

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## SNÍŽENÍ ZTRÁT JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

LOSSES REDUCTION OF SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dávid Vaško

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO 2021



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Dávid Vaško

**ID:** 209262

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

## NÁZEV TÉMATU:

### **Snížení ztrát jednofázového asynchronního motoru**

#### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s problematikou jednofázových asynchronních motorů a s výpočtem jejich parametrů.
2. Provedte výpočet zadaného jednofázového motoru v programu Ansoft/RMxpert, výsledky ověřte pomocí MKP modelu v programu Ansys/Maxwell a srovnajte s dodanými skutečnými parametry stroje
3. Navrhněte úpravy zadaného motoru a analyzujte jejich vliv na jednotlivé druhy ztrát, výsledky vzájemně srovnajte.

#### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] BOLDEA, Ion and NASAR, Syed A. The Induction Machine Handbook. Boca Raton: CRC Press LLC, 2002. 949 p. ISBN 0-8493-0004-5.
- [2] ŠTĚPINA, Jaroslav. Jednofázové indukční motory. 1. vyd. Praha: SNTL, 1957. 200 s.
- BRÁZDA, Miroslav a STAŇA, Rudolf. Výpočet asynchronního motoru. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973, 222 s.
- [3] PETROV, Georgij N. Elektrické stroje 2. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [4] KOPYLOV, I. P. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988. 685 s.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 27.5.2021

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### **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**

Bakalárska práca *Snížení ztrát jednofázového asynchronního motoru* sa zaoberá problematikou zvýšenia účinnosti jednofázového asynchrónneho motoru JMO90-4S-90 od firmy EMP s.r.o. Slavkov u Brna. V prvej časti práce je preberaná teória asynchrónnych motorov, najmä jednofázových a rozbor strát v asynchrónnych strojoch. V druhej časti sú predstavené riešenia motorov a spôsoby použité na zníženie strát. V tretej časti sa práca zaoberá výpočtom určitých parametrov, vytváraníu modelov v programe RMXprt a ich úprave na zlepšenie účinnosti. V poslednej, štvrtej, časti je stručne rozobrané vytváranie modelov v programe Ansys Maxwell, porovnanie výsledkov z programov Maxwell a RMXprt s meraním pre motor JMO90-4S-90 a porovnanie výsledkov Maxwell a RMXprt pre ostatné motory.

## **Kľúčové slová**

Jednofázový asynchrónny motor, účinnosť, výkon, straty, RMXprt, Ansys Maxwell, vinutie, točivé magnetické pole

## **Abstract**

Bachelor thesis *Losses reduction of single-phase induction motor* deals with issues of increasing the efficiency of single-phase induction motor JMO90-4S-90 from EMP s.r.o. Slavkov near Brno. The first part deals with the theory of induction motors, especially single-phase motors and analysis of losses in induction machines. The second part deals with the introduction of motor solutions and methods used for loss reduction. In the third part, the thesis deals with the calculating selected parameters, the design of motors in RMXprt, and their modification for improving efficiency. The fourth part deals briefly with the design of motors in Ansys Maxwell, comparison of results obtained from Maxwell and RMXprt with the results from measurement for motor JMO90-4S-90 and comparison of results from Maxwell and RMXprt for other motor solutions.

## **Keywords**

Single-phase induction motor, efficiency, power, losses, RMXprt, Ansys Maxwell, winding, rotating magnetic field

## **Bibliografická citácia**

VAŠKO, Dávid. *Snížení ztrát jednofázového asynchronního motoru*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133314>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Dávid Vaško
<b>VUT ID studenta:</b>	209262
<b>Typ práce:</b>	Bakalárska práca
<b>Akademický rok:</b>	2020/21
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Snížení ztrát jednofázového asynchronního motoru

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 26.5.2021

-----  
podpis autora

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Ondřej Vítek Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brně dne: 26.5.2021

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>9</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. ASYNCHRÓNNE STROJE .....</b>	<b>12</b>
1.1 VŠEOBECNÉ INFORMÁCIE .....	12
1.2 ROZDELENIE ASYNCHRÓNNYCH STROJOV .....	13
1.2.1 <i>Motor s klieťovým vinutím</i> .....	13
1.2.2 <i>Motor s vinutým rotorom</i> .....	14
1.3 PRINCÍP ČINNOSTI JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRÓNNEHO MOTORU .....	14
1.4 NÁHRADNÁ SCHÉMA JEDNOFÁZOVÉHO MOTORU .....	16
1.5 VINUTIE JEDNOFÁZOVÝCH ASYNCHRÓNNYCH STROJOV S POMOCNÝM VINUTÍM .....	18
1.6 STRATY V ELEKTRICKÝCH STROJOCH .....	19
1.6.1 <i>Straty vo vinutí</i> .....	20
1.6.2 <i>Straty v železe</i> .....	21
1.6.3 <i>Straty mechanické a dodatočné</i> .....	21
1.7 NAJPOUŽÍVANEJŠIE KONŠTRUKČNÉ PREVEDENIA .....	22
1.7.1 <i>Motor s pomocným rozbehovým vinutím</i> .....	22
1.7.2 <i>Motor s trvale pripojeným kondenzátorom</i> .....	23
1.7.3 <i>Motor s tienenými pólmi</i> .....	24
<b>2. VYBRANÉ MOTORY .....</b>	<b>26</b>
2.1 MOTOR JMO90-4S-90 .....	26
2.2 NAVRHNUTÉ MOTORY S VYUŽITÍM KS PLECHOV .....	28
2.2.1 <i>Plech osovej výšky 90 mm - IEC90/4.284</i> .....	28
2.2.2 <i>Plech osovej výšky 100 mm - IEC100/4.924</i> .....	30
2.2.3 <i>Motor s využitím plechu IEC 90/4.836</i> .....	31
2.3 SPÔSOBY ZLEPŠOVANIA ÚČINNOSTI .....	32
<b>3. VÝPOČET A SIMULÁCIA RMXPRT MODELOV .....</b>	<b>34</b>
3.1 RMXPRT MODELY S PLECHOM IEC90/4.284 .....	34
3.1.1 <i>Výpočet vybraných parametrov</i> .....	35
3.1.2 <i>Jedno vrstvové vinutie</i> .....	37
3.1.3 <i>Dvoj vrstvové sínusové vinutie</i> .....	38
3.1.4 <i>Dvoj vrstvové sínusové vinutie s doplnením prázdnejších drážok</i> .....	39
3.2 RMXPRT MODEL PÔVODNÉHO MOTORU JMO90-4S-90 .....	39
3.3 RMXPRT MODEL MOTORU S VYUŽITÍM IEC 90/4.836 .....	41
3.4 RMXPRT MODEL MOTORU S VYUŽITÍM IEC100/4.924 .....	41
3.5 POROVNANIE VÝSLEDKOV ZÍSKANÝCH Z PROGRAMU RMXPRT .....	42
<b>4. SIMULÁCIA MODELOV V ANSYS MAXWELL .....</b>	<b>44</b>
4.1 MOTORY S 1V VINUTÍM .....	44
4.2 MAXWELL MODEL JMO90-4S-90 .....	46
4.3 MAXWELL MODEL S 2V VINUTÍM .....	47
4.4 POROVNANIE VÝSLEDKOV Z MERANIA, RMXPRT A MAXWELL .....	47



4.5	POROVNANIE VÝSLEDKOV RMxRPT A MAXWELL .....	49
<b>5.</b>	<b>ZÁVER.....</b>	<b>51</b>
	<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK .....</b>	<b>54</b>
	<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>58</b>

.

# ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Asynchrónny motor v reze [3].....	13
1.2	Klietkové vinutie rotoru [5].....	14
1.3	Závislosť momentu $M$ a jeho zložiek $M_1$ a $M_2$ na sklze $s$ . Dolná stupnica sklzov je pre moment $M_1$ , horná je pre moment $M_2$ [2].....	15
1.4	Schéma zapojenia vinutí jednofázových asynchrónnych motorov. D je pracovné (hlavné) vinutie a W je rozbehové (pomocné) vinutie [2] .....	16
1.5	Náhradná schéma pre súbežnú impedanciu [6] .....	16
1.6	Náhradná schéma pre spätnú impedanciu [6].....	17
1.7	Náhradná schéma jednofázového asynchrónneho motora [6] .....	17
1.8	Graf účinnostných kategórií pre 4 pólový motor pri 50hz [8] .....	19
1.9	Rozloženie strát v asynchrónnom stroji [1].....	20
1.10	Fázorový diagram prúdov v motore s pomocnou rozbehovou fázou, kde $I_B$ je prúdu pomocnou fázou, $I_A$ je prúd hlavnou fázou [9] .....	22
1.11	Schéma zapojenie (a) a fázorový diagram (b) jednofázového asynchrónneho motora s trvale pripojeným kondenzátorom [2] .....	23
1.12	Momentové charakteristiky jednofázového asynchrónneho motora s trvalým kondenzátoroch pri rôznych spôsoboch zapojenia [2] .....	24
1.13	Motor s tienenými pólmi v reze [10].....	25
2.1	Stator JMO90-4S-90 a) Náčrt statorového plechu b) Náčrt drážky .....	27
2.2	Rotor JMO90-4S-90 a) Náčrt rotorového plechu b) Náčrt drážky .....	27
2.3	Stator IEC90/4.284 a) Náčrt statorového plechu b) Náčrt drážky.....	29
2.4	Rotor IEC90/4.284 a) Náčrt statorového plechu b) Náčrt drážky .....	29
2.5	a) Plechy IEC100/4.294 stator a rotor b) statorová drážka c) rotorová drážka.....	30
2.6	a) Plechy IEC90/4.836 stator a rotor b) statorová drážka c) rotorová drážka.....	31
2.7	Závislosť celkových strát ( $P_{tot}$ ), strát v železe ( $P_{fe}$ ) a strát vo vinutí ( $P_o$ ) na dĺžke zväzku $l_{Fe}$ [11]...33	
3.1	Jedno vrstvové symetrické vinutie v programe RMxppt.....	37
3.2	Dvoj vrstvové sínusové symetrické vinutie v programe RMxppt .....	38
3.3	Vinutie motoru JMO90-4S-90 v programe RMxppt.....	40
4.1	Sieť motorov 1V v programe Maxwell .....	45
4.2	Obvodový model motorov 1V v programe Maxwell .....	45
4.3	Sieť motoru JMO90-4S-90 v programe Maxwell .....	46
4.4	Obvodový model motoru JMO90-4S-90 v programe Maxwell.....	46
4.5	Priebeh momentov s 1V a 2V vinutiami .....	47

## ZOZNAM TABULIEK

2.1	Parametre motoru JMO-4S-90 pri napájaní 230V a 50Hz .....	26
2.2	Hlavné rozmery statoru a rotoru motoru JMO90-4S-90.....	26
2.3	Hlavné rozmery statoru a rotoru motorov s využitím IEC 90/4.284 plechov.....	28
2.4	Hlavné rozmery statoru a rotoru motorov s využitím IEC 100/4.294 plechov.....	30
2.5	Hlavné rozmery statoru a rotoru motorov s využitím IEC 90/4.836 plechov.....	31
3.1	Rozloženie vodičov v drážkach motoru .....	39
3.2	Rozloženie vodičov v drážkach motoru .....	41
3.3	Straty a účinnosti získané z programu RMxpvt pre motory s materiálom M470-50A .....	42
3.4	Straty a účinnosti získané z programu RMxpvt pre motory s materiálom M250-50A .....	43
4.1	Porovnanie výsledkov z programov Maxwell a RMxpvt s meraním pre motor JMO90-4S-90.....	48
4.2	Porovnanie výsledkov z programov Maxwell a RMxpvt s meraním pre motor JMO90-4S-90.....	50

# ÚVOD

Asynchrónne stroje sú najrozšírenejšou skupinou elektrických strojov. A to najmä kvôli ich jednoduchej konštrukcii, nenáročnej údržbe a nízkej cene. Táto práca je venovaná jednofázovým asynchrónnym motorom, ktoré používajú pre svoj chod jednofázové napájanie, čo so sebou nesie určité výhody aj nevýhody. Hlavnou výhodou je možnosť napájania z obyčajnej zásuvky a nevýhodou neschopnosť motoru rozbehnúť sa z nulových otáčok. Tento typ motoru sa používa najmä tam, kde nie je prístup k trojfázovej sieti, čiže v malovýrobách alebo domácnostiach. V domácnostiach môžeme tento typ motoru nájsť napríklad v práčkach, chladničkách, vysávačoch alebo ručnom náradí.

V dnešnej dobe je 45% celkovej elektrickej energie premenenej na pohyb pomocou motorov v domácnostiach a priemyslových aplikáciách. Výroba elektrickej energie spôsobuje značné množstvo emisií CO<sub>2</sub>, ktoré spôsobujú globálne otepľovanie. Takže ak chceme tieto emisie zmenšiť a globálne otepľovanie zastaviť, vyrábanie efektívnejších elektrických motorov je jedno z najlepších miest, kde začať.

V tejto práci sa venujem jednofázovým asynchrónnym motorom, konkrétne zvyšovaniu ich účinnosti. Nakoľko nariadenie Európskej komisie zaväzuje jednofázové motory dodržať úroveň účinnosti minimálne IE2 (pre motor zvolený v práci je to 81,4%) s platnosťou od 1.7.2023. V práci sú vyskúšané rôzne úpravy motorov, ktoré by mali zvýšiť ich účinnosť (optimalizácia kapacity, sýtenia, materiálu poprípade zväčšovanie motora).

Táto práca je členená na štyri základné kapitoly. V prvej kapitole je celkovo priblížená problematika jednofázových asynchrónnych strojov a rozbor strát v elektrických strojoch. Druhá kapitola obsahuje predstavenie jednotlivých motorov, ktoré boli v práci upravované. Kapitola tri sa venuje vytváraniu modelov v programe RMXprt a vyhodnoteniu výsledkov z tohto programu. A v poslednej kapitole štyri je stručne rozobraté vytváranie modelov v Ansys Maxwell, porovnanie výsledkov z RMXprt a Maxwell s realitou ich následné vyhodnotenie a porovnanie výsledkov RMXprt modelov s Maxwell modelami.

# 1. ASYNCHRÓNNE STROJE

## 1.1 Všeobecné informácie

Asynchrónne (nazývané aj indukčné) stroje zastrešujú veľkú skupinu elektrických strojov, ktoré umožňujú elektromechanickú premenu energie. Je možné ich rozdeliť na motory a generátory (alternátory). Motory premieňajú elektrickú energiu na mechanickú a generátory opačne. Asynchrónne stroje sa zvyčajne používajú ako motory s výstupným mechanickým pohybom, ktorý je lineárny alebo otáčavý.

