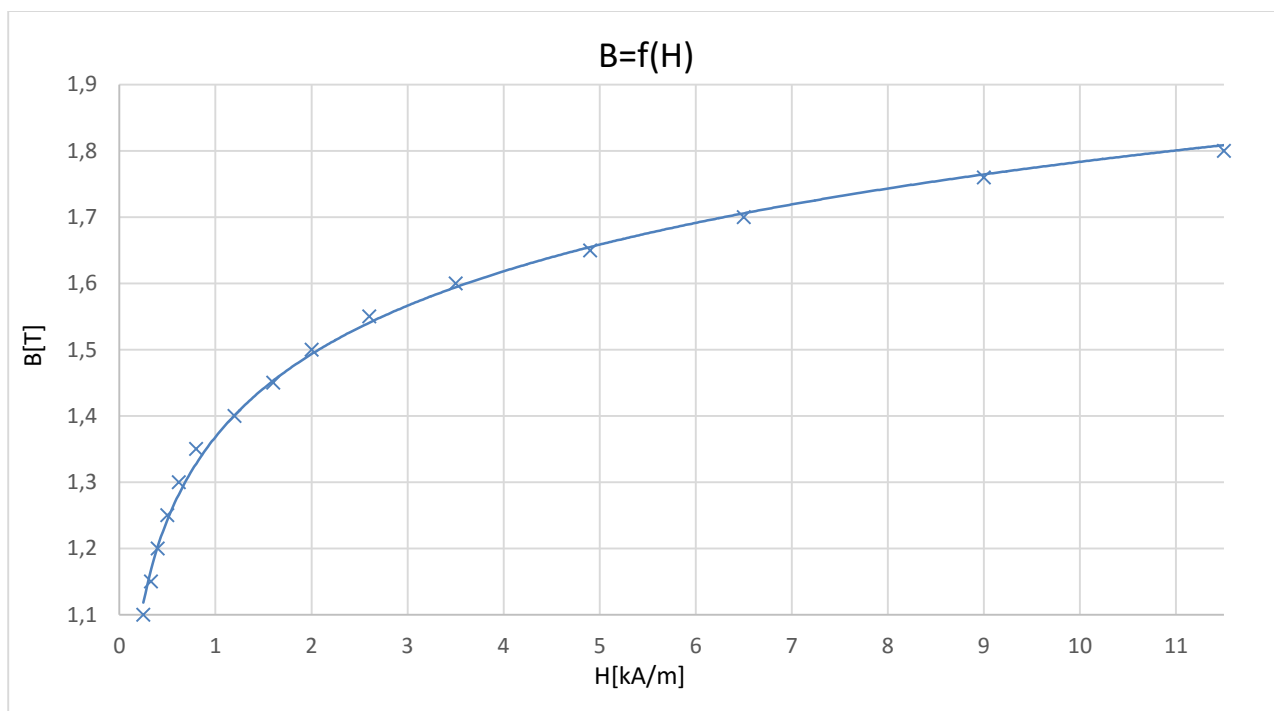
$$U_{mz2} = H_{z2} \cdot h_{rcelk} \quad (57)$$



Magnetické napětí jha rotoru:

$$U_{mj2} = H_{j2} \cdot d_r \quad (58)$$

Intenzity magnetického pole se odečítají z magnetizačních křivek pro zvolené hodnoty magnetické indukce.



Obr. č. 9: Magnetizační křivka plechů o ztrátách 0,265 W/N

Dále je nutno určit magnetizační reaktanci popsanou vztahem:

$$X_h = 1,6 \cdot m \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N \cdot \chi}{100} \right)^2 \cdot \frac{\tau}{100 \cdot \delta''} \cdot \frac{l}{p} \quad (59)$$

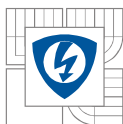
A ekvivalentní vzduchová mezera bude:

$$\delta'' = \delta' \cdot \frac{U_m}{U_{m\delta}} \quad (60)$$

Jestliže zanedbáme vliv železa, potom bude platit rovnost $\delta'' = \delta'$

Pro samotnou mezeru je nyní možné zjistit hlavní reaktanci popsanou následujícím vztahem:

$$X_h' = X_h \cdot \frac{\delta''}{\delta'} \quad (61)$$



3.6 Stanovení rozptylové reaktance statoru

Tato část bude zahrnovat veškeré magnetické toky vinutí statoru kromě toku základní harmonické ve vzduchové mezeře. Stanovení rozptylové reaktance bude velmi podstatnou část návrhu, protože tento parametr určuje vlastnosti záběrného momentu, přetížitelnosti i proudu nakrátko. Tato část je postupově totožná i pro trojfázové stroje [1][5].

Rozptylová reaktance podobně jako celkové magnetické napětí můžeme popsat sumou jednotlivých reaktancí.

$$X_{ra} = X_{A0} + X_{Ad} + X_{A\sigma} + X_{Aq} \quad (62)$$

Kde diferenční rozptyl pro statorové vinutí můžeme získat následovně:

$$X_{A0} = \sigma_{A0} \cdot X_h' \quad (63)$$

Přičemž součinitele diferenčního rozptylu se získávají z následující tabulky

Q_p	2	3	4	6	8	9	10	12	15	∞
jednofázová vinutí $q = \frac{2}{3} Q_p$	-	9,7	-	2,85	-	1,41	-	0,88	0,65	0,22
Jednofázová a dvoufázová vinutí $q = \frac{1}{2} Q_p$	23,4	-	8,45	4,68	3,3	-	2,65	2,29	-	1,64

Tab. č. 8: Hodnoty $\sigma_0/100$ typické pro vinutí s plným krokem

Pro jednofázová vinutí platí, že jestliže mají z počtu drážek na pól Q_p právě q drážek rovnoměrně ovinuto, potom platí:

$$\sigma_{A0} = \frac{\pi^2 \cdot p}{\chi_A^2 \cdot Q_1} \cdot \left(-\frac{1}{6}q + \frac{1}{4}Q_p + \frac{1}{6q} \right) - 1 \quad (64)$$

Dále diferenční rozptyl je možno rozdělit na dvě složky, přičemž ta první je rozptyl přes hlavy zubů, druhá potom bude rozptylem diferenčním pro počet drážek blížíci se nekonečnu. Diferenční rozptyl v jistém případě můžeme považovat za nekonečný, a to právě tehdy, pokud dosáhneme dokonalého utlumení vyšších harmonických.

Rozptyl přes hlavy zubu se pro jednovrstvá vinutí určí následovně:

$$X_{Az} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_z}{q} \quad (65)$$

$$\lambda_z = \frac{\left[\tau_{d2} - \frac{3}{4} \cdot (b_1' + b_2') \right]^2}{6 \cdot \tau_{d2} \cdot \delta} \quad (66)$$

Z čehož vodivost hlavy zubu λ_z

Rozptylová reaktance statorové drážky bude potom:

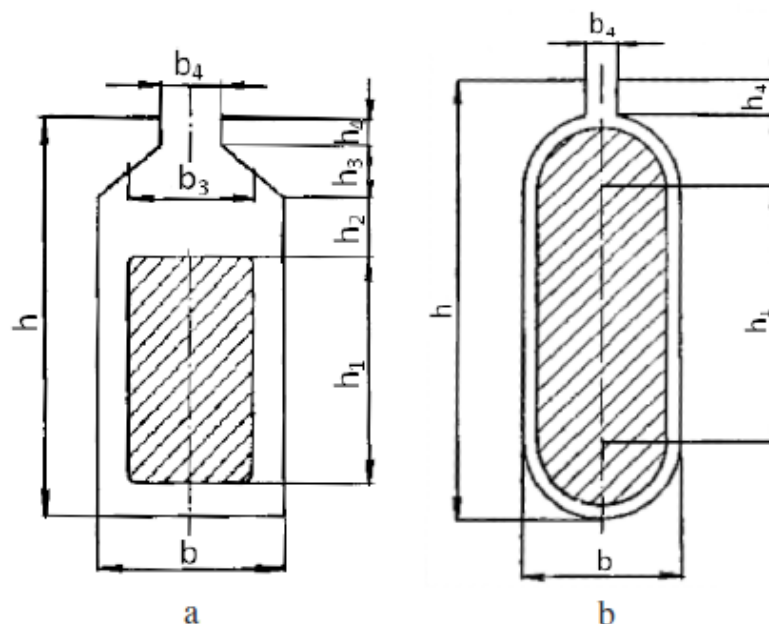
$$X_{Ad} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_d}{q} \quad (67)$$

Vodivost běžně používané čtyřhranné drážky λ_d se získá:

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_3}{b_3} + \frac{h_4}{b_4} \quad (68)$$

Pro běžně užívanou oválnou drážku bude vodivost drážky:

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + 0,66 + \frac{h_4}{b_4} \quad (69)$$



Obr. č. 10: rozměry a) čtyřhranné drážky, b) oválné drážky [1]

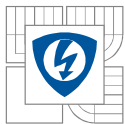
Dále je potřeba získat rozptyl skrze čela vinutí, ten je dán následujícím vztahem:

$$X_{Ac} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_c}{p} \cdot \lambda_c \quad (70)$$

Odkud vodivost skrze čela vinutí bývá v rozmezí hodnot $\lambda_c \cong 0,11-0,16$

Dalším krokem je výpočet reaktance rozptylu vznikající natočením drážek rotoru:

$$X_{Aq} = \sigma_q \cdot X'_h \quad (71)$$



Odkud σ_q získáme jako:

$$\sigma_q \cong 1,64 \cdot \left(\frac{p}{Q_2} \cdot \frac{\check{s}}{\tau_{d2}} \right)^2 \quad (72)$$

Je také možné zahrnout činitele rozptylu od natočení drážek σ_q do rozptylu diferenčního.

3.7 Výpočet rozptylové reaktance rotoru přepočtené na stator

Podobně jako u rozptylové reaktance pro hlavní vinutí se bude rozptylová reaktance rotoru skládat ze součtu jednotlivých reaktancí dílčích. [1][5]

Vztah potom bude popsán následovně:

$$X_{r2} = X_{20} + X_{2d} + X_{2q} \quad (72)$$

Odkud diferenční rozptyl pro klecový rotor bude:

$$X_{20} = \sigma_{20} \cdot X_h' \quad (73)$$

Kde pro klecový rotor hodnota činitele diferenčního rozptylu odpovídá:

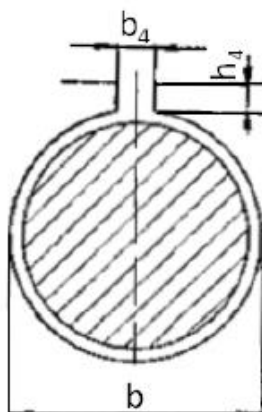
$$\sigma_{20} = 3,3 \cdot \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2 \quad (74)$$

Následně drážkový rozptyl pro klecový rotor přepočtený na vinutí statoru bude:

$$X_{2d} = 0,316 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A \cdot \chi_A}{100 \cdot \chi_t} \right) \cdot l \cdot \frac{m \cdot \lambda_d}{Q_2} \quad (75)$$

Pro typicky užívanou kruhovou drážku bude vodivost drážky:

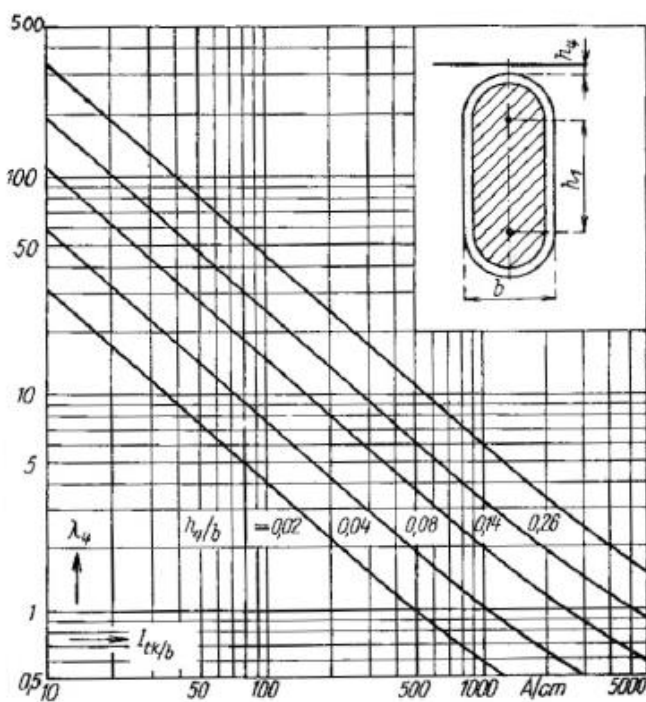
$$\lambda_d = 0,66 + \frac{h_4}{b_4} \quad (76)$$



Obr. č. 11: běžně užívaná drážka kruhového tvaru. [1]

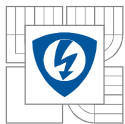
Jestliže se při návrhu bude jednat o drážky uzavřené, nahrazuje se poměr $\frac{h_4}{b_4}$ hodnotou λ_4 z typizovaného diagramu a rovnice se upraví na:

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3 \cdot b} + 0,66 + \lambda_4 \quad (77)$$



Obr. č. 12: Diagram pro určení rozptylu pro uzavřenou drážku. [1]

Výše zmíněná vodivost λ_4 je však velmi proměnlivá vzhledem k proudu I_t .



Rozptylová reaktance od natočení rotorových drážek je popsána:

$$X_{2q} = \sigma_q \cdot X_h' \quad (78)$$

Odkud činitel rozptylu od natočení drážek bude stejný, co činitel rozptylu od natočení drážek vypočítaný pro satorové vinutí. Bude tedy platit rovnost :

$$X_{2q} = X_{Aq} \quad (79)$$

3.8 Výpočet ztrát a účinnosti

Pro možnost získání účinnosti je potřeba zjistit příkon stroje na základě vypočtených ztrát. To ovšem zahrnuje výpočet ztrát za pomoci znalosti proudu naprázdno. To by mělo za následek nutnost alespoň prototypu stroje a výsledky z jeho měření. Výsledné ztráty a účinnost jsou tedy předběžné odhady. Možností, jak zjistit ztráty a vypočítat účinnost potom může být stanovení proudu magnetizačního, jehož velikost je podobná velikosti proudu naprázdno. [1][5].

Příkon stroje získáme sumou jednotlivých vznikajících ztrát zvětšených o výkon stroje:

$$P_1 = P + \sum \Delta P = P + \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cuz} + \Delta P_{Cus} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d + \Delta P_{mech} \quad (80)$$

Z čehož ztráty v železe budou:

$$\Delta P_{Fe} = G \cdot p_{1,0} = G \cdot (k_h \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{js} + k_e \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{zs}) \quad (81)$$

$p_{1,0}$ je tabelovaná hodnota ztrátového čísla závisující na druhu a tloušťce použitého plechu.

Při výpočtu ztrát v železe je taktéž nutno brát ohled na že pole zpětné složky ve výsledku snižuje sycení u pomocného vinutí. To má za následek nutnost přepočítat zvolené veličiny B_{j1} a B_{z1} na 95% jejich hodnoty jelikož snížení bývá právě o 5% hodnoty.

Hmotnost zubů statoru se vypočítá na základě rovnice:

$$m_{zs} = Q_1 \cdot h_{celk} \cdot b_{z1} \cdot 0,9 \cdot l \cdot \rho_{Fe} \quad (82)$$

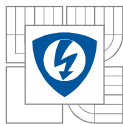
A hmotnost satorového jha se určí ze vztahu:

$$m_{js} = \pi \cdot d_1 \cdot h_{j1} \cdot 0,9 \cdot l \cdot \rho_{Fe} \quad (83)$$

Přičemž se užívá hustoty železa coby běžně užívaného materiálu při výrobě.

Ztráty ve vinutí rotoru se získají ze vztahu:

$$\Delta P_{Cu1} = R_A \cdot I_A^2 \quad (84)$$



Dále je nutno určit výše zmiňovaný magnetizační proud pro výpočet zbylých ztrát. Ten je možno získat z následujícího vzorce:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot U_m}{1,8 \cdot \chi_A \cdot N_A} \approx I_0 \quad (85)$$

Ztráty v mědi rotoru způsobené zpětnou složkou naprázdno budou vypočteny následovně:

$$\Delta P_{Cu0} \cong \frac{1}{2} \cdot R_2' \cdot I_0^2 \quad (86)$$

Ztráty v mědi od složky zpětné poté budou:

$$\Delta P_{cuz} \cong \Delta P_{Cu0} \cdot \left(\frac{I_A}{I_0} \right)^2 \quad (87)$$

A ztráty v mědi rotoru od složky sousledné získáme jako:

$$\Delta P_{cus} = \frac{s}{1-s} \cdot (P + \Delta P_{mech} + \frac{1}{2} \Delta P_{cuz}) \quad (88)$$

Ztráty mechanické jsou odhadovány na přibližně 8% výkonu, tedy:

$$\Delta P_{mech} \approx 0,08 \cdot P \quad (89)$$

A dále se stanoví, že ztráty dodatečné budou činit přibližně 0,5%:

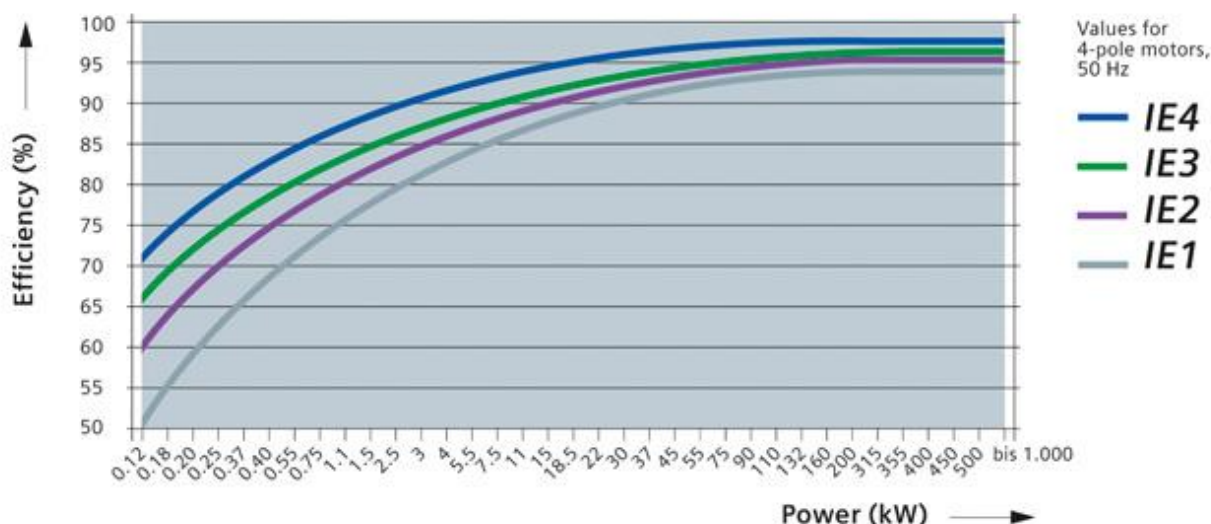
$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P \quad (90)$$

Nyní pro zjištění příkonu součtem výkonu a všech dílčích ztrát můžeme určit účinnost motoru:

$$\eta = \frac{P}{P_1} \cdot 100 \quad (91)$$

4 MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ ENERGETICKÝCH PARAMETRŮ

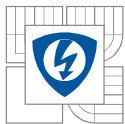
Vzhledem k požadavkům trhu je nutno, aby stroj nejen „pouze fungoval“, požadavky na výrobky v dnešní době sahají mnohem dál. Hlavními faktory potom jsou mimo jiné co nejlepší vlastnosti za co nejnižší možnou cenu. Proto se široce užívá parametru účinnosti jako hodnotícího faktoru. To potom staví účinnost stroje na přední příčky zaměření návrhu a účinnost úzce souvisí se samotnou potřebou snižovat ztráty v motoru kvůli dosažení co nejlepších parametrů. Směr vývoje strojů vzhledem ke zvyšování účinnosti však nezávisí pouze na potřebách zákazníka. Vzhledem k tomu, že téměř 40% celkové elektrické energie, která se vyrobí, je spotřebováváno právě elektrickými stroji, jsou na zlepšení účinnosti kladeny požadavky také ve formě různých norem. Využitím energie se běžně zabývají směrnice EuP pro výrobky využívající energii, směrnice EU 2009/125/ES, které jsou začleněny do legislativy zemí EU. Pro Českou republiku potom existuje norma ČSN EN 60034-30. Standardní norma IEC 60034-30-1 poté definuje účinnostní hladiny a třídy pro motory o výkonu od 0,12kW a výše (pro některé motory norma zahrnuje až stroje o výkonu 0,75kW a výše) pro kmitočtovou síť 50/60Hz. [10][11]



Obr. č. 13: Třídy účinnosti pro čtyřpólové motory podle IEC 60034-30. [9]

Jak lze pozorovat, podle normy IEC 60034-30 jsou stroje rozčleněny do nyní čtyřech účinnostních tříd. IE1 -standard efficiency, IE2 -high efficiency, IE3 – premium efficiency, IE4 – super premium efficiency.

Účinnost je dána poměrem využitelného výkonu na hřídeli stroje vzhledem k příkonu dodávanému stroji. Účinnost jako taková tedy hodnotí, jak dobře dovede navržený stroj využívat dodávanou energii a přeměňovat ji na požadovanou formu energie. Pro přesnou analýzu rozložení ztrát ve stroji je vhodné sestavit prototyp navrženého stroje a provést měření naprázdno, nakrátko, proměřit zatěžovací charakteristiku a z výsledných průběhů závislostí získaných na základě měření poté analyzovat ztráty a následně sestavit návrh jak snížit ztráty stroje.



Základním krokem je z výsledků měření zjistit nejvyšší ztráty a pokusit se realizovat jejich snížení. Běžným faktorem je, že největší a tedy nejvýznamnější ztráty jsou na základě měření ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1} , dále jsou to ztráty v železe statoru ΔP_{Fe} , a také ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{j2} . V praxi se může občas stát, že ztráty v železe jsou vyšší než ztráty ve vinutí, to by znamenalo, že železo stroje je vyrobeno z velmi nekvalitních plechů a zlepšení právě této části by mělo být primárním zaměřením.

4.1 Snížení ztrát ve vinutí

Právě ztráty ve vinutí bývají běžně nejvýznamnější, právě proto je vhodné začít s analýzou a omezením právě těchto ztrát.

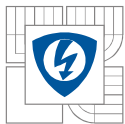
Ztráty vinutí statoru můžeme popsat následující rovnicí:

$$\Delta P_{j1} = V_{Cu} \cdot k_{p,Cu} \cdot \rho \cdot \sigma^2 \quad (92)$$

Je patrné, že ztráty ve vinutí jsou mimo jiné závislé na objemu vodiče, z čehož vyplývá, že jednou z možností snížení ztrát je možné zvětšit drážku pro statorové vinutí, to by mělo za následek možnost použití vodiče s větším průřezem a tím taktéž snížit proudovou hustotu vodiče.

Další možností by bylo vylepšit činitel vinutí, tedy co nejlépe využít prostor drážky pokud možno do úplného maxima tak, aby byl co nejnižší nevyužitý prostor v drážce. Zároveň je vhodné se zaměřit na izolaci; drážka by se dala lépe zaplnit, kdyby se použilo tenčího materiálu izolace, přičemž je však nutné zachovat veškeré vlastnosti původní izolace. Bylo by tedy nutné analyzovat materiál izolace a případně investovat do izolace lepší.