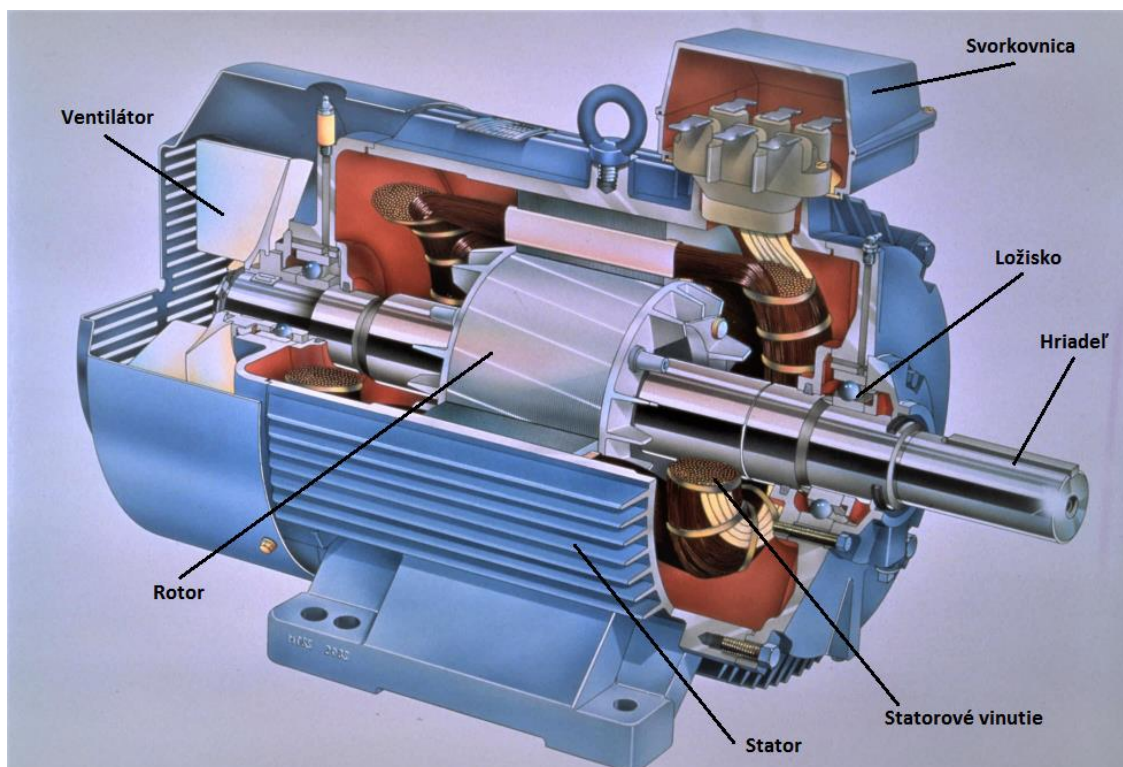
Podobne ako ostatné zariadenia, ktoré slúžia na premenu elektrickej energie na mechanickú alebo naopak, sú aj asynchrónne stroje zostrojené z dvoch hlavných častí. Pevná časť sa nazýva stator a pohyblivá – rotor. Stator je zostrojený z kostry, ktorá zvyčajne býva z liatiny alebo hliníku a na jej koncoch sú umiestnené dva ložiskové štíty. V kostre má stator zalisovaný zväzok plechov, ktorý tvorí časť magnetického obvodu. Statorový zväzok je zámerne tvorený z navzájom izolovaných plechov, aby boli minimalizované straty vírivými prúdmi. Hriadeľ, na ktorej sú nalisované plechy rotoru sa točí v ložiskách, umiestnených v ložiskových štítoch. Na hriadeľ tiež býva umiestnený aj ventilátor, ktorý slúži na chladenie stroja. Rotor a stator sú oddelené vzduchovou medzerou, ktorá umožňuje pohyb rotoru.

Plechov statoru a rotoru obsahujú drážky, v ktorých je uložené vinutie. Vo väčšine prípadov sa na statore používa trojfázové vinutie, existujú aj menej používané dvojfázové vinutie alebo tiež jednofázové, ktorými sa zaoberá táto práca. Začiatky a konce statorového vinutia sú zvyčajne vyvedené na svorkovnicu. V rotorových drážkach sa nachádza vinutie, ktoré nazývame kotva, tento typ vinutia sa používa pri strojoch s väčšími výkonmi. Pre motory s menšími výkonmi sa používa takzvané klietkové vinutie.

Na obrázku 1.1 je znázornený asynchrónny motor v reze, pre lepšiu predstavu konštrukcie. Všetky informácie boli prevzaté zo skrípt predmetu BESB [1].

Asynchrónne stroje sú najpoužívanejšie točivé elektrické stroje, práve vďaka svojej jednoduchej konštrukcii, obsluhu a tiež nízkej cene. Často sa používajú v priemyselnej výrobe, ďalej je to veľká časť motorov pre jednofázovú sieť (domáce spotrebiče) a ako generátory sa používajú vo veterných a malých vodných elektrárnach.

Používané výkony vyrábaných indukčných strojov sa pohybujú na rozmedzí W až kW, napätie niektorých strojov dosahuje aj tisícky V. Napájacia frekvencia vyrábaných strojov v našich končinách je štandardne 50 Hz, otáčky bývajú štandardne v rozmedzí približne 500 až 3000 min<sup>-1</sup>. Ale v zvláštnych prípadoch sa vyrábajú aj vysokootáčkové motory, ktoré dosahujú otáčok niekoľko sto tisícok za minútu [2].



Obrázok 1.1 Asynchrónny motor v reze [3]

## 1.2 Rozdelenie asynchrónnych strojov

Asynchrónne stroje delíme podľa spôsobu použitia:

- Motor
- Generátor
- Brzda

Ďalej podľa spôsobu napájania:

- Jednofázové
- Dvojfázové
- Trojfázové
- Viacfázové

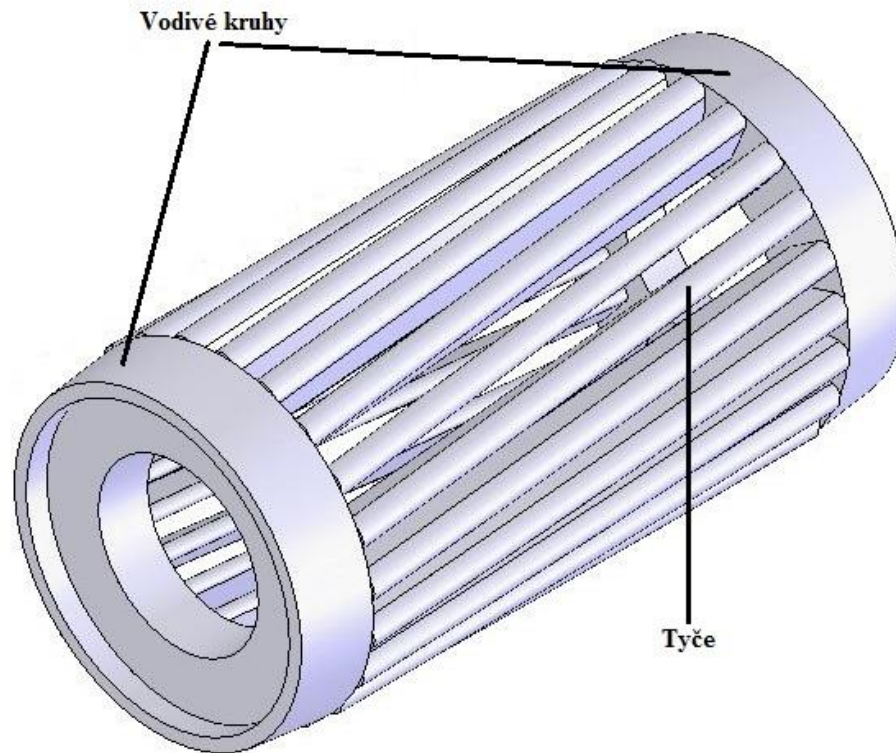
Podľa použitého rotoru:

- S kietkovým vinutím
- S vinutým rotorom

### 1.2.1 Motor s kietkovým vinutím

Vinutie rotoru tohto typu je odliate z hliníku alebo medi. Med' sa však používa menej, kvôli náročnej výrobe. Tento motor má rotorové vinutie spojené trvalo nakrátko. Vinutie

pozostáva z tyčí, ktoré sú na oboch koncoch spojené vodivými kruhmi ako je možné vidieť na obrázku 1.2. Rotorové tyče bývajú často natočené pod nejakým uhlom a to hlavne kvôli zmenšeniu vibrácií a hluku. Tento druh vinutia je najrozšírenejší pri asynchrónnych strojoch. Jednofázové asynchrónne stroje sa z pravidla vyrábajú práve s týmto typom rotoru [4].



Obrázok 1.2 Kľetkové vinutie rotoru [5]

### 1.2.2 Motor s vinutým rotorom

Tento typ motoru má rotor obsahujúci drážky, v ktorých je navinuté rotorové vinutie, väčšinou zapojené do hviezdy, občas sa používa aj zapojenie do trojuholníku. Na hriadeli sú spolu s vinutím aj zberné krúžky, ktoré slúžia na prepojenie cez zberné kefky k rotorovému spúšťaču, čím je možné zmenšiť záberový prúd a naopak zväčšiť záberový moment [4].

## 1.3 Princíp činnosti jednofázového asynchrónneho motoru

Napriek tomu, že konštrukcia jednofázového asynchrónneho motoru je jednoduchšia, vysvetlenie princípu činnosti je oveľa zložitejšie ako u trojfázového motoru [1]. Jednofázové vinutie nevytvorí na statore točivé magnetické pole, ako je tomu pri trojfázových vinutiach, ale len striedavé (pulzujúce) a v priestore stojaté, ktoré je možné

rozložiť na dve protichodné polia, súbežné a spätné. Keď rotor stojí, vytvoria sa spolupracou s jeho prúdmi dva točivé momenty, ktoré majú rovnakú veľkosť a pôsobia proti sebe. Z toho vyplýva, že záberový moment ( $s = 1$ ) jednofázového asynchrónneho motoru bez akýchkoľvek rozbehových úprav nulový (obrázok 1.3). Z obrázku 1.3 je tiež zrejmé, že spätné pole vytvára záporný (brzdny) moment.

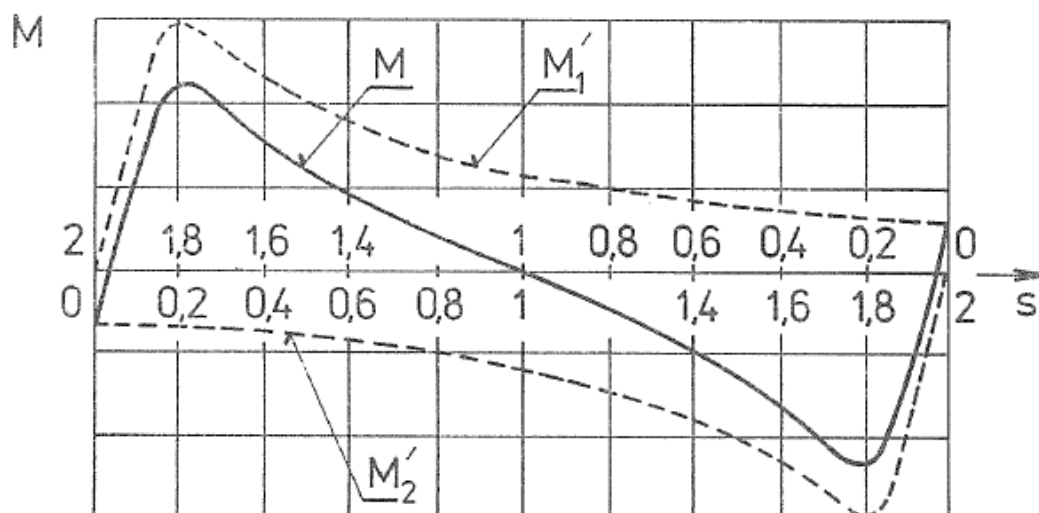
Ak by začala nejaká vonkajšia sila pôsobiť na rotor a rotor by sa otáčal, začali by svoje veľkosti meniť aj súbežný  $M_1'$  aj spätný  $M_2'$  moment a ich súčet by sa nerovnal nule.

$$M = M_1' + M_2' \neq 0, \quad (1.1)$$

Kde  $M$  je výsledný moment asynchrónneho motoru. Ak táto hodnota prekročí veľkosť zaťažovacieho momentu,

$$M > M_p, \quad (1.2)$$

začne sa motor rozbiehať. So zvyšujúcimi sa otáčkami sa rapídne znižuje spätný moment, až na takú hodnotu, že pri menovitom chode býva len zlomkom súbežného momentu.



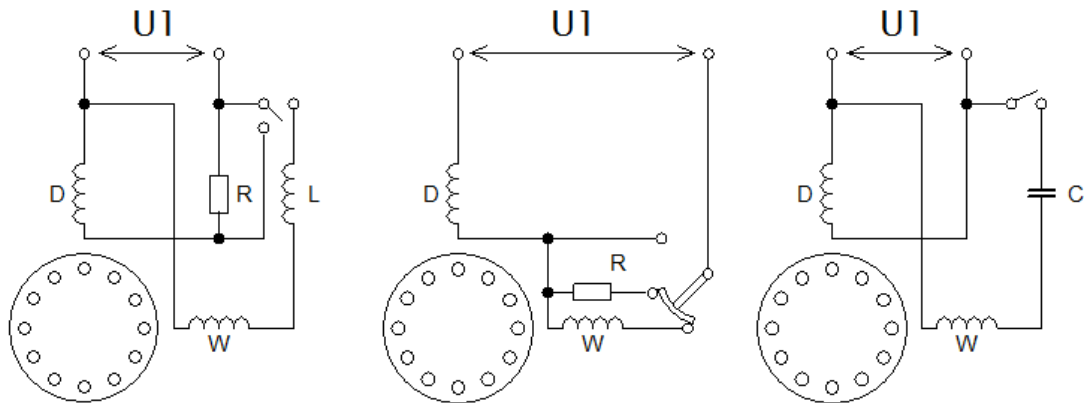
Obrázok 1.3 Závislosť momentu  $M$  a jeho zložiek  $M_1'$  a  $M_2'$  na sklze  $s$ . Dolná stupnica sklzov je pre moment  $M_1'$ , horná je pre moment  $M_2'$  [2]

Je jasné, že rozbiehanie asynchrónneho motoru pôsobením vonkajšou silou na rotor by bolo veľmi nepraktické. Preto sú jednofázové motory vždy vybavené takými doplnkovými časťami, ktoré umožnia ich rozbeh v požadovanom smere.

Rozbeh jednofázových asynchrónnych strojov riešime pomocou rozbehového vinutia. Toto vinutie je navinuté na zostávajúcej tretine voľných drážok ( $2/3$  drážok obsahujú hlavné vinutie) tak, aby boli magnetické osy hlavnej a pomocnej fázy posunuté o  $90^\circ$  elektrických. Úloha tohto vinutia je vytvoriť s pomocou hlavného vinutia točivé magnetické pole. Preto potrebujeme vzájomne časovo posunúť i prúdy týchto dvoch fáz. Toto dosiahneme zapojením rezistoru, cievky alebo kondenzátoru do série spolu s rozbehovým (pomocným) vinutím (obrázok 1.4).



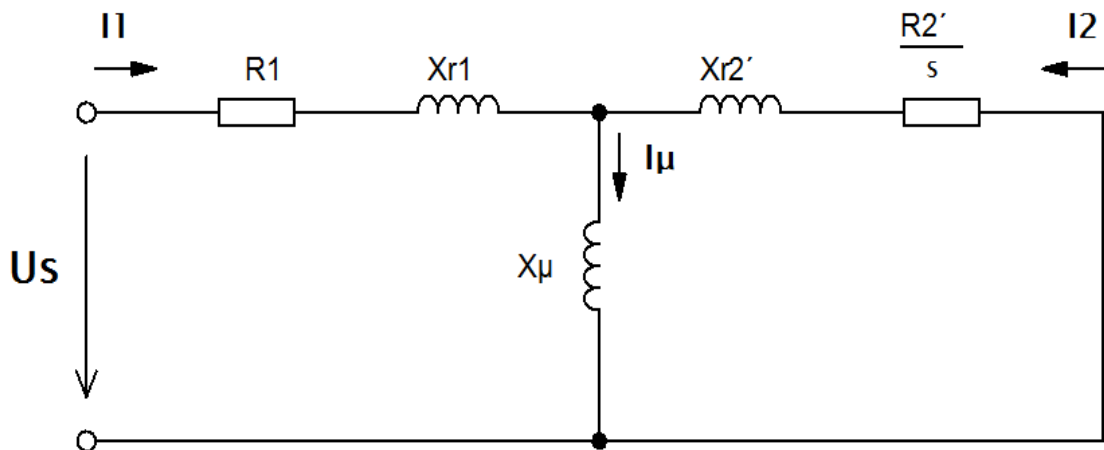
Všetky informácie v tejto kapitole boli čerpané z knihy Elektrické Stroje 2 [2].



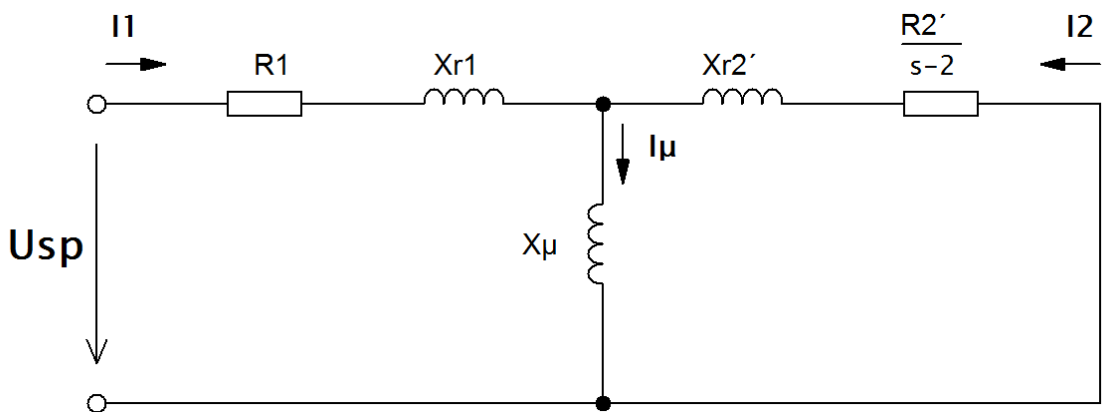
Obrázok 1.4 Schéma zapojenia vinutí jednofázových asynchrónnych motorov. D je pracovné (hlavné) vinutie a W je rozbehové (pomocné) vinutie [2]

## 1.4 Náhradná schéma jednofázového motoru

Pomocou náhradných schém je možné jednoducho určiť účinník, prúdy, moment, elektrické straty a straty v železe. Náhradná schéma jednofázového asynchrónneho motoru je zložitejšia, ako u trojfázového, pretože musí byť zohľadnená súbežná (obrázok 1.5) aj spätná (obrázok 1.6) zložka.



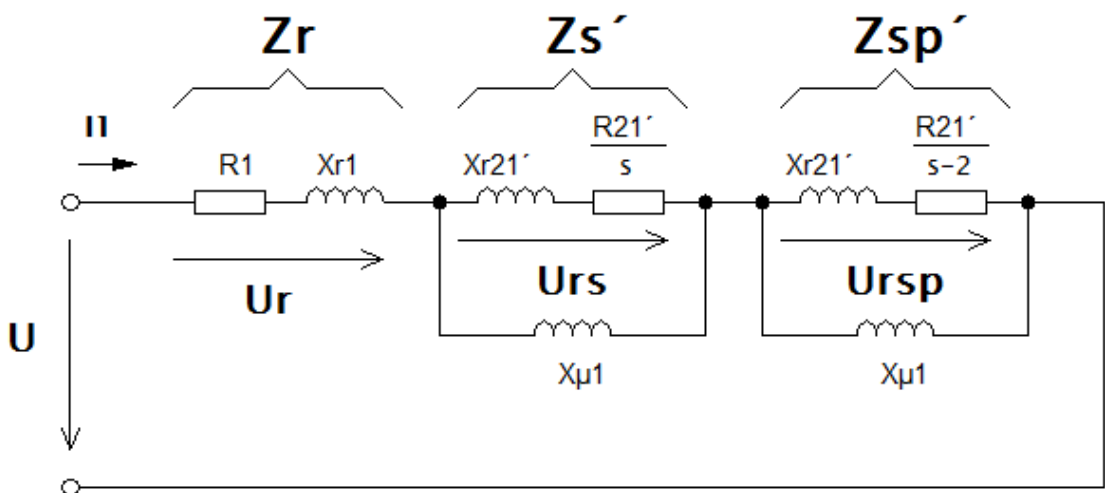
Obrázok 1.5 Náhradná schéma pre súbežnú impedanciu [6]



Obrázok 1.6 Náhradná schéma pre spätnú impedanciu [6]

Na obrázku 1.5 a obrázku 1.6 sú znázornené náhradné schémy pre súbežnú a spätnú impedanciu, v ktorých  $R_1$  reprezentuje činný odpor statorového vinutia,  $X_{r1}$  rozptylovú reaktanciu statorového vinutia,  $R_2$  odpor rotora prepočítaný na stator,  $X_{r2}$  je rozptylová reaktancia rotora prepočítaná na stranu statoru a  $X_\mu$  je hlavná magnetizačná reaktancia.

Na základe metódy súmerných zložiek, aplikovanej na dvojfázový stroj s jedným napájaným vinutím je v [6] odvodená náhradná schéma jednofázového asynchrónneho. Táto náhradná schéma vychádza zo sériového zapojenia náhradných schém pre súbežnú a spätnú impedanciu a je možné ju opraviť do tvaru na obrázku 1.7.



Obrázok 1.7 Náhradná schéma jednofázového asynchrónneho motora [6]

Hlavnú magnetizačnú reaktanciu je možné určiť zo vzťahu:

$$X_{\mu} = 16mf(Nk_{v1})^2 \frac{\tau l}{\delta p} \cdot 10^{-7}, \quad (1.3)$$

kde  $m$  je počet fáz,  $f$  je frekvencia,  $N$  je počet závitov jedného vinutia,  $k_{v1}$  je činiteľ vinutí,  $\delta$  je vzduchová medzera,  $l$  je aktívna dĺžka zväzku (dĺžka železa) a  $p$  je počet pólových dvojíc.

Náhradnú schému jednofázového asynchrónneho motoru je možné rozdeliť na tri časti a to: Rozptylovú impedanciu  $Z_r$ , vnútornú súbežnú impedanciu  $Z'_s$  a vnútornú spätnú impedanciu  $Z'_{sp}$ . Na týchto impedanciách sa pomocou prúdu  $I_1$  vytvoria napätia  $U_r$ ,  $U_{rs}$  a  $U_{rsp}$ .

$$U = U_r + U_{rs} + U_{rsp}, \quad (1.4)$$

Napätia  $U_{rs}$  a  $U_{rsp}$  sú napätia indukované súbežným a spätným polom a je možné ich vyjadriť pomocou spätnej a súbežnej vnútornej impedancie z obrázku 1.7.

Informácie boli čerpané z [7] a [6].

## 1.5 Vinutie jednofázových asynchrónnych strojov s pomocným vinutím

U jednofázových asynchrónnych strojov s pomocným vinutím je zväčša 2/3 drážok využitých na hlavné vinutie a ostatné drážky bývajú naplnené vinutím pomocným. Výhoda vinutí zaberajúcich 2/3 drážok hlavnou fázou je, že nevyvolávajú tretiu harmonickú magnetomotorickej sily. Avšak pri použití plechov s menším počtom drážok môže mať zasa pomocné vinutie viacej vyvinutú tretiu harmonickú, ktorá potom spôsobuje pri tretine synchronných otáčok sedlo v momentovej charakteristike.

Hladkej momentovej charakteristiky pri odporovom rozbehu sa dá dosiahnuť použitím sínusového rozloženia závitov oboch vinutí. Počty závitov v drážkach sú volené tak, aby sa tvar poľa čo najviac blížil sínusovému priebehu. Vinutia pri tomto type ležia v skoro v každej drážke a väčšinou sú oddelené lepenkovou izoláciou. Nevýhoda tohto rozloženia je však menšie využitie niektorých drážok. Tieto málo využité drážky sa občas vyrábajú s menšou hĺbkou.

Tak isto je možnosť použiť súmerné dvojfázové vinutia alebo súmerne rozložené vinutia, toto riešenie sa väčšinou používa u motorov s permanentne zapojeným kondenzátorom. Obdobné vinutie je otestované aj v tejto práci (3.1.2).

Na vinutia sa najčastejšie používa medený smaltovaný drôt. Pri strojoch využívajúcich odporový rozbeh sa zvykne namiesto odporu v pomocnej fáze použiť smaltovaný drôt z mosadze, ktorá má približne päť krát väčší odpor ako meď. A tým pádom nie je potrebné pripájať odpor do pomocnej fázy vonku z kostry.

Všetky informácie boli čerpané z knihy Jednofázové Indukční Motory [6].

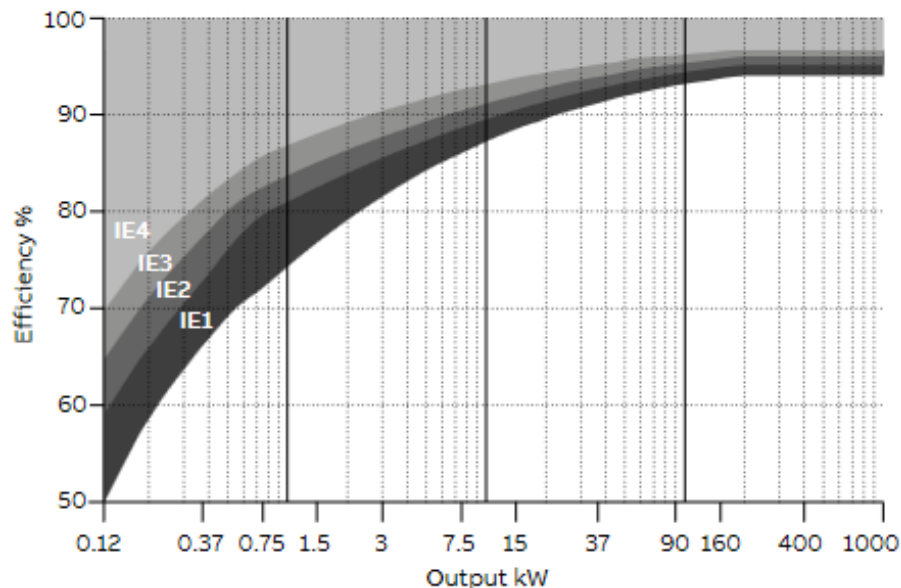
## 1.6 Straty v elektrických strojoch

Táto práca sa zaoberá najmä zvyšovaním účinnosti jednofázových asynchrónnych strojov, preto je definovanie strát v elektrických strojoch nevyhnutná časť. Pred tým je však vhodné spomenúť, kam až treba s účinnosťou pohnúť.

Podľa IEC (International Electrotechnical Commission) sú pre jednofázové asynchrónne motory zadané 4 účinnostné triedy:

- IE1 – štandardná účinnosť (Standard)
- IE2 – zvýšená účinnosť (High)
- IE3 – veľká účinnosť (Premium)
- IE4 – veľmi veľká účinnosť (Super Premium)

Tabuľka s jednotlivými účinnosťami pre dané triedy a počty pólů/výkon pre 50Hz sieť sú uvedené v prílohe A.6. Pre túto prácu je podstatná hodnota IE2 pre 4 pólův stroj pri 1,1kW kde by mal motor nadobúdať účinnosti vyššej ako 81,4%. Toto nariadenie nadobúda platnosť od 1.7.2023.



Obrázok 1.8 Graf účinnostných kategórií pre 4 pólův motor pri 50Hz [8]

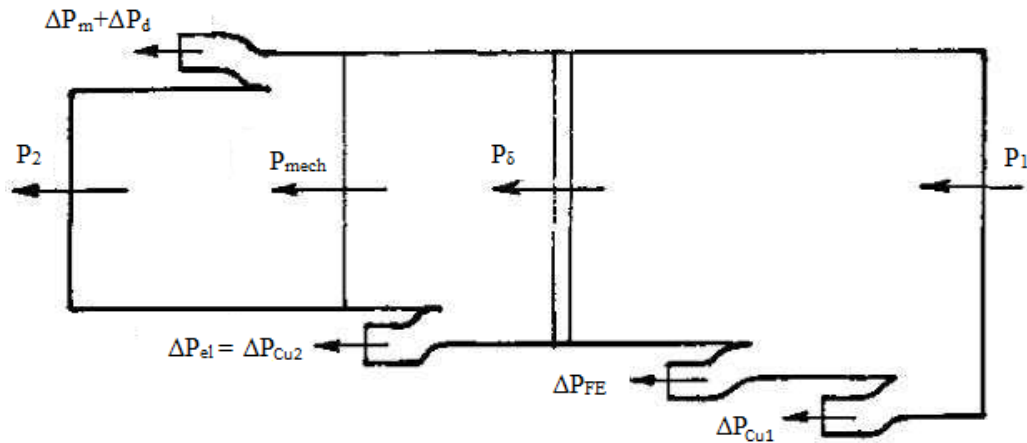
Výkon elektrického stroja, ktorý je odoberaný zo siete sa nazýva príkon a je určený ako:

$$P_1 = m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi , \quad (1.5)$$

Kde  $m$  je počet fáz,  $U_1$  je napätie na jednej fáze,  $I_1$  je prúd jednou fázou a  $\cos\varphi$  je účinník. Celkové straty motoru potom dostaneme ako rozdiel príkonu a výkonu ako:

$$\Delta P = P_1 - P , \quad (1.6)$$

Celkové straty je však ešte možné rozdeliť na jednotlivé zložky. Najväčšia zložka celkových strát sú bezpochyby činné straty v odporoch vinutí  $\Delta P_{cu}$ . Ďalšou podstatnou zložkou sú straty v magnetickom obvode stroja – straty v železe  $\Delta P_{Fe}$ , mechanické straty  $\Delta P_{mech}$ , ktoré vznikajú trením a ventiláciou a straty dodatočné  $\Delta P_d$ . Rozloženie týchto strát je znázornené na obrázku 1.9 a bližšie popísané v ďalších podkapitolách [4].



Obrázok 1.9 Rozloženie strát v asynchrónnom stroji [1]

### 1.6.1 Straty vo vinutí

Táto zložka strát má najväčší podiel v celkových stratách motoru (najmä joulove straty v statore). Tento typ strát je závislý na kvadráte prechádzajúceho prúdu a odporu vinutia. Straty vo vinutí statora sa dajú vyčíslieť ako:

$$\Delta P_{cu1} = m \cdot I_1^2 \cdot R_1, \quad (1.7)$$

kde  $R_1$  je odpor vinutia jednej fáze. Obdobne sa vypočítajú aj činné straty v rotore

$$\Delta P_{cu2} = m \cdot I_2^2 \cdot R_2, \quad (1.8)$$

Odporu vinutí  $R_1$  a  $R_2$  je možné vyčíslieť ako (pre referenčnú hodnotu okolia 20°C):

$$R_{20} = \rho_{20} \frac{l}{S}, \quad (1.9)$$

kde  $\rho_{20}$  je merná rezistivita pri 20°C,  $l$  je dĺžka vodiča vinutia a  $S$  je prierez vodiča.

Potom prepočet odporu na prevádzkovú teplotu stroja je možné vypočítať zo vzťahu:

$$R = R_{20}(1 + \alpha \cdot [\vartheta - \vartheta_1]), \quad (1.10)$$

kde  $\alpha$  je teplotný odporový súčiniteľ,  $\vartheta$  je požadovaná teplota a  $\vartheta_1$  je referenčná teplota (v tomto prípade 20°C).

Zo vzťahov je jasné, že straty vo vinutí sa dajú zmenšiť buď zmenou materiálu, čo je v prípade vinutí elektrických strojov viac menej nemožné, pretože statorové vinutie je zvyčajne z čistej elektrotechnickej medi a rotorové vinutie (klietka) sa z pravidla robí z hliníku, pretože výroba z medi je problematická alebo ďalšou možnosťou je zväčšenie prierezu, táto možnosť je realizovateľná, avšak limitujúci faktor v tomto prípade je činiteľ plnenia drážky [1].

### 1.6.2 Straty v železe

Straty v železe alebo tiež straty v magnetickom obvode stroja  $\Delta P_{Fe}$  je možné rozdeliť na straty vírivými prúdmi  $\Delta P_v$  a straty hysterézne  $\Delta P_h$ . Tieto straty je možné vyjadriť podľa vzťahu:

$$\Delta P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m_m, \quad (1.11)$$

$$\Delta P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^n \cdot m_m, \quad (1.12)$$

kde  $k_v$  a  $k_h$  sú súčinitele, ktoré sú závislé na materiálových vlastnostiach a hrúbke materiálu,  $f$  je frekvencia,  $B_m$  je amplitúda magnetickej indukcie a  $m_m$  je hmotnosť materiálu.