Snížování ztrát rotoru je velmi obtížné i nákladné, jednak si tato problematika vyžaduje sestavit velmi individuální přístup na základě velmi různých konstrukčních řešení rotorů, jednak také je vylepšení nákladné zejména kvůli nutnosti užití kvalitnějších materiálů s nižší rezistivitou například ve formě náhrady hliníku za měď. Mimo jiné je nutno brát ohled na teplotní vlastnosti používaného kovu a změny v ekonomice výroby rotoru. Příkladem může být právě výměna hliníku za měď – měď má výrazně nižší měrný odpor ale také výrazně vyšší teplotu tavení, to má za následek obtížnější tavení a lití (navíc při vysokotlakém lití může dojít k poškození elektrotechnických plechů) nebo sváření mědi a tedy i nárůst výrobní ceny. Navíc by změna odporu vinutí rotoru měla za následek změnu zatěžovací charakteristiky stroje a zvýšení záběrného proudu.[8]



4.2 Snižování ztrát v magnetickém obvodu

Jako o dalších významných ztrátách má smysl se zabývat ztrátami v magnetickém obvodu stroje, ty jsou popsány následujícím vztahem:

$$\Delta P_{Fe} = G \cdot p_1 = G \cdot (k_h \cdot B^2 + k_e \cdot B^2) \quad (93)$$

Vztah je zjednodušený v tom smyslu, že zanedbává rozdíly v magnetické indukci pro rozdílné části stroje.

Ztráty je opět možno redukovat více způsoby – buďto snížením magnetické indukce ve vzduchové mezeře, nebo použitím kvalitnějších plechů.

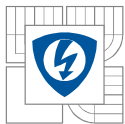
Na základě následujícího vztahu:

$$B_{\max} = \frac{1}{N \cdot S} \int u(t) dt \quad (94)$$

Lze pozorovat, že indukce se dá zredukovat plochou, která je mimo jiné závislá na délce motoru l . Redukce magnetické indukce je tedy možno docílit právě zvětšením osově délky rotoru. Pokud však přistoupíme tomuto kroku, je nutné brát v potaz také případnou změnu parametrů stroje ve formě možné změny elektromagnetického momentu a indukovaného napětí, což jsou parametry závislé právě na osově délce i magnetické indukci.

4.3 Snížení mechanických ztrát

Mechanické ztráty mohou běžně také dosahovat poměrně vysokých hodnot, a proto taktéž bývají předmětem zájmu o případné snížení. Ztráty mechanické jsou dány předně ztrátami třecími. Ty jsou způsobeny třením v ložiskách, třením rotoru, a pokud je na hřídeli rotoru přítomen ventilátor také působením ztrát ventilačních. V takovém případě má smysl mluvit o užití vhodnějšího ventilátoru.



5 NÁVRH JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Následující kapitola bude věnována příkladu návrhu jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází. Návrh se bude věnovat motoru, který se v současné době vyrábí ve firmě EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Samotný postup návrhu bude vycházet především z práce Dr. Jaroslava Štěpiny, Jednofázové indukční motory. Následný návrh bude poté porovnán s parametry současně vyráběného reálného stroje.

Zadání jmenovitých hodnot stroje:

$$U_n = 230V$$

$$f = 50Hz$$

$$n = 2774 \text{ ot/min}$$

$$P_n = 900W$$

$$2p = 2$$

$$l = 150mm$$

5.1 Stanovení hlavních rozměrů

Při stanovování základních rozměrů stroje je vhodné vycházet buďto z prakticky ověřených vyrobených vzorků v rámci dané firmy, nebo při novém návrhu z rozměrů trojfázových motorů, jejichž velikost je následně upravena na základě plánovaného využití stroje.

Pro přepočet výkonu tedy bude platit:

$$P_3 = \alpha P_n = 1,1 \cdot 900 = 990W$$

Pro jednofázové motory s pomocným vinutím se volí hodnota α v rozmezí $\alpha=1,1-1,3$. Přičemž se udává, že pro stroje s trvale připojeným kondenzátorem se volí hodnota $\alpha=1,1$.

Z toho vycházející zdánlivý příkon bude popsán:

$$S_3 = \frac{\alpha P_n}{\eta_3 \cos \varphi_3} = \frac{990}{0,773} = 1280 VA$$

Hodnota součinu $\eta_3 \cos \varphi_3$ vychází z diagramu na obr. 7, s následnou aproximací pro získání hodnot odpovídajícím vyšším výkonům.

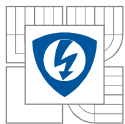
Pro zjištění hlavních rozměrů následně platí:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A} \cdot \frac{S_3}{n_s} = \frac{8,6 \cdot 10^4}{0,6 \cdot 200} \cdot \frac{1280}{3000} = 305 cm^3$$

Přičemž volím hodnoty $B_\delta=0,6T$ a $A=200A/cm$

Délka železa l počítaného motoru je 15cm, odtud dopočítáme velikost vrtání statoru:

$$d = \sqrt{\frac{305}{15}} = 4,5cm$$



A vnější průměr statoru odpovídá přibližně:

$$d_{1s} \cong 2 \cdot d$$

EMP používá plech s vnějším průměrem 86,2mm, který budeme taktéž uvažovat.

Následně pólová rozteč vyjde:

$$\tau = \frac{\pi d}{2p} = \frac{\pi \cdot 4,5}{2} = 7,06$$

5.2 Výpočet rozměrů drážek a vinutí

5.2.1 Výpočet drážek a vinutí pro stator

Uvažujeme stroj s trvale zapojeným pomocným vinutím, proto pro výpočet proudu hlavního vinutí musíme vycházet ze vztahu (26):

$$I_A = \frac{P}{\eta' \cos \varphi' \cdot U \cdot (1 + k_{Cu})} = \frac{900}{0,75 \cdot 230 \cdot (1 + 0,5)} = 3,48 \text{ A}$$

Kde poměr drážkového prostoru obou vinutí volím: $k_{Cu}=0,5$

Stejně tak hodnoty $\eta' \cos \varphi'$ je nutno odečítat z obr. č. 8, který platí specificky pro kondenzátorové motory, hodnota je opět aproximovaná pro požadovaný výkon.

Průřez vodiče hlavního vinutí bude:

$$S_A = \frac{I_A}{\sigma_A} = \frac{3,48}{6,35} = 0,548 \text{ mm}^2$$

A průměr vodiče potom bude:

$$d = 2 \sqrt{\frac{S_A}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{0,548}{\pi}} = 0,835 \text{ mm} \rightarrow \text{volím smaltovaný vodič o průměru 0,85mm}$$

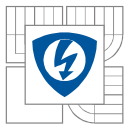
Na základě výše zvolené indukce bude indukční tok:

$$\phi = \frac{l \cdot d \cdot B_\delta \cdot 10^{-4}}{p} = \frac{15 \cdot 4,5 \cdot 0,6 \cdot 10^{-4}}{1} = 4,05 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Volím 12 statorových drážek obdobně tomu, jak je použito ve vyráběném motoru s tím, že hlavnímu vinutí bude věnován stejný počet drážek co vinutí pomocnému.

Činitel hlavního vinutí bude odpovídat:

$$\chi_A = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 3 \frac{30}{2}}{3 \sin \frac{30}{2}} = 0,91$$



Dále vypočteme počet závitů hlavního vinutí jako:

$$N_A = \frac{U \cdot (1 - \varepsilon_1)}{4,44 \cdot f \cdot \chi_A \cdot \phi} = \frac{230 \cdot (1 - 0,25)}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,91 \cdot 4,05 \cdot 10^{-3}} = 210,83 \rightarrow \text{zaokrouhlím na 210 tak, aby do}$$

každé drážky připadlo 70 vodičů.

Poměrný úbytek napětí na rozptylové impedanci statoru byl zvolen $\varepsilon_1=0,25$

Potřebná plocha drážky bez izolace pak bude:

$$S_d = \frac{2 \cdot N_A \cdot S_A'}{Q_{1A} \cdot k_d} = \frac{2 \cdot 210 \cdot 0,567}{6 \cdot 0,41} = 96,8 \text{ mm}^2$$

Kde činitel využití plochy podle tabulky č. 4 odpovídá $k_d=0,41$ pro dvoupólový stroj a průřez S_A' odpovídá zvolenému vodiči o průměru 0,85mm.

Šířka zubu statoru bude vypočtena následovně:

$$b_{z1} = \frac{B_\delta}{B_{z1}} \cdot \frac{\pi \cdot d}{0,9 \cdot Q_1} = \frac{0,6}{1,7} \cdot \frac{\pi \cdot 4,5}{0,9 \cdot 12} = 0,46 \text{ cm}$$

Kde syčení v zubech volím $B_{z1}=1,7\text{T}$

Potřebná velikost statorového jha odpovídá:

$$d_1 - d_2 = \frac{B_\delta}{B_{j1}} \cdot \frac{d}{p \cdot 0,9} = \frac{0,6}{1,5} \cdot \frac{4,5}{1 \cdot 0,9} = 2 \text{ cm}$$

Sycení ve jhu bylo zvoleno $B_{j1}=1,5\text{T}$

Celková výška drážky bude odpovídat vztahu:

$$h_{celk} = \frac{1}{2} (d_{1s} - d - (d_1 - d_2)) = \frac{1}{2} (86,2 - 45 - 20) = 10,6 \text{ mm}$$

Parametry pomocného vinutí pro stator budou vypočteny podobně jako pro vinutí hlavní. Činitel pomocného vinutí bude:

$$\chi_B = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 3 \frac{30}{2}}{3 \sin \frac{30}{2}} = 0,91$$

Dále získáme počet závitů pomocného vinutí:

$$N_B = \frac{k_1 \cdot \chi_A \cdot N_A}{\chi_B} = \frac{0,94 \cdot 0,91 \cdot 210}{0,91} = 197,4 \rightarrow \text{zaokrouhlím na 198 tak, aby do drážky připadalo}$$

66 vodičů

Kde převod k_1 (zvolen 0,94) by měl spadat do rozmezí $k_1=0,8-1,2$

Průřez vodiče pomocného vinutí vypočteme ze vztahu:

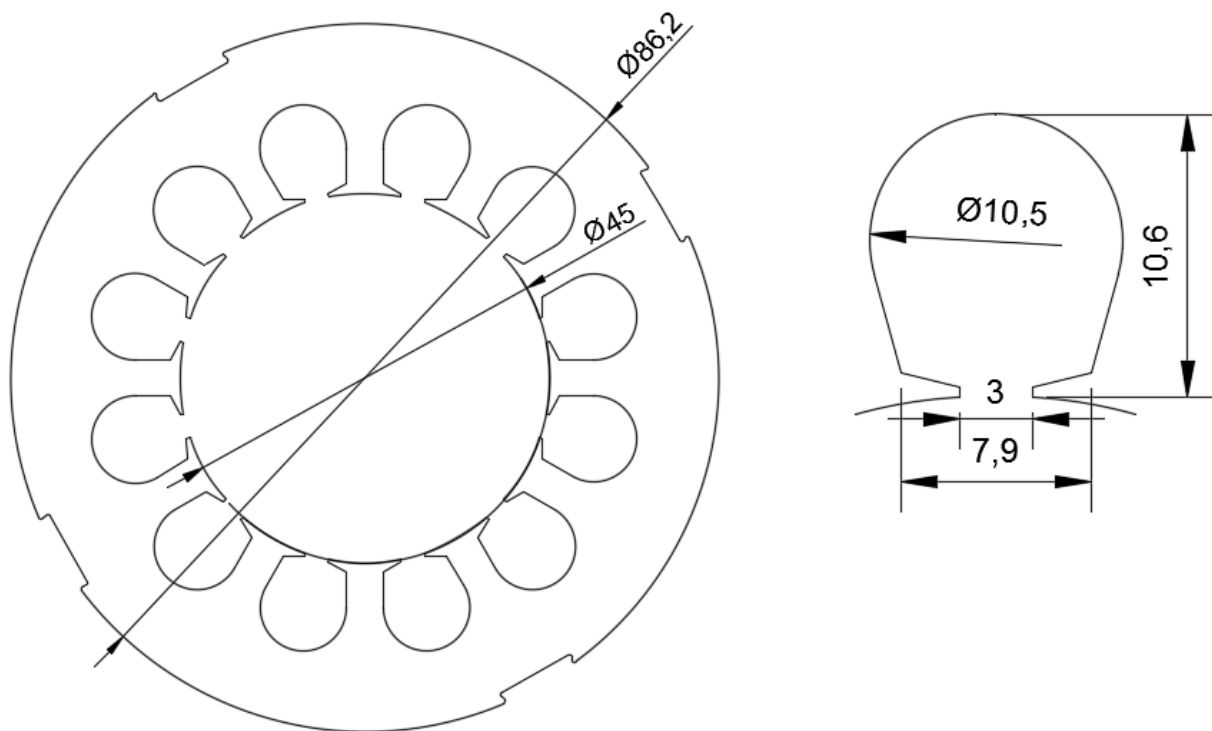
$$S'_B = \frac{k_d \cdot Q_{1B} \cdot S_d}{2N_B} = \frac{0,41 \cdot 6 \cdot 96,8}{2 \cdot 198} = 0,601 \text{ mm}^2$$

Nakonec ještě na základě předpokladu proudové hustoty v rozmezí $\sigma = 6\text{--}8,5 \text{ A/mm}^2$ zvolíme proud pomocného vinutí jako:

$$I_B = S'_B \cdot \sigma = 0,601 \cdot 7,45 = 4,5 \text{ A}$$

Čemuž odpovídá průměr vodiče:

$$d'_B = 2\sqrt{\frac{0,601}{\pi}} = 0,875 \rightarrow \text{volím tedy smaltovaný vodič o průměru } 0,9 \text{ mm}$$



Obr. č. 14 – orientační náčrt tvaru navržených plechů statoru

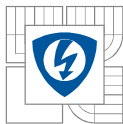
5.3 Výpočet parametrů pro rotor

Vycházíme z vrtání statoru o velikosti $d=4,5 \text{ cm}$, vzduchová mezera byla zvolena $\delta=0,4 \text{ mm}$. Počet drážek rotoru je ve vyráběném stroji volen $Q_2=17$ a jsou natočeny o 2,5 rotorové rozteče (1,76 statorové rozteče).

Šířka zubu rotoru v nejužším místě bude popsána vztahem:

$$b_{z2} = \frac{B_\delta}{B_{z2}} \cdot \frac{\pi d}{0,9 \cdot Q_2} = \frac{0,6}{1,65} \cdot \frac{\pi \cdot 4,42}{0,9 \cdot 17} = 0,33 \text{ cm}$$

Kde velikost indukce v zubu volím $B_{z2}=1,65 \text{ T}$



Činitel vinutí χ_t získáme z následujícího vztahu:

$$\chi_t = \frac{\sin \frac{\dot{s}t}{2\tau}}{\frac{\dot{s}t}{2\tau}} = \frac{\sin \frac{2\pi}{2 \cdot 7,06}}{\frac{2\pi}{2 \cdot 7,06}} = 0,967$$

Kde hodnota τ je již dříve vypočtená pólová rozteč a délku zešíkmení drážek $\dot{s}$ vypočteme ze vzorce:

$$\dot{s} = \tau_{dr} \cdot k_{ra} = \frac{\pi d_r}{Q_2} \cdot 2,5 = \frac{\pi \cdot 4,42}{17} \cdot 2,5 = 2 \text{ cm}$$

Odkud k_{ra} je již dříve zmíněné natočení drážek rotoru.

Následně vypočítáme odpor tyče klece s přírážkou na spojovací kruh:

$$R_t' = \frac{(1-s) \cdot s \cdot U^2 \cdot (1-\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 \cdot Q_2 \cdot \chi_t}{4N_A^2 \cdot \chi_A^2 \cdot (P + \Delta P_{Cui} + \Delta P)} = \frac{(1-0,075) \cdot 0,075 \cdot 230^2 \cdot (1-0,25-0,1)^2}{4 \cdot 210^2 \cdot 0,91^2 \cdot (900 + 10 + 10)} = 1,89 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Kde poměrné úbytky na impedanci ε_1 a ε_2 odhadneme $\varepsilon_1=0,25$ a $\varepsilon_2=0,1$. Dále odhadneme mechanické ztráty $\Delta P=10\text{W}$ a ztráty v mědi rotoru odbrzděné mechanicky rovněž na $\Delta P_{Cui}=10\text{W}$.

Nyní ještě za předpokladu užití dříve odhadnutých poměrných úbytků získáme souslednou složku proudu rotoru z následujícího vztahu:

$$I_{dt} = \frac{s \cdot U \cdot (1-\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \chi_t}{2 \cdot N_A \cdot \chi_A \cdot R_t'} = \frac{0,075 \cdot 230 \cdot (1-0,25-0,1) \cdot 0,967}{2 \cdot 210 \cdot 0,91 \cdot 1,89 \cdot 10^{-4}} = 150 \text{ A}$$

Dále potřebujeme dopočítat průřez rotorové tyče. Proudovou hustotu volíme o velikosti $\sigma_{dt}=6\text{A/mm}^2$.

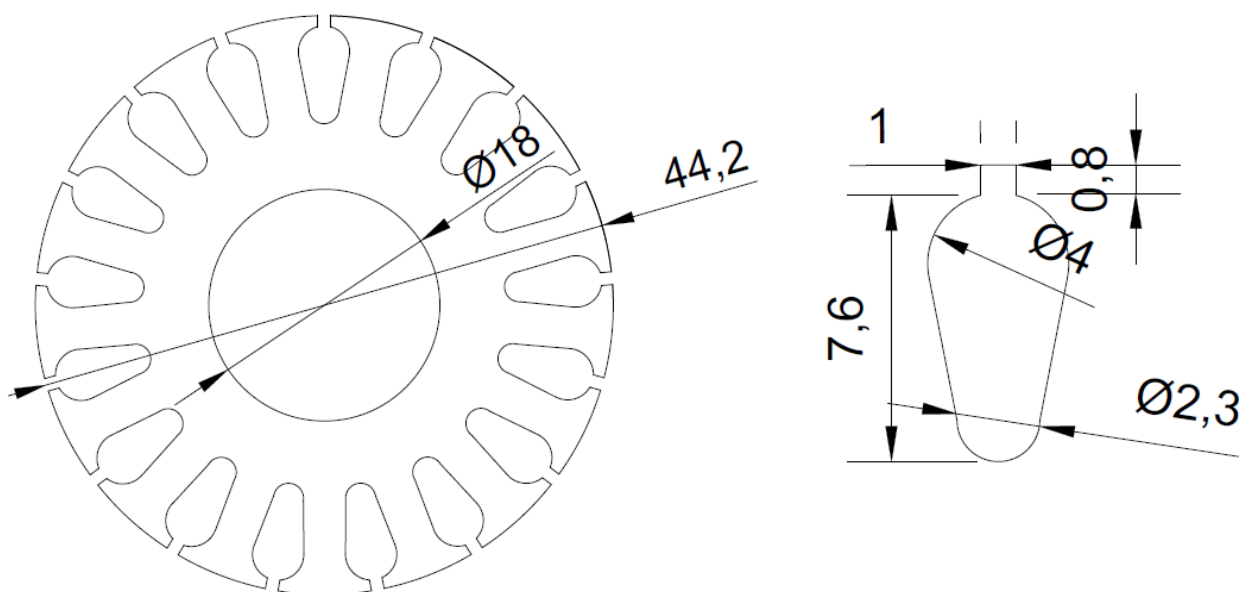
$$S_t = \frac{I_{dt}}{\sigma_{dt}} = \frac{150}{6} = 25 \text{ mm}^2$$

Následně vypočítáme velikost sousledné složky proudu v kruhu rotoru:

$$I_{dkr} = \frac{I_{dt}}{2 \sin \frac{p\pi}{Q_2}} = \frac{150}{2 \sin \frac{1\pi}{17}} = 408 \text{ A}$$

A dopočítáme průřez kruhu rotoru s tím, že proudovou hustotu volíme stejnou jako jsme zvolili pro tyč.

$$S_{kr} = \frac{I_{dkr}}{\sigma_{kr}} = \frac{408}{6} = 68 \text{ mm}^2$$



Obr. č. 15 – orientační náčrt tvaru navržených plechů pro rotor

5.4 Stanovení velikosti kondenzátoru

Pro stanovení velikosti kondenzátoru použijeme empirické vzorce zmíněné v kapitole 3.1, přičemž použijeme dvou vzorců a výsledky následně porovnáme.

Výpočty podle empirických vzorců budou:

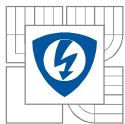
$$C = 68 \cdot P = 68 \cdot 0,9 = 61,2 \mu F$$

$$\text{a } C = 68 \cdot k \cdot P_3 = 68 \cdot 0,29 \cdot 1,8 = 35,5 \mu F$$

Na základě výsledků se nabízí použití běžně vyráběných kondenzátorů o velikosti 40 a 45 μF , přičemž volím kondenzátor o velikosti 40 μF .

Ověření návrhu stroje

Nyní je vhodné ověřit dosavadní předběžný výpočet. V praxi by bylo vhodné sestavit předběžný prototyp a prozkoušet, zde však bude proveden výpočet charakteristických parametrů odporů a reaktancí, odkud následně budeme moci dopočítat např. záběrný moment či moment zvratu. To se však neobejde bez dopočtení konstant náhradního schématu stroje.



5.5 Výpočet činného odporu

Výpočet činného odporu vinutí statoru:

$$R_A = \frac{N_A l_z}{\gamma \cdot S_A} = \frac{210 \cdot 0,5}{47 \cdot 0,548} = 4,08 \Omega$$

Na základě tabulky č. 7 volím měrnou vodivost mědi $\gamma = 47 \text{ Sm/mm}^2$ a délka závitů l_z byla získána ze vztahu:

$$l_z = 2 \cdot (l_{\text{čv}} + l) = 2 \cdot (105,8 + 150) = 51 \text{ cm}$$

A délka čela vinutí byla získána ze vzorce:

$$l_{\text{čv}} = k_{\text{č}} \cdot \frac{\pi \cdot (d + h_{\text{celk}} + h_4)}{2p} + 2B = 1,2 \cdot \frac{\pi \cdot (45 + 10,6 + 0,5)}{2} + 2 \cdot 0,01 = 105,8 \text{ mm}$$

Kde konstanta čela $k_{\text{č}}$ bývá volena v rozmezí 1,2-1,3 a B je konstanta pro vsypávané vinutí.

Činný odpor pomocného vinutí statoru bude roven:

$$R_B = \frac{R'_B}{k} = \frac{\frac{N_B \cdot l_z}{\gamma \cdot S_B}}{k} = \frac{\frac{198 \cdot 0,5}{47 \cdot 0,601}}{0,94} = \frac{3,5}{0,94} = 3,72 \Omega$$

Odpor tyče poté získáme následně:

$$R_t = \frac{l_t}{\gamma \cdot S_t} = \frac{0,15}{47 \cdot 25} = 1,27 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Kde délku tyče l_t volíme stejnou jako je délka železa.