Zo vzťahov je zrejmé, že straty sú mocninovo a kvadraticky závislé na magnetickej indukcii, to znamená, že ich je možné výrazne znížiť vhodným sýtením magnetického obvodu, tak isto aj geometriou, aby nevznikali miesta kde je stroj veľmi presýtený. Z rovníc je tiež zrejmé, že straty sú závislé na materiálových vlastnostiach, čiže je možné ich znížiť aj voľbou materiálu s nižším stratovým číslom. Straty hysterézne sú závislé na ploche hysteréznej slučky, takže pre ich minimalizovanie je potrebné voliť materiál s čo najužšou hysteréznou slučkou. Straty vírivými prúdmi sa tiež minimalizujú pomocou statorového a rotorového balenia rozdeleného do plechov a ich vzájomnou izoláciou [1].

### 1.6.3 Straty mechanické a dodatočné

Straty mechanické  $\Delta P_{mech}$  sa podľa pôvodu dajú rozdeliť na tri skupiny a to straty trením v ložiskách, straty trením rotoru o vzduch a straty ventilačné, ktoré sú spôsobené odporom vzduchu voči rotujúcim častiam.

Dodatočné straty  $\Delta P_d$  sú pomerne ťažko zistiteľným druhom strát, vznikajú napríklad vyššími harmonickými alebo vírivými prúdmi v hmotách, ktoré sú blízko vinutia. Ich hodnota sa odhaduje na približne 1-2% z celkového príkonu stroja.

Straty mechanické ani dodatočné v práci nie sú riešené, nakoľko práca sa venuje skorej stratám v elektrických častiach stroja.

Informácie v celej kapitole 1.6 sú čerpané z [4] a skript z predmetu ESB [1].

## 1.7 Najpoužívanejšie konštrukčné prevedenia

V dnešnej dobe sa používajú tri hlavné typy jednofázových asynchrónnych motorov, ktoré budú podrobnejšie rozobrané v nasledujúcich kapitolách [9].

- Motor s pomocným rozbehovým vinutím
- Motor s trvale pripojeným kondenzátorom
- Motor s tienenými pólmi

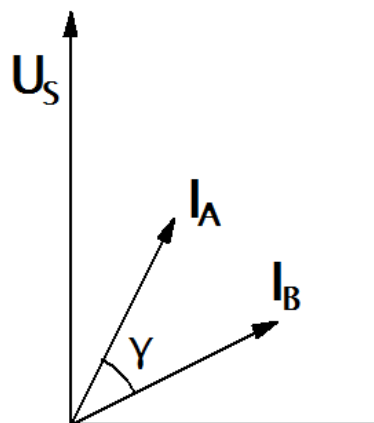
### 1.7.1 Motor s pomocným rozbehovým vinutím

Jednofázové asynchrónne motory s pomocnou fázou je možné rozdeliť na tie, ktoré majú pomocné vinutie pripojené trvale (výhradne motory s kondenzátormi 1.7.2) a tie, u ktorých sa pomocné vinutie používa len na rozbeh (motory s rezistorom, cievkou, ale aj rozbehovým kondenzátorom) [6].

Motory s pomocnou fázou majú hlavné a pomocné statorové vinutie posunuté o  $90^\circ$  niekedy až o  $110-120^\circ$  stupňov. Pomocné vinutie je konštruované tak, aby malo väčší pomer medzi rezistanciou a reaktanciou, tým pádom aby bolo schopné posunúť prúd pomocného vinutia v čase pred prúd hlavného vinutia. Tieto dve vinutia s  $90^\circ$  priestorovým posunom a približne  $20-30^\circ$  časovým posunom (obrázok 1.10) medzi prúdmi hlavného a pomocného vinutia vyprodukurujú vo vzduchovej medzere magnetické pole. Toto magnetické pole indukuje napätie v kletke rotoru, ktorého prúdy začnú vytvárať záberový moment, ktorý následne začne otáčať rotorom.

Akonáhle motor dosiahne určitú rýchlosť pomocné (rozbehové vinutie), ktoré je dimenzované len na krátku prevádzkovú dobu sa odpojí. Záberový moment môže dosahovať hodnôt až do 150% menovitého momentu.

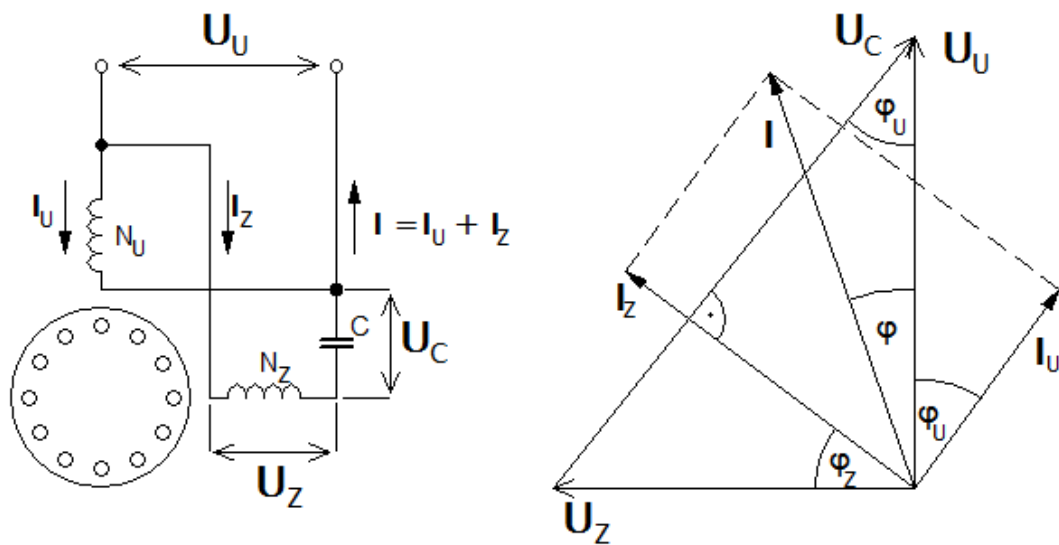
Motory s pomocnou fázou používajú počas behu len jedno vinutie a preto majú horší účinník. Obvykle sa používajú pri výkonoch približne 300W a hlavne tam, kde rozhodujúcim faktorom je cena motoru [9].



Obrázok 1.10 Fázorový diagram prúdov v motore s pomocnou rozbehovou fázou, kde  $I_B$  je prúdu pomocnou fázou,  $I_A$  je prúd hlavnou fázou [9]

### 1.7.2 Motor s trvale pripojeným kondenzátorom

Motory tohto druhu majú v statore dve vinutia vzájomne pootočené o  $90^\circ$  elektrických. Do série s jedným z vinutí (väčšinou pomocným obrázok 1.11) je zapojený kondenzátor, ktorý posúva fázy pomocného a hlavného vinutia o približne  $90^\circ$ . Trvale pripojený kondenzátor v statorovom obvode zlepšuje nielen pracovné ale aj rozbehové charakteristiky motoru, ktoré sa tým pádom približujú ku charakteristikám trojfázových motorov. Takýto motor sa veľmi podobá na dvojfázový motor pripojený na nesúmerné napätie.

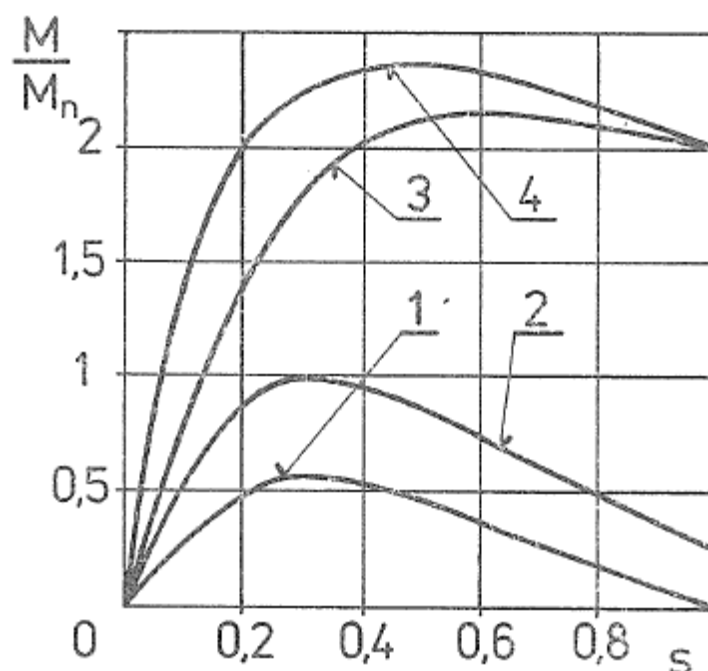


Obrázok 1.11 Schéma zapojenie (a) a fázorový diagram (b) jednofázového asynchrónneho motoru s trvale pripojeným kondenzátorom [2]

Práve vďaka kondenzátoru môže tento motor pracovať s vysokým účinníkom. Jeden z jeho nedostatkov je ten, že motor s určitou pripojenou kapacitou má točivé pole blížiac sa tvarom kruhu len pri konkrétnom zaťažení motoru. Pri zmene zaťaženia sa pole deformuje na eliptické a teda vzniká pole spätné, ktoré zhoršuje vlastnosti motoru. Nedostatok je možné odstrániť plynulou alebo stupňovitou zmenou kapacity v obvode statoru  $C$ . Plynulá zmena kapacity sa dá zabezpečiť napríklad paralelnou tlmičkou s riadenou indukčnosťou zapojenou ku kondenzátoru.

Obrázok 1.12 obsahuje rôzne momentové charakteristiky pri rôznych zapojeniach. Krivka 1 znázorňuje motor bez kondenzátoru. V prípade krivky 2 je použitý malý kondenzátor. Podľa krivky 3 sa moment mení, ak je motor napájaný zo súmernej dvojfázovej siete. A posledná možnosť 4 je ekvivalentom zapojenia kondenzátoru, pri ktorom má motor rovnaký záberový moment ako pri dvojfázovom súmernom napájaní.





Obrázok 1.12 Momentové charakteristiky jednofázového asynchrónneho motoru s trvalým kondenzátormi pri rôznych spôsoboch zapojenia [2]

Z uvedených charakteristík (obrázok 1.12) je zrejmé, že zmenou kapacity  $C$  môžeme v širokom rozpätí značne meniť záberový aj maximálny moment motoru. Avšak v okolí menovitých otáčok je výhodné, aby bola kapacita malá, lebo motor začína pracovať s väčším sklzom a tým pádom si značne znižuje účinnosť. Pre všetky spôsoby je teda možné stupňovito meniť kapacitu.

U tohto špecifického zapojenia sa dajú ovládať otáčky podobne ako u trojfázových motorov. Napríklad zmenou frekvencie napájania, zmenou počtu pólov alebo výnimočne aj zmenou veľkosti napájacieho napätia alebo kapacity. Tieto stroje môžu pracovať aj ako alternátor alebo brzda. Všetky informácie boli čerpané z knihy Elektrické stroje 2 [2].

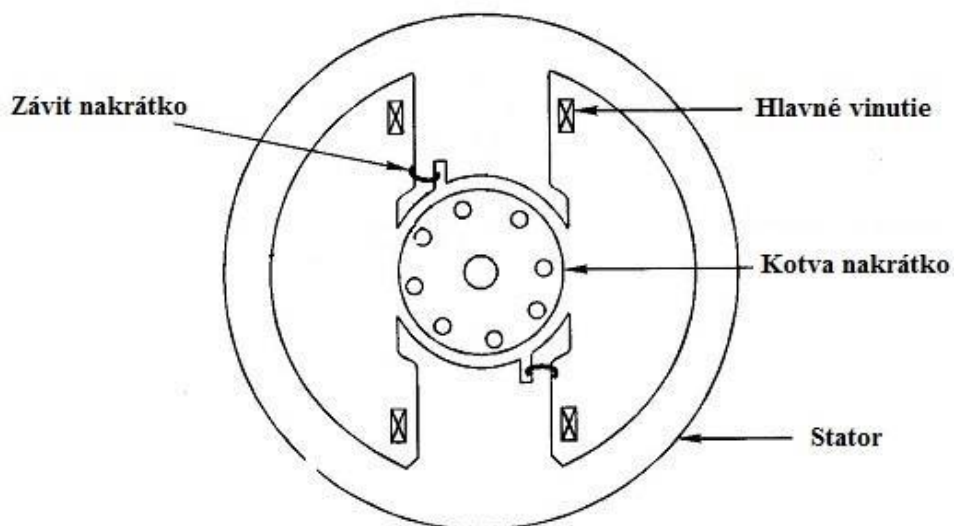
### 1.7.3 Motor s tienenými pólmi

Pre motory s malým výkonom je nevýhodná konštrukcia s drážkovým statorom, preto sa používa oveľa jednoduchšia verzia s tienenými pólmi.

Stator obsahuje vyniknuté póly spolu s cievkami hlavného vinutia. Tienenie časti pólu je urobené pomocou nesúmerného zárezu, v ktorom je uložený medený závit nakrátko (obrázok 1.13). Pomocou pulzujúceho magnetického poľa generovaného v hlavnom vinutí sa vytvorí v závite nakrátko prúd, ktorý tiež vytvára pulzujúce magnetické pole a to pôsobí proti poľu hlavného vinutia, čím spôsobuje časový posun magnetického toku v zatienenej časti pólu. Následkom je posunutie amplitúdy magnetického toku na povrchu pólu od nezatienenej časti ku zatienenej a zároveň aj vznik točivého momentu v rovnakom smere. Z toho vyplýva, že závit nakrátko trvalo určuje smer otáčania. Rotory týchto motorov majú obvykle vinutie kliečového typu.

Motory s tienenými pólmi sú lacné, ale majú malý záberový moment, malý účinník ( $\cos\varphi \sim 0,6$ ) a malú účinnosť ( $\eta \sim 10-25\%$ ). Vďaka týmto nedostatkom sa používajú len pri výkonoch v rozmedzí 20-70W, napríklad vo ventilátoroch alebo gramofónoch.

Informácie boli čerpané zo skrípt predmetu BESB [1].



Obrázok 1.13 Motor s tienenými pólmi v reze [10]

## 2. VYBRANÉ MOTORY

V práci boli simulované a dopočítavané hodnoty pre sedem motorov. Prvý a zároveň referenčný motor, pre ktorý bola zvyšovaná účinnosť je motor JMO90-4S-90 od spoločnosti EMP s.r.o. (2.1) a ďalšie motory sú motory s rovnakými parametrami ako JMO-90-4S-90, ale sú navrhnuté do plechov od firmy Kienle + Spiess GmbH a líšia sa vinutím alebo osovou výškou. Plechy od firmy Kienle + Spiess GmbH boli zvolené kvôli ich väčšej ploche drážky, z čoho vyplýva, že sa do nich vojde väčší objem medi a tým pádom sa znižujú straty vo vinutí na úkor strát v železe.

### 2.1 Motor JMO90-4S-90

Na účely zvýšenia účinnosti bol pre bakalársku prácu zvolený motor JMO90-4S-90. Parametre motoru a výkresová dokumentácia boli dodané firmou EMP s.r.o. Z názvu motoru je zrejmé, že ide o 4 pólový stroj.