Činný odpor kruhu rotoru bude:

$$R_{kr} = \frac{\pi d_{kr}}{\gamma \cdot S_{kr} \cdot Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,0358}{47 \cdot 68 \cdot 17} = 2,07 \cdot 10^{-4} \Omega$$

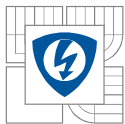
Měrná vodivost je volena stejná, průměr kruhu byl získán ze vztahu:

$$d_{kr} = d_r - h_{\text{rcelk}} = 44,2 - 8,4 = 35,8 \text{ mm}$$

Kontrola dříve vypočteného odporu tyče s přírážkou na kruh bude provedena pomocí následujícího výpočtu:

$$R'_t = R_t + \frac{R_{kr}}{2 \sin^2 \frac{p\pi}{Q_2}} = 1,27 \cdot 10^{-4} + \frac{2,07 \cdot 10^{-4}}{2 \sin^2 \frac{1\pi}{17}} = 1,58 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Výsledný odpor při kontrole vyšel nižší, než bylo původně odhadnuto, což bude mít za následek nižší skluž při provozu zahřátého stroje.



Dále zbývá dopočítat odpor rotoru přepočtený na stator:

$$R_2 = \frac{4m \cdot (N_A \cdot \chi_A)^2}{Q_2 \cdot \chi_t} \cdot R_t' = \frac{4 \cdot 2 \cdot (210 \cdot 0,91)^2}{17 \cdot 0,967^2} \cdot 1,58 \cdot 10^{-4} = 2,9 \Omega$$

5.6 Stanovení reaktancí

5.6.1 Výpočet hlavní reaktance statoru

Pro zjištění požadovaných reaktancí budeme muset začít dopočtem ekvivalentní vzduchové mezery, přičemž nejprve musíme zjistit Carterovy činitele pro drážkování statoru a rotoru:

$$k_{\delta 1} = \frac{\tau_{d1}}{\tau_{d1} + \delta - \frac{3}{4}b_1'} = \frac{11,78}{11,78 + 0,4 - 0,75 \cdot 3} = 1,29$$

$$k_{\delta 2} = \frac{\tau_{d2}}{\tau_{d2} + \delta - \frac{3}{4}b_2'} = \frac{8,17}{8,17 + 0,4 - 0,75 \cdot 1} = 1,044$$

Kde b_1 a b_2 jsou otevření drážek statoru a rotoru a τ_d jsou drážkové rozteče pro stator a rotor vypočtené následovně:

$$\tau_{d1} = \frac{\pi d}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 4,5}{12} = 11,78 \text{ cm}$$

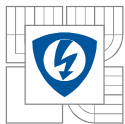
$$\tau_{d2} = \frac{\pi d_r}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 4,42}{17} = 8,17 \text{ cm}$$

Efektivní vzduchová mezera je popsána vztahem:

$$\delta' = k_{\delta 1} k_{\delta 2} \delta = 1,29 \cdot 1,044 \cdot 0,4 = 0,53 \text{ mm}$$

Nyní pro zvolené indukce v mezeře, zubech a jhu vypočítáme příslušná magnetická napětí. Magnetické napětí na vzduchové mezeře vypočteme pro pólovou dvojici následovně:

$$U_{m\delta} = 1,6 \cdot 10^4 \cdot \delta' \cdot B_\delta = 1,6 \cdot 10^4 \cdot 0,053 \cdot 0,6 = 508,8 \text{ A}$$



Pro dopočet zbylých magnetických napětí je potřeba odečíst příslušné hodnoty intenzity magnetického pole z magnetizační křivky. Na základě křivky na obr. č. 9 byly odečteny pro zvolené indukce následující hodnoty:

$$B_{z1} = 1,7T \rightarrow H_{z1} = 65 \frac{A}{cm}$$

$$B_{z2} = 1,65T \rightarrow H_{z2} = 49 \frac{A}{cm}$$

$$B_{j1} = 1,5T \rightarrow H_{j1} = 20 \frac{A}{cm}$$

$$B_{j2} = 1,5T \rightarrow H_{j2} = 20 \frac{A}{cm}$$

Magnetické napětí na zubech statoru nyní můžeme určit pomocí vztahu:

$$U_{mz1} = H_{z1} \cdot h_{celk} = 65 \cdot 1,05 = 68,25 A$$

Dále určíme magnetické napětí jha statoru pro zvolenou indukci 1,5T následovně:

$$U_{mj1} = H_{j1} \cdot d = 20 \cdot 4,5 = 90 A$$

Obdobně jako pro výpočet zubu je možno získat hodnotu magnetického napětí v zubu rotoru:

$$U_{mz2} = H_{z2} \cdot h_{r celk} = 49 \cdot 0,84 = 41,16 A$$

Magnetické napětí jha rotoru bude určeno stejným způsobem jako pro stator:

$$U_{mj2} = H_{j2} \cdot d_r = 20 \cdot 4,42 = 88,4 A$$

Nyní je možno zjistit celkové magnetické napětí součtem jednotlivých prvků:

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mz1} + U_{mz2} + U_{mj1} + U_{mj2} = 508,8 + 68,25 + 41,16 + 90 + 88,4 = 796,61 A$$

Tímto známe všechny potřebné parametry pro stanovení ekvivalentní vzduchové mezery:

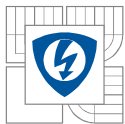
$$\delta'' = \delta' \cdot \frac{U_m}{U_{m\delta}} = 0,053 \cdot \frac{796,61}{508,8} = 0,083 mm$$

Hlavní reaktanci vypočítáme podle (59):

$$X_h = 1,6 \cdot m \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A \cdot \chi_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{\tau}{100 \cdot \delta''} \cdot \frac{l}{p} = 1,6 \cdot 2 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{210 \cdot 0,91}{100} \right)^2 \cdot \frac{7,06}{100 \cdot 0,083} \cdot \frac{15}{1} = 74,55 \Omega$$

A hlavní reaktance pro samostatnou vzduchovou mezeru bude odpovídat:

$$X_h' = X_h \frac{\delta''}{\delta'} = 74,55 \cdot \frac{0,083}{0,053} = 116,8 \Omega$$



5.6.2 Rozptylová reaktance statoru

Nejprve stanovíme součinitel diferenčního rozptylu podle (64):

$$\sigma_{A0} = \frac{\pi^2 \cdot p}{\lambda_A^2 \cdot Q_1} \cdot \left(-\frac{1}{6}q + \frac{1}{4}Q_p + \frac{1}{6q} \right) - 1 = \frac{\pi^2 \cdot 1}{0,91^2 \cdot 12} \cdot \left(-\frac{1}{6} \cdot 3 + \frac{1}{4} \cdot 6 + \frac{1}{6 \cdot 3} \right) - 1 = 0,04 \rightarrow 4\%$$

Na základě čehož zjistíme diferenční rozptyl statorového vinutí následovně:

$$X_{A0} = \sigma_{A0} \cdot X_h' = 0,04 \cdot 116,8 = 4,672 \Omega$$

Dále určíme také rozptylovou reaktanci přes hlavy zubů, ale nejprve bude nutno vypočítat vodivost:

$$\lambda_{z1} = \frac{(\tau_{d2} - 0,75 \cdot (b_1' - b_2'))^2}{6 \cdot \tau_{d2} \cdot \delta} = \frac{(0,817 - 0,75 \cdot (0,3 - 0,1))^2}{6 \cdot 0,817 \cdot 0,04} = 2,27$$

Kde uvažujeme otevření drážky statoru 3mm a otevření drážky rotoru 1mm.

Nyní můžeme dopočítat rozptylovou reaktanci přes hlavy zubů následovně:

$$X_z = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_{z1}}{q} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{210}{100} \right)^2 \cdot \frac{15}{1} \cdot \frac{2,27}{3} = 3,95 \Omega$$

Rozptyl od natočení drážek dopočítáme ze vztahu:

$$X_{Aq} = \sigma_q \cdot X_h' = 0,034 \cdot 116,8 = 3,97 \Omega$$

Kde činitel rozptylu od natočení drážek dopočítáme ze vzorce:

$$\sigma_q = 1,64 \cdot \left(\frac{p}{Q_2} \cdot \frac{\check{s}}{\tau_{d2}} \right)^2 = 1,64 \cdot \left(\frac{1}{17} \cdot \frac{20}{8,17} \right)^2 = 0,034$$

Dalším krokem bude určení vodivosti statorové drážky podle:

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + 0,66 + \frac{h_4}{b_4} = \frac{1,05}{3 \cdot 1,05} + 0,66 + \frac{0,04}{0,3} = 1,13$$

Kde příslušné rozměry h a b vychází z návrhu statorové drážky zobrazené na obr. č. 10.

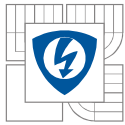
Dále je potřeba stanovit rozptylovou reaktanci statorové drážky:

$$X_{Ad} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_d}{q} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{210}{100} \right)^2 \cdot \frac{15}{1} \cdot \frac{1,13}{3} = 1,97 \Omega$$

Rozptyl přes čela vinutí bude popsán vztahem:

$$X_{Ac} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_c}{p} \cdot \lambda_c = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{210}{100} \right)^2 \cdot \frac{10,58}{1} \cdot 0,16 = 0,6 \Omega$$

Kde vodivost přes čela vinutí bývá hodnota volená v rozmezí $\lambda_c=0,11-0,16$.



Celková rozptylová reaktance statoru bude opět součtem dílčích reaktancí:

$$X_{vA} = X_{A0} + X_{Ad} + X_{Ac} + X_{Aq} = 4,672 + 1,97 + 0,6 + 3,97 = 11,21\Omega$$

5.6.3 Reaktance rotoru přepočtená na stator

Činitel diferenčního rozptylu pro rotor získáme podle:

$$\sigma_{20} = 3,33 \cdot \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2 = 3,33 \cdot \left(\frac{1}{17} \right)^2 = 0,011$$

A diferenční rozptyl rotoru poté bude:

$$X_{20} = \sigma_{20} \cdot X_h' = 0,011 \cdot 116,8 = 1,2\Omega$$

Vodivost rotorové drážky určíme pomocí vztahu:

$$\lambda_{dr} = \frac{h_1}{3b} + 0,66 + \frac{h_4}{b_4} = \frac{4,425}{3 \cdot 4} + 0,66 + \frac{0,8}{1} = 1,82$$

Dále určíme drážkovou rozptylovou reaktanci pro rotor:

$$X_{2d} = 0,316 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A \cdot \chi_A}{100 \cdot \chi_t} \right)^2 \cdot l \cdot \frac{m \cdot \lambda_d}{Q_2} = 0,316 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{210 \cdot 0,91}{100 \cdot 0,967} \right)^2 \cdot 15 \cdot \frac{2 \cdot 1,82}{17} = 1,98\Omega$$

Rozptylová reaktance rotoru od natočení drážek nabývá stejných hodnot jako rozptylová reaktance statorové drážky, tedy:

$$X_{2q} = X_{Aq} = 3,97\Omega$$

Rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator se opět určí součtem reaktancí dílčích:

$$X_{v2} = X_{20} + X_{2d} + X_{2q} = 1,2 + 1,98 + 3,97 = 7,24\Omega$$

5.7 Určení ztrát, momentů, účinnosti

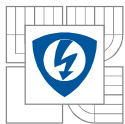
Na základě získaných hodnot je vhodné vypočítat velikosti ztrát a stanovení účinnosti, popřípadě jiných veličin a tyto hodnoty porovnat s případnými výsledky měření na prototypu stroje. V této části tedy budou stanoveny ztráty a účinnost a spočteny záběrný a jmenovitý moment.