Tabuľka 2.1 Parametre motoru JMO-4S-90 pri napájaní 230V a 50Hz

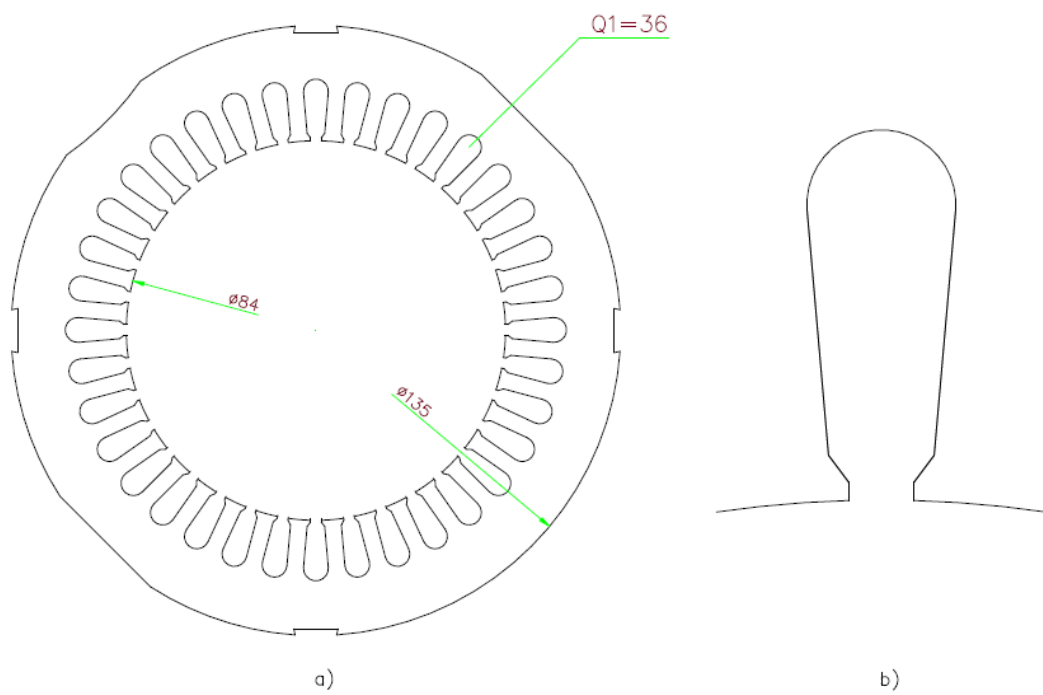
Veličina	Značka	Jednotka	Hodnota
Menovitý výkon	$P_{2N}$	kW	1,10
Menovité otáčky	$n_n$	$\text{min}^{-1}$	1400
Menovitá účinnosť	$\eta_n$	%	74,3
Menovitý účinník	$\cos(\varphi)$	-	0,98
Menovitý prúd	$I_n$	A	6,58
Menovitý moment	$M_n$	Nm	7,50
Záberový moment	$M_z$	Nm	12,00

V tabuľke 2.1 sú uvedené menovité parametre motoru JMO-90-4S pri napájanom napätí 230V a frekvencii 50Hz. Motor ešte obsahuje rozbehový kondenzátor  $C_r = 80 \mu\text{F}$  a pracovný kondenzátor s kapacitou  $C_b = 35 \mu\text{F}$ . A má hmotnosť  $m = 13,6 \text{ kg}$ .

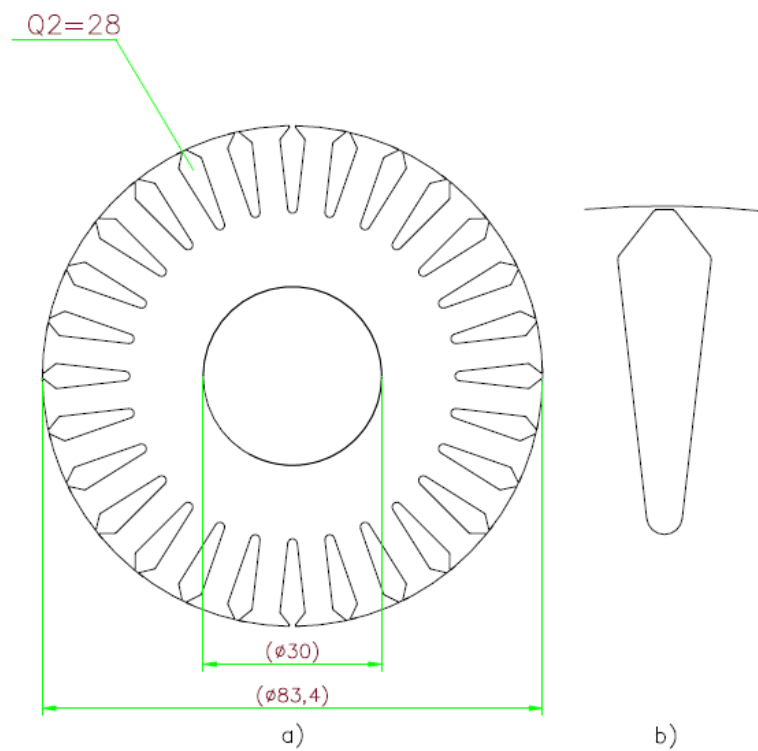
Tabuľka 2.2 Hlavné rozmery statoru a rotoru motoru JMO90-4S-90

Časť motoru	Veličina	Značka	Jednotka	Hodnota
Stator	Vonkajší priemer	$D_{\text{outS}}$	mm	135
	Vnútorý priemer	$D_{\text{inS}}$	mm	84
Rotor	Vonkajší priemer	$D_{\text{outR}}$	mm	83,4
	Vnútorý priemer	$D_{\text{inR}}$	mm	30

V tabuľke 2.2 sú uvedené hlavné rozmery statorových a rotorových plechov motoru JMO90-4S-90. Stator obsahuje  $Q_1 = 36$  drážok a rotor  $Q_2 = 28$  drážok ako je možné vidieť na obrázku 2.1 a obrázku 2.2, na ktorých sú znázornené aj použité tvary drážok. Celková dĺžka zväzku je  $l_{\text{Fe}} = 90\text{mm}$ .



Obrázok 2.1 Stator JMO90-4S-90 a) Náčrt statorového plechu b) Náčrt drážky



Obrázok 2.2 Rotor JMO90-4S-90 a) Náčrt rotorového plechu b) Náčrt drážky

Z obrázku 2.1 a obrázku 2.2 je tiež možné určiť veľkosť vzduchovej medzery  $\delta$  ako:

$$\delta = \frac{D_{inS} - D_{outR}}{2} = \frac{84 - 83,4}{2} = 0,3 \text{ mm} , \quad (2.1)$$

## 2.2 Navrhnuté motory s využitím KS plechov

Ako už bolo spomenuté v kapitole 2, plechy od firmy Kienle + Spiess GmbH boli zvolené na základe väčšieho prierezu drážky, kvôli ktorému je do motoru možné dostať viac medi a tým zvýšiť účinnosť.

Tieto motory sú len v štádiu návrhu. Niektoré parametre boli dopočítané, tak aby zrovnanie s JMO90-4S-90 bolo férové. Boli dodržané rovnaké rozmery vonkajšieho priemeru plechov, dĺžky zväzku a činiteľa plnenia drážky.

Menovité parametre všetkých motorov v tejto kapitole sú uvedené v tabuľke 2.1.

### 2.2.1 Plech osovej výšky 90 mm - IEC90/4.284

Do tohto plechu boli navrhnuté až tri modely, ktoré sa líšia len rozložením vinutia.

- 1 vrstvové súmerné
- 2 vrstvové sínusové
- 2 vrstvové sínusové s maximálnym  $k_p$  v prázdnejších drážkach

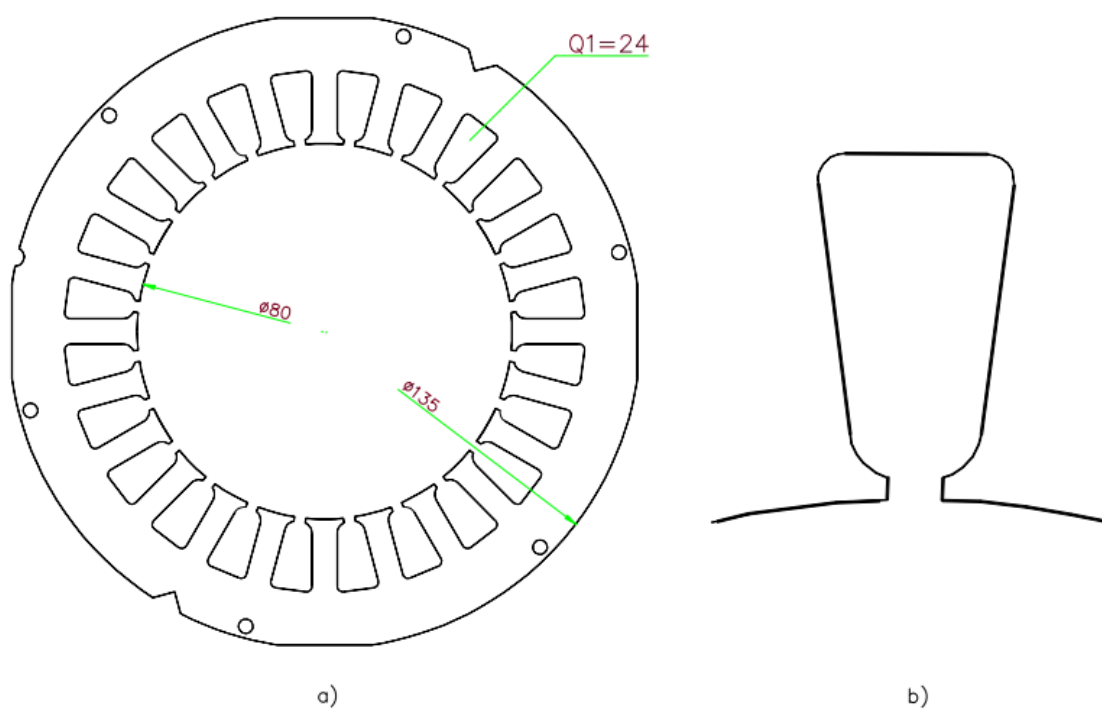
Tabuľka 2.3 Hlavné rozmery statoru a rotoru motorov s využitím IEC 90/4.284 plechov

Časť motoru	Veľičina	Značka	Jednotka	Hodnota
Stator	Vonkajší priemer	$D_{outS}$	mm	135
	Vnútorý priemer	$D_{inS}$	mm	80
Rotor	Vonkajší priemer	$D_{outR}$	mm	79,4
	Vnútorý priemer	$D_{inR}$	mm	30

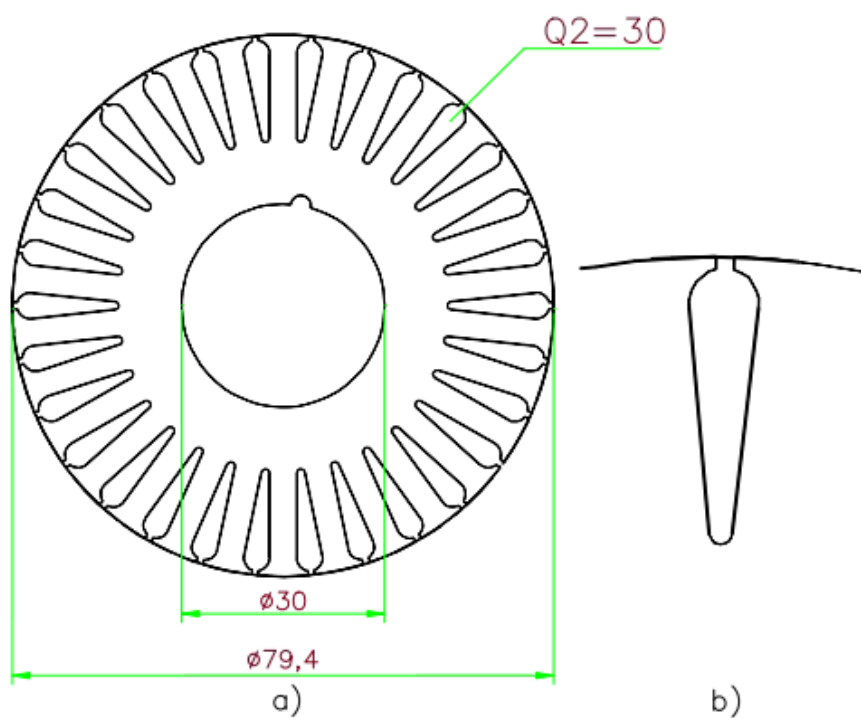
V tabuľke 2.3 sú uvedené hlavné rozmery statorových a rotorových plechov motoru. Z tabuľky 2.3 je tiež zrejmé, že vŕtanie týchto motorov sa líši od JMO90-4S-90, pretože plechy od spoločnosti Kienle + Spiess majú vnútorný priemer statoru  $D_{inS}$  o 4 mm menší, z toho vyplýva, že aj priemer rotoru  $D_{outR}$  je o 4 mm menší. Tiež bol zvolený aj plech s rozdielnym počtom drážok, stator obsahuje  $Q_1 = 24$  a rotor  $Q_2 = 30$  ako je možné vidieť na obrázku 2.3 a obrázku 2.4.

Veľkosť vzduchovej medzery  $\delta$  bola volená rovnako ako v JMO90-4S-90 a dá sa určiť podľa rovnice 2.1 z obrázkov 2.3 a 2.4 ako:

$$\delta = \frac{D_{inS} - D_{outR}}{2} = \frac{80 - 79,4}{2} = 0,3 \text{ mm}$$



Obrázok 2.3 Stator IEC90/4.284 a) Náčrt statorového plechu b) Náčrt drážky



Obrázok 2.4 Rotor IEC90/4.284 a) Náčrt statorového plechu b) Náčrt drážky

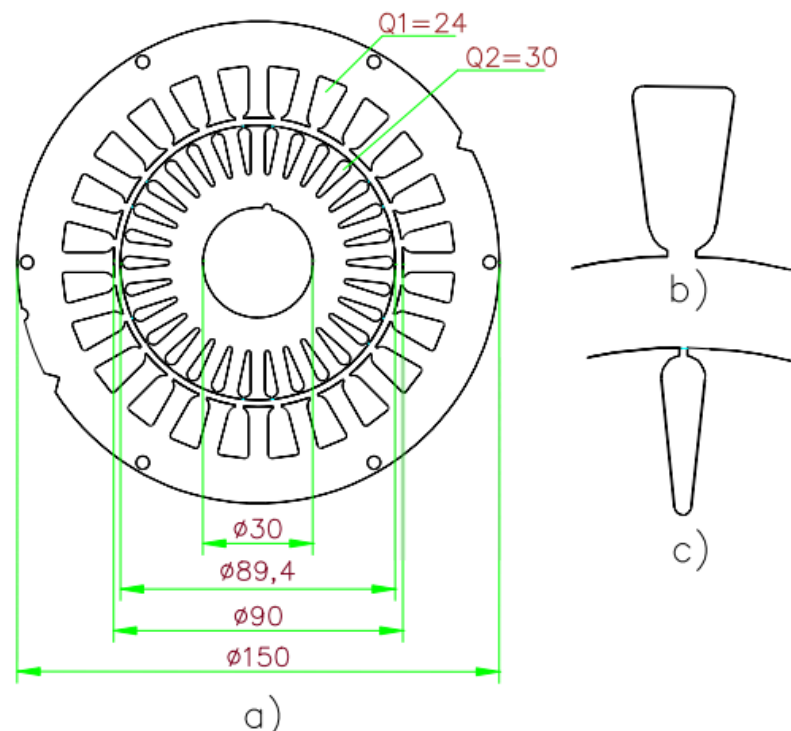
### 2.2.2 Plech osovej výšky 100 mm - IEC100/4.924

Plech s o stupeň vyššou osovou výškou bol volený ako poistka, pretože je predpoklad, že s využitím tohto plechu je možné dosiahnuť 81,4% účinnosť. Toto riešenie však prináša ďalšie nevýhody. Hlavná nevýhoda je práve zväčšovanie rozmerov, pri zväčšovaní rozmerov stroja hrozí, že sa nemusí vojsť do kostry, na úkor čoho by sa museli zmenšiť rebrá a stroj by mohol mať problémy s chladením. Zväčšenie môže tiež komplikovať inštaláciu stroja do finálneho zariadenia

Tabuľka 2.4 Hlavné rozmery statoru a rotoru motorov s využitím IEC 100/4.294 plechov

Časť motoru	Veličina	Značka	Jednotka	Hodnota
Stator	Vonkajší priemer	$D_{outS}$	mm	150
	Vnútorný priemer	$D_{inS}$	mm	90
Rotor	Vonkajší priemer	$D_{outR}$	mm	89,4
	Vnútorný priemer	$D_{inR}$	mm	30

Tabuľka 2.4 obsahuje hlavné rozmery statorových a rotorových plechov. Vzduchová medzera  $\delta$  bola zasa volená 0,3mm. Z obrázku 2.5 je zrejmé, že stator obsahuje  $Q_1 = 24$  drážok a rotor  $Q_2 = 30$  drážok. Tento plech je v podstate typovo rovnaký ako IEC90/4.284, ale líši sa hlavnými rozmermi.