Pro výpočet ztrát v železe je nejprve nutno určit celkovou hmotu zubů a jha statoru:

$$m_{z1} = Q_1 \cdot h_{celk} \cdot b_{z1} \cdot 0,9 \cdot l \cdot \rho_{Fe} = 12 \cdot 0,0106 \cdot 0,0046 \cdot 0,9 \cdot 0,15 \cdot 7700 = 0,608\text{kg}$$

$$m_{j1} = \pi \cdot d_{1s} \cdot h_{jha} \cdot 0,9 \cdot l \cdot \rho_{Fe} = \pi \cdot 0,0862 \cdot 0,02 \cdot 0,9 \cdot 0,15 \cdot 7700 = 5,63\text{kg}$$

Kde uvažujeme hustotu železa $\rho_{Fe}=7700\text{kg/m}^3$



Při počítání ztrát v železe je podle [1] nutno snížit hodnoty indukce celého statoru, což je zapříčiněno zmenšením sycení v ose pomocného vinutí vlivem zpětné složky. Toto snížení je přibližně o 5% původní hodnoty:

$$B'_{j1} = 0,95 \cdot B_{j1} = 0,95 \cdot 1,5 = 1,425T \rightarrow \Delta p_{1,0} = 5,7 \frac{W}{kg}$$

$$B'_{z1} = 0,95 \cdot B_{z1} = 0,95 \cdot 1,7 = 1,615T \rightarrow \Delta p_{1,0} = 7,6 \frac{W}{kg}$$

Na základě [15] byly odečteny hodnoty měrných ztrát pro zadané indukce vztažené k běžně užívanému dynamovému plechu M800-50A.

Ztráty v železe tedy budou:

$$\Delta P_{Fe} = (1-3) \cdot (\Delta p_{1,0} \cdot m_z + \Delta p_{1,0} \cdot m_{j1}) = 1,4 \cdot (7,6 \cdot 0,608 + 5,7 \cdot 5,63) = 51,4W$$

Ztráty v mědi statoru určíme součtem ztrát v hlavním a pomocném vinutí, kde ztráty hlavního vinutí budou:

$$\Delta P_{CuA} = R_A \cdot I_A^2 = 4,08 \cdot 3,48^2 = 49,41W$$

A ztráty vinutí pomocného popíšeme:

$$\Delta P_{CuB} = R_B \cdot I_B^2 = 3,72 \cdot 4,5^2 = 75,33W$$

Magnetizační proud je přibližně roven proudu naprázdno a dá se stanovit ze vztahu:

$$I_\mu = I_0 = \frac{U_m \cdot p}{1,8 \cdot \chi_A \cdot N_A} = \frac{796,61 \cdot 1}{1,8 \cdot 0,91 \cdot 210} = 5,21A$$

Ztráty v mědi rotoru od zpětné složky naprázdno budou popsány následovně:

$$\Delta P_{Cu0z} \cong \frac{1}{2} \cdot R_2 I_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,9 \cdot 5,21^2 = 39,36W$$

Dále stanovíme ztráty v mědi rotoru od zpětné složky:

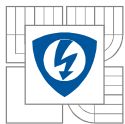
$$\Delta P_{Cuz} \cong \Delta P_{Cu0z} \cdot \left(\frac{I_a}{I_0} \right)^2 = 39,36 \cdot \left(\frac{3,48}{5,21} \right)^2 = 17,56W$$

Ztráty v mědi rotoru od sousledné složky je vyjádřeno následujícím vztahem:

$$\Delta P_{Cus} \cong \frac{s}{1-s} \cdot \left(P + 0,012 P + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{Cuz} \right) = \frac{0,075}{1-0,075} \cdot \left(900 + 0,012 \cdot 900 + \frac{1}{2} \cdot 17,56 \right) = 74,56W$$

Mechanické ztráty byly odhadovány přibližně na 10W a dodatečné ztráty se odhadují na 0,5% celkového výkonu:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P = 0,005 \cdot 900 = 4,5W$$



Příkon motoru vyjádříme vztahem:

$$\begin{aligned} P_1 &= P + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{CuA} + \Delta P_{CuB} + \Delta P_{Cuz} + \Delta P_{Cus} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d = \\ &= 900 + 51,4 + 49,41 + 75,33 + 17,56 + 74,56 + 10 + 4,5 = 1182,56W \end{aligned}$$

Nyní již můžeme dopočítat účinnost:

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{900}{1182,86} = 0,761$$

Jmenovitý moment stroje se dá dopočítat z následujícího vztahu:

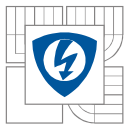
$$M_n = \frac{U^2 \cdot p \cdot \frac{R_2}{s}}{2\pi f \left[\left(R_A + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{va} + X_{v2})^2 \right]} = \frac{230^2 \cdot 1 \cdot \frac{2,9}{0,075}}{2\pi \cdot 50 \cdot \left[\left(4,08 + \frac{2,9}{0,075} \right)^2 + (11,21 + 7,24)^2 \right]} = 3,01Nm$$

Dále je možno určit záběrný moment:

$$M_z = \frac{U^2 \cdot p \cdot R_2}{2\pi f \left[(R_A + R_2)^2 + (X_{va} + X_{v2})^2 \right]} = \frac{230^2 \cdot 1 \cdot 2,9}{2\pi \cdot 50 \cdot \left[(4,08 + 2,9)^2 + (11,21 + 7,24)^2 \right]} = 1,26Nm$$

A zjistit záběrný proud, který můžeme získat ze vztahu:

$$I_z = \frac{U}{\sqrt{(R_A + R_2)^2 + (X_{va} + X_{v2})^2}} = \frac{230}{\sqrt{(4,08 + 2,9)^2 + (11,21 + 7,24)^2}} = 11,66A$$



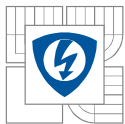
5.8 Zhodnocení výsledků

V této části budou porovnány výsledky dosažené v návrhu asynchronního motoru v kapitole 4, které budou následně porovnány s údaji dodávanými firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna.

Parametr	Označení	Počítaný návrh	Udáváno firmou	Jednotka
Vrtání statoru	d	45	45	mm
Délka železa statoru	l	150	150	mm
Vnější průměr	d _{1s}	86,2	86,2	mm
Počet drážek hlavního vinutí statoru	Q _{1A}	6	6	-
Počet drážek pomocného vinutí statoru	Q _{1B}	6	6	-
Hloubka drážky statoru	h _{celk}	10,6	11,2	mm
Vzduchová mezera	δ	0,4	0,4	mm
Počet rotorových drážek	Q2	17	17	-
Jmenovitý moment motoru	M _n	3,01	3,09	Nm
Záběrný moment	M _z	1,26	1,75	Nm
Záběrný proud	I _z	11,66	11,97	A
Ztráty v železe	ΔP _{Fe}	51,4	50	W
Ztráty vinutí statoru	ΔP _{Cu}	124,74	133	W
Ztráty mechanické	ΔP _{mech}	10	10	W
Ztráty dodatečné	ΔP _d	4,5	4,5	W
Celkové ztráty	ΔP	282,86	274,19	W
Příkon	P ₁	1182,86	1174,19	W
Účinnost motoru	η	76,1	76,61	%
Skluz	s	7,5	7,5	%
Kapacita	C	40	40	μF

Tabulka č. 9 – porovnání vypočtených parametrů a hodnot udávaných firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna

Uvedená tabulka zobrazuje hodnoty dosažené výpočtem asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem a zároveň obsahuje hodnoty daných veličin udávané firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna.



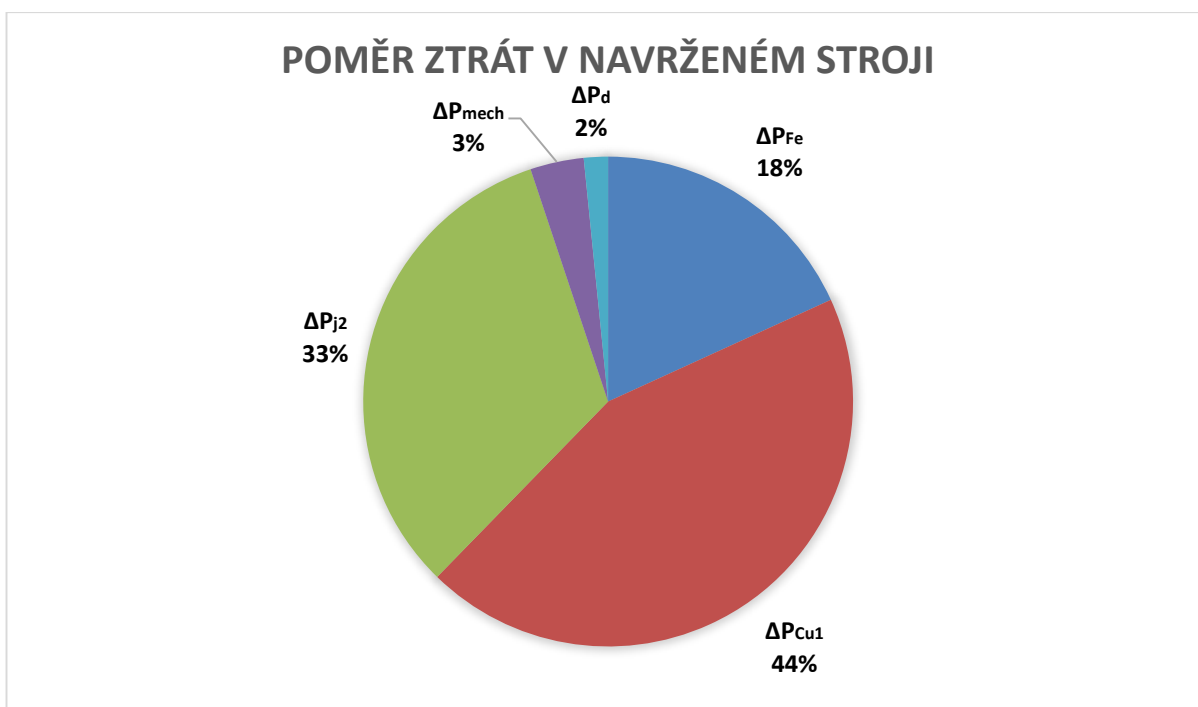
Z výsledků v tabulce je patrné, že vypočtené hodnoty a parametry udávané firmou, se příliš neliší. U některých parametrů se však objevuje poněkud vyšší odchylka, což je způsobeno hned několika faktory. Samotný prvotní postup návrhu umožňuje při určování veličin volit z poměrně širokého spektra hodnot, což ve výsledku na konci návrhu vede k možným znatelným odchylkám a nepřesnostem. Další možnou příčinou vzniklých odchylek je fakt, že při návrhu je několikrát zmíněno doporučení volit některé parametry z tabulkových hodnot na základě zvoleného zadání – to však v tomto případě návrhu v mnohých ohledech nebylo možné a byly voleny hodnoty podle reálného modelu, které se s tabulkou neshodují. Pokud by však bylo zvoleno hodnot podle tabulek, mělo by to za výsledek fakt, že navržený motor by byl naprosto nesrovnatelný se strojem, podle něhož se počítá v zadání návrhu. V neposlední řadě také mohou vzniklé odchylky výsledků být způsobeny částečným zaokrouhlováním v průběhu celého postupu návrhu stroje a zjednodušování některých výpočtů za idealizované.

Podle parametrů zadaného stroje tedy musely být voleny stejné hodnoty v oblasti počtu drážek jak pro stator, tak pro rotor. Pro dvoupólový stroj je udáváno v [1], že je vhodné volit počet drážek statoru buďto 18 nebo 24 drážek, pro rotor je potom vhodné využít 18 či 30 natočených drážek. EMP však v tomto ohledu přihlíží k ostatním již funkčním navrženým a běžně vyráběným strojům a může při volbě drážek přihlížet právě k plechům již používaným. Natočení drážek a velikost vzduchové mezery byly taktéž voleny na základě reálného stroje o těchto parametrech. Posledním parametrem, kde se návrh i reálný motor odklonil od tabulkové hodnoty, bylo při volbě kondenzátoru – Dr. Štěpina v [1] udává, že pro motory o výkonu 750-1000W se volí trvale připojený kondenzátor o kapacitě 25-35 μ F. Tyto hodnoty však neodpovídají vypočteným velikostem potřebné kapacity podle dvou různých používaných empirických vzorců, kde výsledná kapacita vycházela v rozmezí 37-61 μ F, což vedlo k volbě běžně vyráběného kondenzátoru o velikosti 40 a 45 μ F, přičemž byl zvolen kondenzátor stejný, jako používá reálný motor.

I přes všechny zmíněné faktory ovlivňující jak konečný výsledek, tak jeho přesnost, bylo dosaženo výsledků, které se od reálných liší pouze minimálními odchylkami. Na základě návrhu bylo dosaženo účinnosti 76,1%, tedy přibližně o 0,5% nižší, než má reálný stroj. To mohlo být způsobeno nestejnou volbou výšky drážky, což ve finále také vedlo k rozdílům v rozložení ztrát vlivem faktu, že návrh vedl na výpočet nižších hodnot některých činných odporů, což mělo taktéž vliv na záběrný moment a výsledný reálný skluz, jenž by navrhovaný stroj měl. Navržený stroj má oproti reálnému vypočteny nižší ztráty zejména v hlavním vinutí statoru, naopak vyšší jsou ztráty rotorové.

6 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ ZTRÁT NAVRŽENÉHO STROJE

Na základě hodnot návrhu stroje z kapitoly č. 3 bude v této části proveden posudek týkající se možného zlepšení energetických parametrů a případné zvolené změny budou ověřeny výpočtem. Prvotním krokem návrhu bude shrnutí procentuálního zastoupení ztrát v navrženém stroji, na základě kterého budou zvoleny možnosti optimalizace.

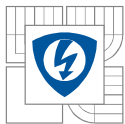


Obr. č. 16: Poměr ztrát v navrženém stroji

Na základě výše uvedeného obrázku je patrné, že k nejvyšším ztrátám dochází zejména ve vinutí statoru, dále též v rotorovém vinutí, a třetích nejvyšších ztrát dosahují ztráty v železe. Z toho důvodu má největší smysl zaměřit se právě na tyto ztráty a je vhodné se je pokusit co nejvíce snížit.

6.1 Analýza ztrát vinutí statoru

Ztráty ve vinutí bývají redukovány několika způsoby, přičemž nejběžnější bývá buďto lepší využití drážek nebo samotná změna drážky za účelem možného zvýšení plochy drážky, která by byla zaplněna vodiči vinutí. Zvětšení plochy drážky by však také zasáhlo do vlastností magnetického obvodu a v neposlední řadě změna velikosti drážky probíhá zároveň s úpravou magnetického obvodu formou prodloužení stroje. Reálný stroj však naznačuje, že by již touto úpravou mohl být podstoupen, což je odhadnuto na základě rozdílu průměru vrtání statoru a délce železa. Literatura udává, že tyto hodnoty se vzájemně volí přibližně rovny, kdežto analyzovaný motor má délku železa již více než třikrát větší, než je průměr vrtání statoru. Na základě těchto faktů návrhy snížení ztrát těmito způsoby vynecháme, protože se snažíme udržet základní rozměry stroje.



Jedinou další vhodnou možností snížení ztrát vinutí je tedy lepší využití drážky. Starší literatura v tomto ohledu může být již poněkud nepřesná, protože uvažuje pro dvoupólový stroj činitel plnění mědi $k_{pCu}=0,41$, kdežto v dnešní době je za určitých podmínek možno dosáhnout hodnoty plnění až 0,7. Vyšší činitel plnění je tedy proveditelný, ale čím vyšší je tento činitel, tím vyšší je zároveň obtížnost uložení vodičů do drážek, k čemuž je nutno při návrhu taktéž přihlížet.

6.2 Ztráty rotorového vinutí

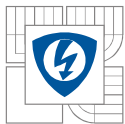
Ztráty v rotoru by se daly redukovat, jak již bylo dříve zmíněno, použitím materiálů s nižší rezistivitou. To se v praxi řeší náhradou hliníkových tyčí za měděné, ale celá úprava je ve všech směrech obtížná a nákladná. Návrh této úpravy navíc vyžaduje specifický přístup při návrhu a v neposlední řadě je nutno brát ohled na náročnost úpravy z hlediska obtížnosti výroby způsobené obtížnějším tavením mědi a ekonomičností úpravy. EMP s.r.o. běžně odlévá svoje vlastní rotory, výhradně však hliníkové právě z důvodu problematičnosti odlévání měděných rotorových tyčí. Na základě zmíněných skutečností je patrné, že zvýšení účinnosti tímto způsobem by nebylo úplně vhodné.

6.3 Redukce ztrát v železe

V tomto ohledu je možno zredukovat ztráty buďto prodloužením magnetického obvodu, nebo použitím kvalitnějšího plechu s nižším ztrátovým číslem. Pokud se chceme držet původního zadání a zanechat zadané rozměry, není tato možnost příliš příhodná. Možné je však využití lepšího plechu pro magnetický obvod. Použitý je totiž plech M800-50A s poměrně velkým ztrátovým číslem při daném sycení. Vhodné by tedy bylo použití kvalitnějších a tenčích plechů.

6.4 Snížení mechanických ztrát

Snížování mechanických ztrát by v tomto případě taktéž bylo poměrně obtížné. Běžným postupem bývá analýza použitého ventilátoru a jeho případné vylepšení, či úplné odstranění, pokud je tento krok možný z hlediska dostatečného chlazení stroje. Zadaný stroj slouží pro pohon čerpadla a je proveden již bez ventilátoru, tudíž tato možnost redukce ztrát není možná. Jediným možným východiskem je použití kvalitnějších kuličkových ložisek. Nabízí se výměna ložisek za E2 energeticky úsporná, která slibují snížení tření až o 30-50% oproti klasickým levnějším ložiskům. Toto porovnání však nebude možno objektivně určit z důvodu nedostatečných informací o stávajících ložiskách.



6.5 Navržení úpravy stroje

Na základě předchozí analýzy bylo rozhodnuto, že snížení ztrát stroje bude dosaženo dvěma způsoby – lepším využitím drážky a použitím kvalitnějších plechů.

6.5.1 Úprava činitele plnění

Vinutí do statorových drážek bývá často vsypáváno, ale je možné, že za pomoci stroje by bylo možno drážku využít z větší části, což by vedlo k možnosti volby vodiče o větším průřezu a tím i snížení ztrát ve vinutí. Dalším faktorem, který by mohl příznivě ovlivnit využitelnost drážky je možná volba tenčí izolace. Tloušťka izolace se totiž běžně pohybuje v rozmezí 0,1-0,75mm. Využití izolace o menší tloušťce by tedy taktéž vedlo k lepšímu zaplnění drážky, ale je zde nutno také brát ohled na to, aby izolace o nové tloušťce zachovávala všechny potřebné vlastnosti té původní.

Jak již bylo zmíněno dříve, v dnešní době je možnost využít drážku natolik, že činitel plnění naroste až na hodnotu přibližně 0,7. To však také znamená, že plnění drážky by bylo extrémně obtížné. Teoretická hodnota navýšení činitele plnění tedy bude volena poněkud nižší, a to $k_{pCu2}=0,55$.

Stávající hodnoty:

hlavní fáze – smaltovaný vodič o průměru 0,85mm

70 vodičů v drážce

pomocná fáze – vodič s průměrem 0,9mm

66 vodičů v drážce

Návrh nového průměru vodiče bude proveden podle vztahu:

$$d_{vA2} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{dr} \cdot k_{pCu2}}{N_{drA} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 96,8 \cdot 0,55}{70 \cdot \pi}} = 0,984 \text{ mm}$$

Bude volen nový smaltovaný vodič o průměru 1mm.

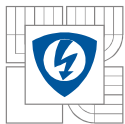
Nový průřez vodiče stanovíme následovně:

$$S_{2A} = \pi \cdot \left(\frac{d_{vA2}}{2} \right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^2 = 0,785 \text{ mm}^2$$

A nový odpor hlavního vinutí bude roven:

$$R_{A2} = \frac{N_A \cdot l_z}{\gamma \cdot S_{A2}} = \frac{210 \cdot 0,5}{47 \cdot 0,785} = 2,85 \Omega$$

Přičemž opět předpokládáme oteplení o 50°C.



Obdobně budeme postupovat pro fázi pomocnou:

$$d_{vB2} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{dr} \cdot k_{pCu2}}{N_{drB} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 96,8 \cdot 0,55}{66 \cdot \pi}} = 1,01 \text{ mm}$$

Kde volíme smaltovaný vodič s průměrem 1,05 mm.

Průřez nového vodiče bude:

$$S_{2B} = \pi \left(\frac{d_{vB2}}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{1,05}{2} \right)^2 = 0,865 \text{ mm}^2$$

Nový odpor pomocného vinutí bude:

$$R_{B2} = \frac{N_B \cdot l_z}{\gamma \cdot S_{2B}} = \frac{198 \cdot 0,5}{47 \cdot 0,865} = 2,43 \Omega$$

Výsledné ztráty ve vinutí statoru tedy budou rovny:

$$\Delta P_{Cu1} = R_{2A} \cdot I_A^2 + R_{2B} \cdot I_B^2 = 2,85 \cdot 3,48^2 + 2,43 \cdot 4,5^2 = 83,7 \text{ W}$$

Při realizaci navrženého lepšího plnění drážky vyplývá, že pokud by se tato úprava dala realizovat, znamenalo by to výsledné snížení ztrát na 83,7 W z původních 125 W při uvažovaném oteplení 50°C. To znamená snížení ztrát vinutí přibližně o 33% použitím vodiče o větším průřezu.

6.6 Změna použitého dynamového plechu

Druhým navrženým způsobem zvýšení účinnosti motoru byla zvolena záměna dynamového plechu za jiný o nižších měrných ztrátách. Stávající plech M800-50A bude tedy nahrazen dynamovým plechem o nižších měrných ztrátách a menší tloušťce. Zvolen byl náhradní plech M330-35A.

Odečtení nových měrných ztrát na základě daného sycení:

$$B'_{j1} = 0,95 \cdot B_{j1} = 0,95 \cdot 1,5 = 1,425 \text{ T} \rightarrow \Delta p_{1,0} = 2,54 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

$$B'_{z1} = 0,95 \cdot B_{z1} = 0,95 \cdot 1,7 = 1,615 \text{ T} \rightarrow \Delta p_{1,0} = 3,77 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

Kde opět uvažujeme hustotu železa $\rho_{Fe} = 7700 \text{ kg/m}^3$ a stejnou hmotu železa s jakou jsme počítali při návrhu. Nové ztráty v železe následně budou odpovídat:

$$\Delta P_{Fe} = (1 - 3) \cdot (\Delta p_{1,0} \cdot m_z + \Delta p_{1,0} \cdot m_{j1}) = 1,4 \cdot (3,77 \cdot 0,608 + 2,54 \cdot 5,63) = 23,23 \text{ W}$$

Již z výsledku je patrné, že s použitím kvalitnějšího a tenčího plechu dovedeme výrazně redukovat ztráty, v tomto případě dokonce o více než polovinu původní hodnoty. Z tohoto faktu plyne, že pokud uvažujeme nad zvýšením účinnosti, má smysl ihned zauvažovat nad možným využitím kvalitnějšího plechu.