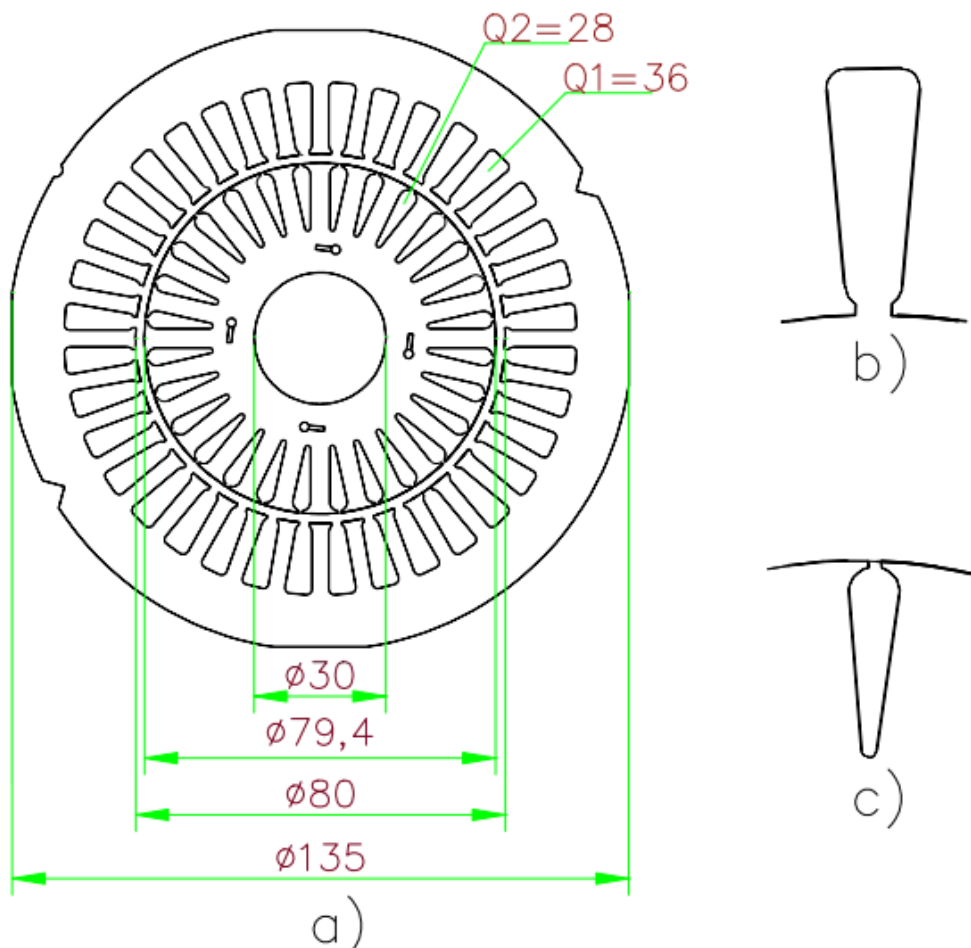
Obrázok 2.5 a) Plechy IEC100/4.294 stator a rotor b) statorová drážka c) rotorová drážka

### 2.2.3 Motor s využitím plechu IEC 90/4.836

Tento model je navrhnutý do satorových a rotorových plechov s rovnakým počtom drážok na rotore aj statore a podobnými rozmermi ako má JMO90-4S-90. Rozdiel v týchto plechoch tvoria najmä tvary drážok ale aj rozdielne satorové vŕtanie, ktoré sa líši o 4 mm. Tieto rozmery sú uvedené v tabuľke 2.5. Model bol navrhnutý na otestovanie zvýšenia účinnosti, znížením strát v statore na úkor strát v železe.

Tabuľka 2.5 Hlavné rozmery satoru a rotoru motorov s využitím IEC 90/4.836 plechov

Časť motoru	Veličina	Značka	Jednotka	Hodnota
Stator	Vonkajší priemer	$D_{outS}$	mm	135
	Vnútorý priemer	$D_{inS}$	mm	80
Rotor	Vonkajší priemer	$D_{outR}$	mm	79,4
	Vnútorý priemer	$D_{inR}$	mm	30



Obrázok 2.6 a) Plechy IEC90/4.836 satoru a rotoru b) satorová drážka c) rotorová drážka



Z obrázku 2.6 je vidieť, že stator obsahuje 36 drážok a rotor 28. Vzduchová medzera bola pre porovnateľnosť zasa zvolená na 0,3 mm.

### 2.3 Spôsoby zlepšovania účinnosti

V práci bolo použitých niekoľko spôsobov na zlepšenie účinnosti. Niektoré z nich bola inšpirovaná prácami z portálu [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org).

Použité spôsoby:

- Optimalizácia kapacity prevádzkového kondenzátoru
- Zmena počtu závitov statorového vinutia na optimálne sýtenie
- Zmena materiálu
- Zvýšenie osovej výšky  $OV$
- Predĺženie dĺžky železa  $l_{Fe}$

Optimalizácia kapacity prevádzkového kondenzátoru spočíva v nájdení takej kapacity, pri ktorej sa točivé magnetické pole motoru čo najviac podobá kruhovému tvaru a stroj by v tomto prípade mal mať čo najväčšiu účinnosť. Táto zmena bola v práci realizovaná experimentálnym menením kapacity po kroku 0,5  $\mu\text{F}$ .

Zmena počtu závitov na optimálne sýtenie spočíva v nájdení takeého počtu závitov, pri ktorých bude magnetická indukcia vo vzduchovej medzere mať takú veľkosť, že pri nej bude čo najvyššia účinnosť stroja. Občas po zmene počtu závitov je ešte raz potrebné doladiť veľkosť kapacity prevádzkového kondenzátora. Vhodný počet závitov sa dá nájsť experimentálne, pomocou simulovania motorov na rôznych napäťových hladinách ( $\pm 10\text{V}$ ,  $\pm 20\text{V}$ ,  $\pm 30\text{V}$ ) s doladením kapacity, aby bola zistená najvyššia účinnosť pri danom napätí. Ak sa nájde napätie, pri ktorom je účinnosť vyššia ako pri 230 V, tak sa závitov prerátajú podľa vzťahu:

$$N_x = \frac{N_{2301T} \cdot U_n}{U_x}, \quad (2.2)$$

kde  $N_x$  je neznámy počet závitov,  $N_{2301T}$  je počet závitov v jednej drážke pri 230 V,  $U_n$  je napájacie napätie (v tejto práci vždy 230 V) a  $U_x$  je hodnota napätia, pri ktorej bola zistená väčšia účinnosť ako pri 230 V.

Po zmene závitov je ešte potrebné prepočítať prierez vodiča aby bol dodržaný činiteľ plnenia drážky. Ináč by táto zmena nemusela znamenať optimalizáciu sýtenia, ale pri zmene závitov len manipuláciu s odporom vinutia (vzťah 1.9), ktorá by pri väčších zmenách mohla značne zmeniť účinnosť. Nový prierez vodiča sa určí ako:

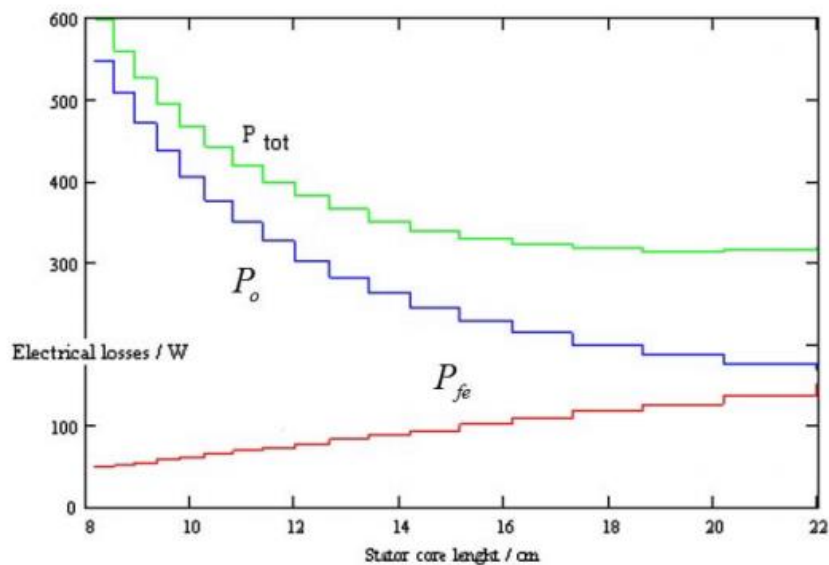
$$d = \sqrt{\frac{k_p \cdot S_D \cdot 4}{N_x \cdot \pi}}, \quad (2.3)$$

kde  $k_p$  je činiteľ plnenia drážky a  $S_D$  je plocha prierezu drážky.

Zmena materiálu je len jednoduchá úprava motoru, s využitím materiálu s menším stratovým číslom, táto vlastnosť zmenší straty v železe. V práci je ako lepší materiál použitý M250-50A.

Zvýšenie osovej výšky, táto úprava je použitá len pri jednom modeli, nakoľko táto zmena s účinnosťou zaručene pohne nahor, ale prináša so sebou aj nevýhodu, že motor sa stáva väčším a ťažším. Zvýšenie účinnosti touto zmenou spočíva v zväčšení prierezu plochy drážok  $S_D$  a pri dodržaní konštantného činiteľa plnenia aj medi obsiahnutej v danej drážke, čo povedie k zníženiu strát vo vinutí (vzťah 1.9). Zvýšením osovej výšky (pri  $l_{Fe} = \text{konšt.}$ ) narastie plocha vzduchovej medzery, čo pri rovnakom počte závitov povedie na zníženie indukcie vo vzduchovej medzere. Pre dosiahnutie vyššej účinnosti sa ukáže, že je lepšie indukciu v medzere znovu zvýšiť pomocou zníženia počtu závitov. Znížením počtu závitov (pri  $k_p = \text{konšt.}$ ) sa skrátí dĺžka a zväčší prierez vodiča, čo zníži odpor statorového vinutia a dôjde k poklesu strát vo vinutí.

Podľa [11] sa predlžovaním statorového zväzku  $l_{Fe}$  budú straty v medi zmenšovať na úkor strát v železe a tým bude rásť účinnosť stroja, pretože ako už bolo spomenuté v kapitole 1.6 tak straty v medi majú na celkových stratách niekoľkonásobne väčší podiel ako straty v železe. Táto skutočnosť je zobrazená na obrázku 2.7.



Obrázok 2.7 Závislosť celkových strát ( $P_{tot}$ ), strát v železe ( $P_{fe}$ ) a strát vo vinutí ( $P_o$ ) na dĺžke zväzku  $l_{Fe}$  [11]

### 3. VÝPOČET A SIMULÁCIA RMXPRT MODELOV

Táto kapitola sa zaoberá výpočtom určitých parametrov pre návrh riešených variant motorov a následnému vytváraniu modelov pomocou programu RMXprt.

RMXprt (Rotation Machine Expert) je špeciálny softvér pre optimalizáciu a rýchly návrh točivých elektrických strojov. Dajú sa pomocou neho porovnávať prvotné návrhy a vykonávať mnoho parametrických analýz počas niekoľkých sekúnd. Pomocou tohto programu možno tiež simulovať kritické parametre strojov pri normálnych prevádzkových podmienkach, pri stave naprázdno aj pri zablokovanom rotore. Výstupné veličiny sú väčšinou momentové charakteristiky, straty, účinnosť, indukcia vo vzduchovej medzere, indukčnosť vinutia a rozptyl.

Program využíva klasickú analytickú teóriu točivých elektrických strojov a magnetických obvodov. Na výpočet indukcie vzduchovej medzery sa používa spresnená Schwarz-Christoffelova transformácia. Straty vírivými prúdmi, hysterézne straty, indukčnosť, rozptyl, vplyv laminácie, spôsobu vinutia a niektoré 3D efekty (napríklad skosenie rotoru) sa stanovujú na základe analytických vzťahov. Výpočet saturácie v náhradnej obvodovej schéme je veľmi rýchly a presný práve vďaka vylepšeným iteratívnym algoritmom, to umožňuje efektívne zohľadnenie nelineárnych magnetických vlastností materiálov. Vytváranie modelov v tomto programe je veľmi intuitívne.

Výsledky programu RMXprt sú na konci tejto kapitoly v 3.5 a ich porovnanie s výsledkami z programu Ansys Maxwell je v kapitole 4.5, kde sú porovnané aj realitou.

Všetky informácie boli čerpané zo stránky svsfem.cz [12].

#### 3.1 RMXprt modely s plechom IEC90/4.284

Do programu boli zadané všetky geometrické rozmery dostupné z výkresovej dokumentácie. To znamená rozmery statoru a rotoru, rozmery statorových a rotorových drážok, dĺžka zväzku, počet pólov, počet drážok. Ďalej menovité otáčky, výkon a napätie.

Materiál bol volený rovnaký ako je použitý v motore JMO90-4S-90, M470-50A, kvôli dobrej porovnateľnosti výsledkov. Hodnoty boli vybrané z katalógu firmy Cogent Power.

Merné straty v železe boli navýšené, lebo podľa [13] „Vplyvom opracovania (náhodné spojenia jednotlivých plechov britmi a porušenie štruktúry pri razení plechov) sú vírivé straty väčšie.“

Koeficient opracovania  $k_{op}$  nadobúda hodnôt (1,5 - 3). Straty spôsobené opracovaním zubov boli do modelu zahrnuté vynásobením strát závislých na indukciu, uvedených v katalógu, zvolenou hodnotou koeficientu opracovania  $k_{op} = 1,6$ .

Nakoniec boli vytvorené jednotlivé vinutia motoru. Rotorové vinutie je určené štyrmi hlavnými parametrami: šírka a výška rotorových krúžkov a materiály tyčí a krúžkov.

Rotorové tyče a krúžky boli obe zvolené typicky z hliníku (aluminum\_no3\_EC), s rovnakou vodivosťou ako hliník v motore JMO90-4S-90 (27 MS/m)

Hodnoty týchto parametrov sú pre všetky motory s plechom IEC90/4.284 rovnaké.

### 3.1.1 Výpočet vybraných parametrov

Z kapitoly 3.1 je zrejmé, že v nej uvedené hodnoty nie sú dostatočné pre vytvorenie modelov, preto bolo potrebné určiť parametre dopočítať. Parametre sú počítané pre model s 1 vrstvovým vinutím a sú brané ako približná hodnota, ktorá sa ešte bude musieť upresniť podľa výsledkov modelov v RMxprt. Nakoľko sa neočakáva zásadná zmena týchto parametrov pri zmene vinutia, boli dopočítané len pre jeden model. Pri výpočtoch sa vychádzalo z kníh Jednofázové indukčné motory [6] a Stavba elektrických strojů [13].

Vzduchová medzera  $\delta$  bola vypočítaná podľa [13] ako:

$$\delta = 5^3 \sqrt{\frac{D_{\text{ins}}^2 \cdot l_{\text{Fe}}}{2p}} = 5^3 \sqrt{\frac{0,08^2 \cdot 0,09}{2 \cdot 2}} = 0,262 \text{ mm} , \quad (3.1)$$

Veľkosť vzduchovej medzery sa zvolí 0,3 mm, aby boli motory čo najlepšie porovnateľné s JMO90-4S-90. Ďalej je potrebné určiť magnetický tok  $\Phi$  tak bolo možné určiť počet závitov hlavnej fázy  $N_A$ . Magnetický tok  $\Phi$  sa určí podľa [6]:

$$\Phi = \frac{l_{\text{Fe}} \cdot D_{\text{ins}} \cdot B_{\delta}}{p} = \frac{0,09 \cdot 0,08 \cdot 0,75}{2} = 2,7 \text{ mWb} , \quad (3.2)$$

kde  $B_{\delta}$  je magnetická indukcia vo vzduchovej medzere a bola zvolená  $B_{\delta} = 0,75 \text{ T}$ .

Pred samotným výpočtom počtu závitov je potrebné ešte určiť činiteľ vinutia  $\chi_a$ . Činiteľ vinutia sa vypočíta ako súčin činiteľu rozlohy a činiteľu skrátenia kroku, ktorý je zvolený 1. Činiteľ rozlohy je pomer medzi geometrickým a algebraickým súčtom indukovaných napätí jednotlivých cievok, ktoré tvoria fázové vinutie. [6]

Je možné ho určiť aj graficky z obrázku 3.1. Z obrázku je zrejmé, že motor má na 1 fázu v 1 póle vyhradené 3 drážky a tiež, že posun medzi jednotlivými cievkami je  $30^\circ$  elektrických. Takže činiteľ vinutia sa určí ako:

$$\chi_a = 1 \cdot \frac{1+2\cos(30)}{3} = 0,911, \quad (3.3)$$

Závity hlavného a aj pomocného vinutia (pretože stroj je uvažovaný ako symetrický (3.1.2) je možné vypočítať podľa vzťahu:

$$N_A = N_B = \frac{U(1 - \varepsilon_1)}{4,44f\chi_a\Phi} = \frac{230(1 - 0,04)}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,911 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3}} = 404,36 \quad (3.4)$$

kde  $\varepsilon_1$  je pomerný úbytok napätí na rozptylovej impedancii statoru. Táto hodnota sa odhaduje na  $\varepsilon_1 = 0,04$ . Počet závitov volíme  $N_A = N_B = 402$ . Do RMxprt je však potrebné zadať počet závitov v 1 drážke, ten sa dá vypočítať ako:

$$N_{1T} = \frac{402 \cdot 2}{12} = 67 \quad (3.5)$$

Počet závitov v 1 drážke teda bude  $N_{1T} = 67$ .

Ďalej je potrebné určiť prierez vodiča, ktorý je odvodený zo vzťahu pre činiteľ plnenia  $k_p$ . Prierez je odvodený z tohto vzťahu, aby bol dodržaný pomer prierezu medi voči prierezu drážky vo všetkých motoroch (kvôli ich vyrobiteľnosti). Činiteľ plnenia  $k_p$  sa vypočíta ako pomer obsahu čistej medi v drážke ku obsahu drážky.

$$k_p = \frac{S_{Cu}}{S_D} \quad (3.6)$$

Vzťah 3.6 je možné napísať ako:

$$k_p = \frac{N_{1T} \cdot \pi \cdot d^2}{4S_D} \quad (3.7)$$

A odtiaľ sa priemer vodiča vypočíta ako:

$$d = \sqrt{\frac{k_p \cdot S_D \cdot 4}{N_{1T} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{0,41 \cdot 102,9 \cdot 4}{67 \cdot \pi}} = 0,895 \text{ mm} \quad (3.8)$$

Hodnota  $k_p = 0,41$  je pre motor JM090-4S-90, je to maximálna hodnota, ktorá je obsiahnutá v drážke tohto motoru a jej výpočet je uvedený v kapitole 3.2. Hodnota plochy drážky  $S_D$  je z výkresovej dokumentácie plechu.

Ako posledný krok je potrebné odhadnúť veľkosť kapacity prevádzkového kondenzátoru  $C_b$ . Kapacita sa určí zo vzťahu [6]:

$$C_b = \frac{3180I_C}{U_C} \quad (3.9)$$

Kde  $U_C$  je napätie na kondenzátore a  $I_C$  je prúd prechádzajúci kondenzátorom. Keďže motor je uvažovaný so symetrickým vinutím a kondenzátor má byť navrhnutý tak, aby rozloženie prúdov vo fázach bolo rovnaké tak je možné uvažovať  $I_A=I_B=I_C$ . Kde  $I_A$  a  $I_B$  sú prúdy hlavnou a pomocou fázou. Prúd kondenzátoru sa teda určí ako:

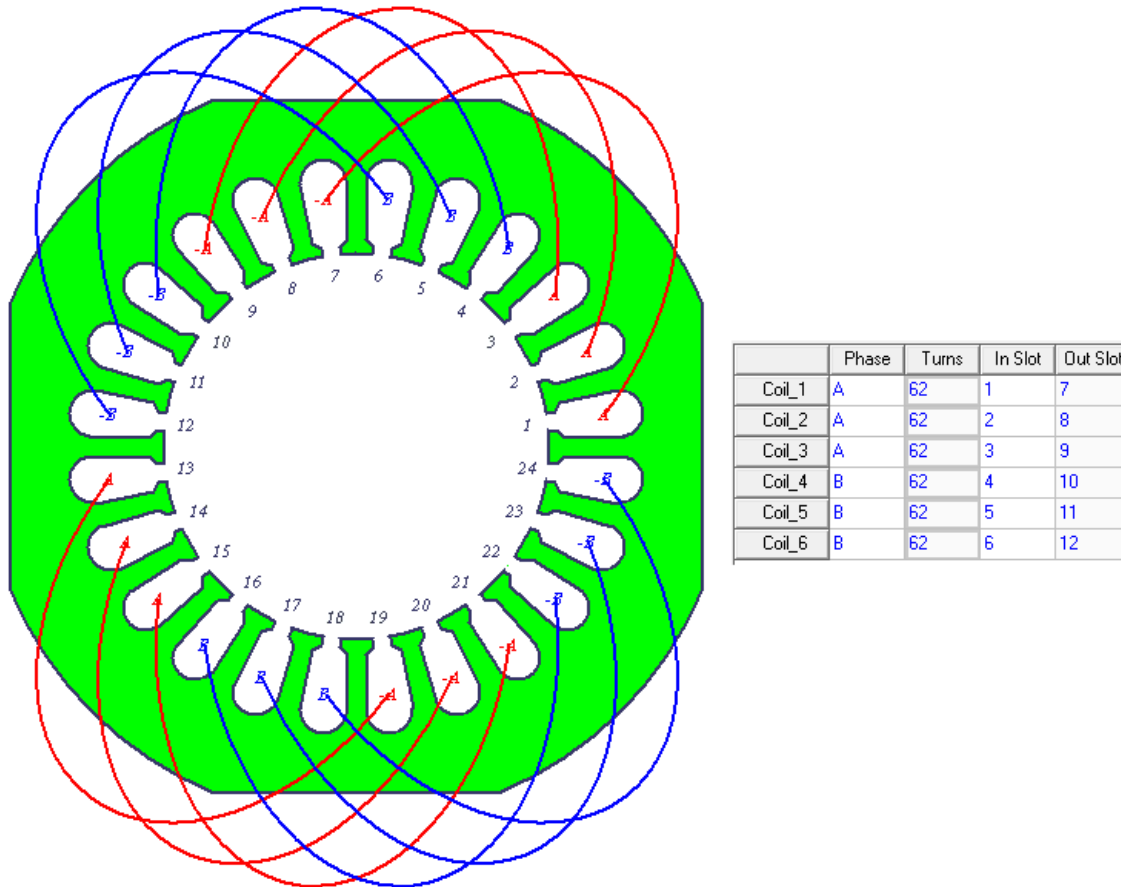
$$I_C = \frac{P}{2U \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{1100}{2 \cdot 230 \cdot 0,743 \cdot 0,98} = 3,284 \text{ A} \quad (3.10)$$

Hodnoty výkonu, účinnosti a účinníku sú z katalógu pre motor JMO90-4S-90. Odhadovaná veľkosť kapacity teda podľa vzťahu 3.9 bude:

$$C_b = \frac{3180I_C}{U_C} = \frac{3180 \cdot 3,284}{\sqrt{230^2 + 230^2}} = 32,1 \text{ } \mu\text{F} \quad (3.11)$$

### 3.1.2 Jedno vrstvé vinutie

V tomto modeli bolo zvolené menej časté jedno vrstvé symetrické vinutie, s ktorým by sa mal motor podobať na súmerný dvojfázový stroj a jeho točivé pole by malo mať kruhový tvar a tým zlepšiť účinnosť motoru. Toto vinutie je znázornené na obrázku 3.1, z obrázku je zrejmé, že na hlavnú aj pomocnú fázu pripadá 12 drážok.



Obrázok 3.1 Jedno vrstvé symetrické vinutie v programe RMxprt

Motor s dopočítanými hodnotami z kapitoly 3.1.1 dosahuje účinnosť 79,68%. Túto účinnosť je ešte možné zvýšiť podľa spôsobov uvedených v kapitole 2.3. Prvé úpravy na zvýšenie účinnosti boli doladenie kapacity  $C_b$  a nájdenie vhodného počtu závitov. Nový počet závitov bol dopočítaný podľa vzťahu 2.2, kedy maximálna účinnosť bola nájdená pri napájacom napätí 250V.

$$N_x = \frac{N_{2301T} \cdot U_n}{U_x} = \frac{67 \cdot 230}{250} = 61,64$$

Počet závitov v 1 drážke sa zvolí na 62. Ešte je však potrebné dopočítať prierez vodiča tak, aby bol dodržaný činiteľ plnenia drážky  $k_p$ . Prierez sa určí podľa vzťahu 2.3 ako

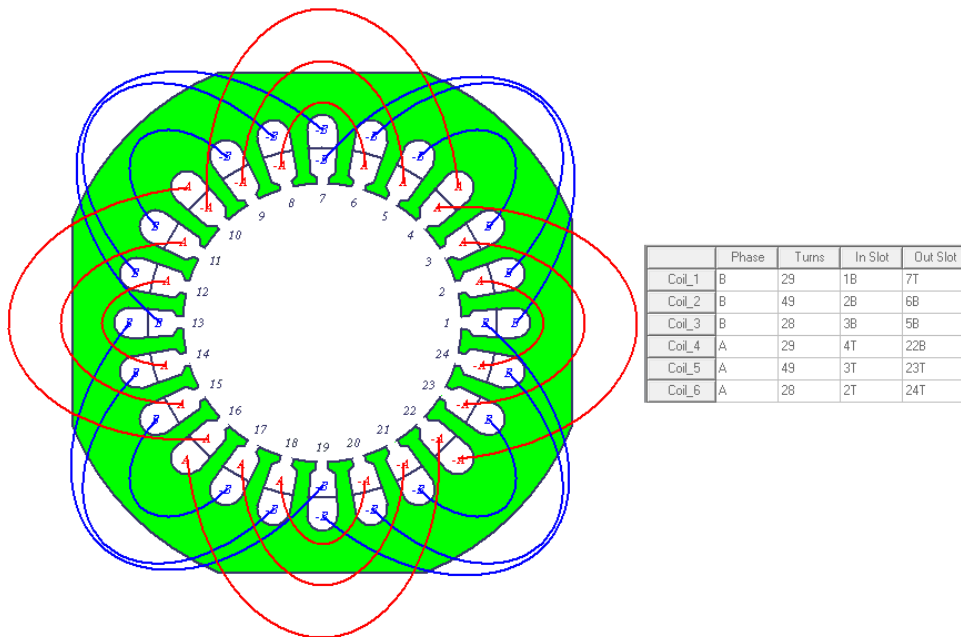
$$d = \sqrt{\frac{k_p \cdot S_D \cdot 4}{N_{1T} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{0,41 \cdot 102,9 \cdot 4}{62 \cdot \pi}} = 0,9308 \text{ mm}$$

Pri týchto parametroch vinutia ( $N_{IT} = 62$  a  $d = 0,9308$  mm) bola experimentálne nájdená veľkosť kapacity prevádzkového kondenzátora  $C_b = 38 \mu\text{F}$ . Účinnosť motoru po týchto úpravách je len  $\eta = 80,31\%$ . Čo stále nestačí na dosiahnutie účinnostnej triedy IEC2 (81,4%).

Preto boli využité ešte ďalšie dve úpravy. A to konkrétne zmena materiálu na M250-50A. Po ktorej by sa zasa malo nájsť optimálne sýtenie motoru, v tomto prípade sa však nezmenila ani veľkosť kondenzátoru ani počet závitov a účinnosť sa dostala až na hodnotu  $\eta = 81,38\%$ . Čo už sa výrazne priblížilo hodnote 81,4%. Ako posledná úprava pre tento model bolo predĺženie statorového zväzku, k úprave sa pristúpilo práve preto, aby bola prekonaná minimálna požadovaná účinnosť. Dĺžka zväzku  $l_{Fe}$  bola zväčšená o 10 mm čiže nová dĺžka zväzku je  $l_{Fe} = 100$  mm. Po zmene dĺžky zväzku je zasa potrebné optimalizovať sýtenie pomocou počtu závitov a následnej zmeny kapacity. Po týchto úpravách bola v RMXprt vypočítaná účinnosť  $\eta = 82,12\%$ .

### 3.1.3 Dvoj vrstvé sínusové vinutie

Ako ďalšie vinutie do plechu IEC90/4.284 bolo navrhnuté symetrické sínusové rozloženie vinutia. Pri tomto vinutí bola do úvahy braná možnosť zlepšenia priebehu indukcie vo vzduchovej medzere a tým buď zvýšiť účinnosť alebo zlepšiť parametre stroja (napríklad zvlnenie momentu). Na obrázku 3.2 je znázornené rozloženie tohto vinutia.



Obrázok 3.2 Dvoj vrstvé sínusové symetrické vinutie v programe RMXprt

Motor bol zase optimalizovaný podľa rovnakých postupov ako predošlý model, zmenou počtu závitov a kapacity a po týchto úpravách dosiahol účinnosti  $\eta = 79,27\%$ . Následná zmena materiálu na M250-50A priniesla zlepšenie len na  $\eta = 80,07\%$  a bolo

usúdené, že zväčšenie dĺžky zväzku o 10mm na dosiahnutie účinnostnej triedy IE2 nestačí a model už ďalej nebol zlepšovaný, keďže predlžovanie o ďalšie milimetre by mohlo výraznejšie skomplikovať montáž do kostry, prípadne do koncového zariadenia.

### 3.1.4 Dvoj vrstvé sinusové vinutie s doplnením prázdnejších drážok

Zo sinusového rozloženia vinutia je zrejmé, že niektoré drážky ostávajú prázdnejšie, preto bolo v tomto modeli vyskúšané tieto prázdne drážky doplniť na maximálny činiteľ plnenia zo stroja JMO90-4S-90  $k_p = 0,41$ . Rozloženie vinutia je teda rovnaké ako v kapitole 3.1.3 a je znázornené na obrázku 3.2, líši sa však počtom vodičov v určitých drážkach, ten je uvedený v tabuľke 3.1 (už pre optimalizovaný motor s prerátaním na nový počet závitov).

Tabuľka 3.1 Rozloženie vodičov v drážkach motoru

	Fáza	Závity	In Slot	Out Slot
<b>Coil_1</b>	B	34	1B	7T
<b>Coil_2</b>	B	43	2B	6B
<b>Coil_3</b>	B	25	3B	5B
<b>Coil_4</b>	A	34	4T	22B
<b>Coil_5</b>	A	43	3T	23T
<b>Coil_6</b>	A	25	2T	24T

Tento motor by mal dosiahnuť vyššej účinnosti nakoľko má väčší celkový prierez medi. Motor dosahuje účinnosť  $\eta = 80,12\%$  len s optimálnym kondenzátorom a počtom závitov, preto má zmysel uvažovať o predĺžení dĺžky železa ak by nebola dosiahnutá potrebná účinnosť iba zmenou materiálu.