6.7 Porovnání navržených úprav

Na základě navržených vylepšení došlo v obou případech ke snížení ztrát vedoucí u obou typů úprav ke zlepšení účinnosti přibližně o 2%. Provedení obou navržených úprav nakonec vede k vylepšení účinnosti stroje o 4%. Přehledné srovnání celkových ztrát a výsledné účinnosti je zobrazeno v následující tabulce:

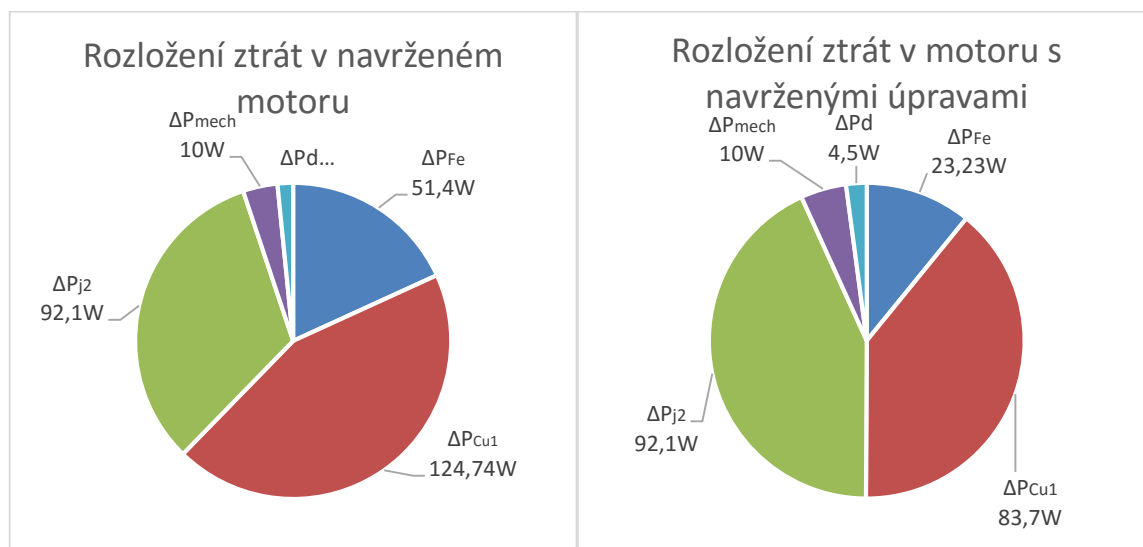
	$\Sigma \Delta P [W]$	$P_1 [W]$	$\eta [\%]$
Původní návrh	282,86	1182,86	76,1
Větší průřez vodiče	241,56	1141,56	78,8
Kvalitnější dynamové plechy	254,69	1154,69	77,9
Obě úpravy zároveň	213,40	1113,4	80,8

Tabulka č. 10: Porovnání výsledků navrhovaných změn s původním strojem.

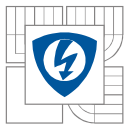
První návrh se věnoval snížení ztrát s největším podílem na celkových ztrátách – Jouleových ztrátách ve vinutí statoru, a to jak v hlavní, tak v pomocné fázi. Zvýšení účinnosti v tomto ohledu bylo provedeno lepším využitím drážky, což umožnilo použití vodiče s větším průřezem. Tato změna vedla na snížení ztrát ve vinutí statoru o 41,3W tedy o přibližně 30% původní hodnoty. Změnou jsme dosáhli navýšení účinnosti o 2,7%.

Druhým návrhem bylo nahrazení použitého dynamového plechu M800-50A za tenčí plech s nižším ztrátovým číslem, jmenovitě potom M330-35A. Zmíněná úprava výrazně snížila předpokládané ztráty v železe z původních 51,4W na nových 23,23W, došlo tedy o snížení ztrát v železe přibližně o 54% původní hodnoty. Navržená změna vedla ke zvýšení účinnosti stroje o 1,8%.

Použitím obou úprav současně by se nám podařilo redukovat jak ztráty ve statorovém vinutí, tak ztráty v magnetickém obvodu a v návaznosti na to by došlo ke snížení celkových ztrát téměř o 25%, což ve výsledku vylepší účinnost o 4,7%.

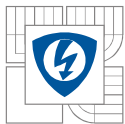


Obr. č. 17: Rozložení ztrát v navrženém motoru a v motoru s úpravami



Ze zobrazení rozložení ztrát v navrženém motoru a stroji se zvolenými úpravami pro snížení ztrát lze pozorovat, že po provedení změn se výrazně sníží ztráty v železe a dominantními zůstanou ztráty vinutí statoru, které se předpokládaly vysoké. Ztráty v rotoru, které neprošly žádnou úpravou zůstávají na původní hodnotě.

Na základě předešlých poznatků by nyní následovala výroba prototypu s navrhovanými změnami. Bylo by provedeno měření a přesné stanovení ztrát a účinnosti. Konečným krokem by bylo finální porovnání navržené verze také z hlediska ekonomického, a pokud by se úprava s navýšenou účinností jevila jako vhodnější pro dané požadavky, mohlo by se diskutovat o případném zavedení nového motoru do klasické výroby.



7 ZÁVĚR

Tématem bakalářské práce byla studie asynchronních strojů týkající se zejména motorů malého výkonu se zaměřením na jejich provedení, návrh a následnou studii přítomných významných ztrát ve spojitosti s požadavky na získání vyšší účinnosti.

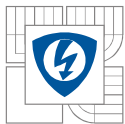
V bakalářské práci byla na základě zadání prostudována dostupná literatura s tematikou asynchronních motorů. Byl sestaven teoretický úvod tematiky asynchronních strojů zahrnující princip funkce s obecným popisem indukce napětí a magnetického obvodu. Dále byl graficky zpracován náhradní obvodový model stroje a následně grafické znázornění energetické bilance v motoru se zobrazením přítomných ztrát. V návaznosti na zadání bylo pojednáno o charakteristikách naprázdno a nakrátko, stejně tak jako o charakteristice momentové, která byla uvedena pro trojfázové i jednofázové stroje. Další část pojednávala o konstrukčním uspořádání včetně popisu jednotlivých částí, na kterou navazoval rozbor možných provedení strojů jak trojfázových tak jednofázových včetně popisu jejich význačnosti a principu funkce.

Poznatky z literatury byly využity k sestavení postupu pro návrh jednofázového asynchronního motoru o malém výkonu, zaměřeného zejména na jednofázový motor s trvale připojeným kondenzátorem. Návrh byl sestaven na základě běžně užívaných postupů. Byla zmíněna volba a stanovování kapacity kondenzátoru. Další část se věnovala stanovení hlavních rozměrů navrhovaného stroje. Poté se přešlo k návrhu drážek a vinutí. Dalším krokem pak byl návrh odporů a reaktancí. Nakonec byly zmíněny vzorce pro výpočet ztrát stroje a následné určení účinnosti.

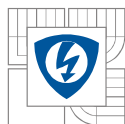
V následující části byla prostudována problematika účinnosti asynchronního stroje a rozbor nejvýznamnějších typů ztrát u běžně používaných strojů. Na základě toho byly zmíněny možnosti redukce ztrát u nejvýznamnějších druhů ztrát ve formě úprav konstrukce a využití materiálu stroje se zohledněním kladů a záporů takto vzniklých úprav.

Pátá část se věnovala samotnému příkladu návrhu jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem a výkonu 900W. Návrh probíhal na základě parametrů reálného stroje, který se vyrábí ve firmě EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Samotný výpočet tedy vycházel z některých parametrů tohoto stroje, aby se dala porovnat přesnost výpočtu výsledného návrhu. Návrh samotný se řídil zejména podle literatury [1], a byl proveden výpočet navazující na teoretický postup popsáný v kapitole č. 3. Výsledky navrženého a vypočteného stroje se ve většině případů lišily pouze minimálně, takže by se dalo říci, že navržený motor by měl přibližně stejné vlastnosti jako reálný vyráběný stroj, na základě jehož byl návrh sestaven. Nutno však podotknout, že výsledky nebyly zcela přesné, což bylo zapříčiněno zejména tím, že návrh je cílen jako předběžný a velká část hodnot a parametrů se volí z různých rozsahů, což zanáší do samotného výpočtu různé odchylky. Další nepřesnosti mohly být zapříčiněny zaokrouhlováním při výpočtech a užití některých zidealizovaných výpočtů v postupu.

Šestá a poslední část se věnovala analýze ztrát navrženého motoru a posouzení možnosti zlepšení energetických parametrů. Nejprve byly teoreticky probrány jednotlivé možnosti úprav pro snížení jednotlivých ztrát. Na základě požadavku pro zachování rozměrů a drážek bylo upuštěno od úprav délky motoru pro snížení ztrát v železe a také byla eliminována možnost snížení ztrát ve vinutí zvětšením drážky.



Zároveň nebylo možno brát v potaz redukci ztrát v rotoru stroje použitím měděných tyčí z důvodu obtížnosti a neekonomičnosti provedení. Teoreticky bylo pojednáno o možnosti redukce ztrát mechanických použitím lepších ložisek. Hlavním zaměřením však byla redukce ztrát ve statorovém vinutí a v magnetickém obvodu, čehož bylo docíleno volbou lepšího dynamového plechu s menší tloušťkou a ztrátovým číslem. Uvažovaný plech M800-50A byl v tomto ohledu zaměněn za jiný vyráběný dynamový plech, a to M330-35A. Redukce ztrát ve statorovém vinutí byla zvolena použitím vodiče o větším průřezu, čehož bylo dosaženo za předpokladu zvýšení činitele plnění s ohledem na rostoucí obtížnost vkládání vodičů do drážek, což je závislé právě na činiteli plnění. Pro obě zvolené metody byl proveden orientační výpočet a výsledky byly následně porovnány. Úprava magnetického obvodu by vedla ke zlepšení účinnosti o 1,8% a změna průřezu vodiče statorového vinutí by vylepšila účinnost stroje 2,7%. S uvažováním aplikace obou navrhovaných úprav bychom dosáhli navýšení účinnosti z původních vypočtených 76,1% na 80,8%, což naznačuje navýšení účinnosti motoru o 4,7%. Výsledky jsou však pouze v teoretické rovině a pro přesnost by bylo vhodné je ověřit na praktickém modelu. Součástí bodu zadání také bylo, že navržené změny by podle možností mohly být ověřeny měřením na vzorku motoru. Prototyp však bohužel nebylo možné za daný čas zrealizovat.



LITERATURA

- [1] JAROSLAV ŠTĚPINA *Jednofázové indukční motory*, Praha 1957
- [2] KNOTEK, Jaroslav. *Navíjení a převíjení malých elektrických strojů točivých*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990, 536 s. Praktické elektrotechnické příručky.
- [3] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 1*. 3. oprav. a dopl. vyd. Praha : Academica, 1980. 388 s.
- [4] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2*. 2. oprav. a dopl. vyd. Praha : Academica, 1982. 732 s.
- [5] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Vydání 1. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1958. 716 s.
- [6] KOPYLOV, I. P. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685s.
- [7] Asynchronní stroje. *Průmyslová škola Liberec* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/indukcni_motor/asynchr_motor_teorie.pdf
- [8] HALFAR, T. *Zlepšení energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 81 s.
- [9] Třídy účinnosti elektrických motorů. *SIEMENS Industry* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://www.industry.siemens.com/drives/global/en/motor/low-voltage-motor/efficiency-standards/pages/line-motors.aspx>
- [10] Nové třídy účinnosti asynchronních motorů. *Odborné časopisy* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43677.pdf>
- [11] Asynchronní stroje. *O energetice* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/asynchronni-stroje-konstrukce-princip-funkce-a-rizeni/>
- [12] ONDRŮŠEK, Čestmir. *Elektrické stroje*. VUT, 199?. Skriptum. VUT.
- [13] The invention of the electric motor: Karlsruhe Institute of Technology. *KIT* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>
- [14] Cogent Electrical Steel. *Cogent-power.com* [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m800-50a.pdf>
- [15] Multikriteriální optimalizace asynchronního stroje. *Elektrorevue* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02055/index.html#co>
- [16] Cogent Electrical Steel. *Cogent-power.com* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m330-35a.pdf>