S použitím materiálu M250-50A motor dosahuje účinnosti  $\eta = 80,99\%$ , po predĺžení na  $l_{Fe} = 100$  mm motor dosiahol účinnosť až  $\eta = 81,7\%$ .

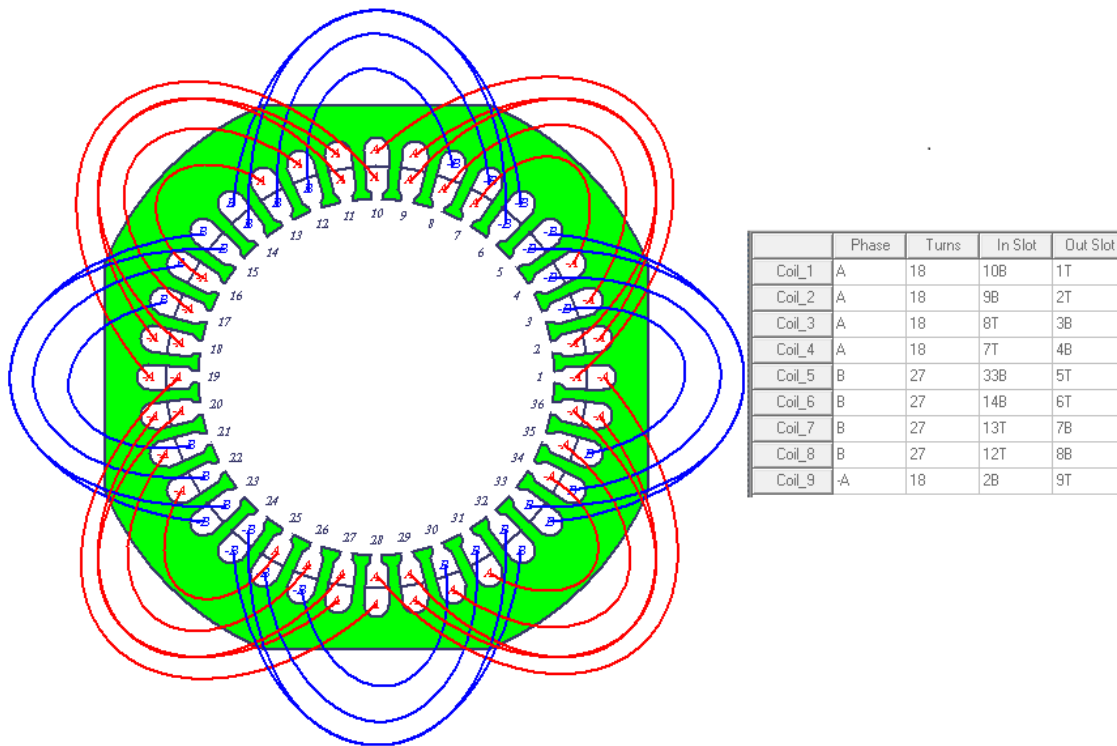
## 3.2 RMxprt model pôvodného motoru JMO90-4S-90

Tento model bol analyzovaný, predovšetkým preto, aby bolo možné posúdiť presnosť výpočtov porovnaním s nameranými hodnotami a aby sa zistilo, či je možné zvýšiť účinnosť bez nejakých väčších úprav. Do programu boli zadané všetky parametre motoru dostupné z výkresovej dokumentácie dodanej firmou EMP s.r.o. podobne ako v kapitole 3.1. V motore je použitý materiál M470-50A. Statorové vinutie je dvoj vrstvé a rozloženie drážok medzi jednotlivé fázy a počet závitov v drážke je možné vidieť na obrázku 3.3.

Pred realizovaním úprav na zvýšenie účinnosti je potrebné si model porovnať s protokolmi z merania dodaných firmou JMO90-4S-90, či naozaj sedia simulované hodnoty s výsledkami z merania. Z tejto kontroly bolo zistené, že odpory pomocnej a hlavnej fázy sa nezhodujú s protokolmi z merania. Táto chyba sa zmenší predĺžením



dĺžky pol závitu na reálnu hodnotu (funkcia *extended length*), ktorá sa vypočíta na základe hodnôt z výkresovej dokumentácie. Porovnanie s meraním je uvedené v kapitole 4.4.



Obrázok 3.3 Vinutie motoru JMO90-4S-90 v programe RMxprt

Aj pri tomto motore boli zrealizované úpravy závitov, kapacity tak, aby sa zistilo, či je motor v bode, kde má najväčšiu účinnosť. Už na začiatku úprav je však zrejmé, že len zmenou závitov a kapacity sa z účinnosti 75,89% nie je možné dostať na 81,4%.

Pre motor bola nájdená najväčšia účinnosť pri napätí 220V, keďže má motor rozdielny počet závitov v hlavnej a pomocnej fázy, je potrebné určiť nový počet závitov pre každú fázu zvlášť. Pre hlavnú fázu sa závitov určia podľa 2.2 ako:

$$N_{H1T} = \frac{N_{2301T} \cdot U_n}{U_x} = \frac{18 \cdot 230}{220} = 18,82$$

Počet závitov v drážke pre hlavnú fázu sa zvolí  $N_{H1T} = 19$ . Pre pomocnú fázu sa závitov určia obdobne:

$$N_{P1T} = \frac{N_{2301T} \cdot U_n}{U_x} = \frac{27 \cdot 230}{220} = 28,23$$

Počet závitov v drážke pre pomocnú fázu sa zvolí  $N_{P1T} = 28$ . Ďalej je potrebné určiť prierez vodičov v oboch fázach. K tomu je ale ešte pred tým nutné vypočítať činiteľ plnenia drážky hlavnej  $k_{ph}$  a pomocnej fáze  $k_{pp}$  podľa vzťahu 3.7:

$$k_{ph} = \frac{N_{1T} \cdot \pi \cdot d^2}{4S_D} = \frac{36 \cdot \pi \cdot 0,615^2 \cdot 2}{58,599 \cdot 4} = 0,36$$

$$k_{pp} = \frac{N_{1T} \cdot \pi \cdot d^2}{4S_D} = \frac{54 \cdot \pi \cdot 0,53^2 \cdot 2}{58,599 \cdot 4} = 0,41$$

Prierez vodiča hlavnej fázy sa potom podľa 2.3 určí ako:

$$d = \sqrt{\frac{k_p \cdot S_D \cdot 4}{N_{1T} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{0,36 \cdot 58,599 \cdot 4}{38 \cdot \pi \cdot 2}} = 0,594 \text{ mm}$$

A pomocnej fáze:

$$d = \sqrt{\frac{k_p \cdot S_D \cdot 4}{N_{1T} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{0,41 \cdot 58,599 \cdot 4}{56 \cdot \pi \cdot 2}} = 0,523 \text{ mm}$$

Po týchto dvoch základných úpravách je účinnosť motoru len 77,45%, je teda zrejmé, že ani zmenou materiálu a predĺžením motoru o 10mm nie je možné dosiahnuť potrebnú účinnosť. Pre zaujímavosť, účinnosť po zmene materiálu a predĺžení zväzku bude 79,67%.

### 3.3 RMxprt model motoru s využitím IEC 90/4.836

Tento model je vlastne upravený JMO90-4S-90 s využitím KS plechov. Má rovnaké vinutie ako na obrázku 3.3. Rozloženie vodičov v drážkach je v tabuľke 3.2.

Tabuľka 3.2 Rozloženie vodičov v drážkach motoru

	Fáza	Závity	In Slot	Out Slot
Coil_1	A	19	10B	1T
Coil_2	A	19	9B	2T
Coil_3	A	19	8T	3B
Coil_4	A	19	7T	4B
Coil_5	B	30	33B	5T
Coil_6	B	30	14B	6T
Coil_7	B	30	13T	7B
Coil_8	B	30	12T	8B
Coil_9	-A	19	2B	9T

Po nájdení najvhodnejšej kapacity a počtu vodičov motor dosahuje účinnosť iba 77,52%, čo je len o 0,07% viac ako JMO90-4S-90 rovnako optimalizovaný na maximálnu účinnosť.

### 3.4 RMxprt model motoru s využitím IEC100/4.924

Ako posledná možnosť bol zvolený rovnaký motor ako v kapitole 3.1.2, ale s plechmi o rad vyššou osovou výškou. Tento motor by mal s rezervou prekonať účinnosť 81,4%. Na obrázku 3.1 je znázornené rozloženie vinutia a motor má v každej drážke 59 závitov. Tento motor dosahuje po optimalizácii účinnosť 82,55% a s použitím plechov M250-50A dosahuje účinnosť až 83,77%.

### 3.5 Porovnanie výsledkov získaných z programu RMxprt

V tabuľke 3.3 sú znázornené iba niektoré veličiny získané z výpočtu, celá tabuľka sa nachádza v prílohe A.3 a A.4.

Tabuľka 3.3 Straty a účinnosti získané z programu RMxprt pre motory s materiálom M470-50A

Značka a jednotka	Model motoru						
	KS plechy					JMO90-4S-90	
	1V	2V sin	2V sin dopl.	1V	2V JMO	Pôvodný	Optim.
$l_{Fe}$ [mm]	90	90	90	90	90	90	90
$l_{ov}$ [mm]	90	90	90	100	90	90	90
$P_1$ [W]	1369	1388	1372	1334	1419	1451	1421
$P_2$ [W]	1099	1100	1099	1101	1100	1101	1100
$\Delta P_K$ [W]	12,77	11,71	11,75	11,48	10,64	16,22	11,21
$\Delta P_{JS}$ [W]	123,7	143,5	128,8	94,98	166,0	198,6	174,3
$\Delta P_{JR}$ [W]	53,26	51,21	50,63	40,58	52,67	44,27	51,78
$\Delta P_{Fe}$ [W]	37,74	39,21	39,37	42,78	47,55	47,52	40,84
$\Delta P_D$ [W]	42,04	42,15	42,17	42,93	42,15	42,93	42,24
$\Delta P_C$ [W]	269,5	287,8	272,7	232,8	319,0	349,7	320,4
$\eta$ [%]	80,31	79,27	80,12	82,55	77,52	75,89	77,45

Z tabuľky 3.3 je možné vidieť, že iba zmenou kondenzátoru a počtu závitov sa účinnosť nijak extrémne nezvýši, tak isto použitie KS plechu s 36 drážkami na statore a 28 na rotore s rovnakým vinutím ako má JMO90-4S-90 nedokáže zaručiť požadovanú účinnosť. Pri symetrických vinutiach či už jedno vrstvomých aj dvoj vrstvomých a plechoch s 24 drážkami na statore a 30 na rotore sa pohybuje účinnosť oveľa vyššie. Dokonca pri modely s osovou výškou  $l_{ov} = 100$  mm je možné dosiahnuť účinnostnej triedy IEC2. Toto riešenie je už však značný zásah do konštrukcie motora a ak by bol motor zväčšený napríklad na úkor rebier kostry, môže kľudne hroziť, že by sa zhoršilo chladenie. Preto toto riešenie nie je najlepšie, ale v krajných prípadoch je možné ho využiť. Z tabuľky v prílohe A.3 je tiež zrejmé, že touto úpravou by sa značne zmenil maximálny moment motoru  $M_{max}$  a momentová preťažiteľnosť by klesla o 0,36. Záver pre materiál M470-50A je taký, že pre použité úpravy na modeloch v kombinácii s týmto materiálom nedosahujú požadovanej účinnosti, preto je potrebné použiť lepší materiál, to už však so sebou prináša aj vyššie náklady.

V tabuľke 3.4 sú znázornené straty a účinnosti jednotlivých motorov s použitím materiálu M250-50A, ďalej sú tam aj modely, u ktorých bola predĺžená dĺžka zväzku, pretože bol predpoklad, že motor dosiahne požadovanú účinnosť 81,4%. Z tabuľky 3.4 je tiež zrejmé, že využitím JMO90-4S-90 vinutia nebude možné dosiahnuť požadovanú

účinnosť, preto pre tieto modely ani nebola zväčšovaná dĺžka zväzku, pretože na dosiahnutie IEC2 by bolo motor nutné predĺžiť pravdepodobne aj o viac ako 20mm.

Podľa výsledkov z RMxprt sa teda podarilo dosiahnuť účinnosť triedu IEC2 až pri troch modeloch. Motoru s využitím jedno vrstvového vinutia (prvý stĺpec v tabuľke 3.4) chýba len 0,02%, nakoľko RMxprt nie je úplne presný a podľa kapitoly 4.4 môže účinnosť vychádzať o niečo menšia, je teda možné aj tento výsledok považovať za úspech a to aj z toho dôvodu, že motor má rovnaké rozmery ako pôvodný JMO90-4S-90 a netreba ho nijak zväčšovať.

Ďalej je jasné, že výroba motorov splňujúcich požiadavky by bola drahšia, keďže z tabuľky v prílohe A.5 je zrejmé, že motory obsahujú viac medi, niektoré sú dlhšie a hlavne sú vyrobené z drahšieho materiálu.

Tabuľka 3.4 Straty a účinnosti získané z programu RMxprt pre motory s materiálom M250-50A

Značka a jednotka	Model motoru							
	KS plechy						JMO90-4S-90	
	1V		2V sin		2V sin dopl.		1V	2V JMO
$l_{Fe}$ [mm]	90	100	90	90	100	90	90	90
$l_{OV}$ [mm]	90	90	90	90	90	100	90	90
$P_1$ [W]	1352	1339	1375	1356	1346	1313	1402	1403
$P_2$ [W]	1101	1100	1101	1098	1100	1100	1102	1100
$\Delta P_K$ [W]	12,57	12,82	12,24	12,20	11,30	10,63	10,83	10,50
$\Delta P_{JS}$ [W]	123,9	113,7	144,7	130,9	120,0	95,52	159,5	174,8
$\Delta P_{JR}$ [W]	51,99	46,72	54,18	50,23	50,53	37,98	66,35	53,47
$\Delta P_{Fe}$ [W]	21,29	23,71	20,92	22,3	22,38	25,96	22,03	21,89
$\Delta P_D$ [W]	42,07	42,42	41,99	42,18	42,2	43,09	41,44	42,13
$\Delta P_C$ [W]	251,8	239,4	274,0	257,8	246,4	213,2	300,1	302,8
$\eta$ [%]	81,38	82,12	80,07	80,99	81,70	83,77	78,59	78,42

## 4. SIMULÁCIA MODELOV V ANSYS MAXWELL

Maxwell je program, ktorý slúži na simuláciu nízkofrekvenčných elektromagnetických polí. Na výpočty používa metódu konečných prvkov a dokáže simulovať polia vo frekvenčnej aj časovej oblasti. Vyznačuje sa zohľadňovaním rotačného a translačného pohybu telies v elektromagnetickom poli a automatickou tvorbou siete. Maxwell sa používa na návrh a analýzu solenoidov, elektromotorov, generátorov, senzorov a transformátorov. Je veľmi vhodný na efektívne simulácie elektromechanických alebo elektronických systémov a ich optimalizáciu práve vďaka širokému rozsahu spolupráce s inými špecializovanými programami. Všetky informácie boli čerpané zo stránky svsfem.cz [12].

V tejto kapitole sa práca venuje simulácii určitých modelov v programe Ansys Maxwell, program bol zvolený kvôli presnejším výstupom z výpočtu ako RMXprt. Zvýšená presnosť výpočtu so sebou prináša aj dlhšiu dobu výpočtu, práve kvôli dĺžke výpočtov sa v Maxwelli neoveroval každý model, ale len vybrané motory:

- Motor s 1V vinutím  $l_{ov} = 90$  mm,  $l_{Fe} = 100$  mm
- Motor s 1V vinutím  $l_{ov} = 100$  mm,  $l_{Fe} = 90$  mm
- Motor s 2V sin. vinutím s doplnenými drážkami  $l_{ov} = 90$  mm,  $l_{Fe} = 100$  mm
- JMO90-4S-90

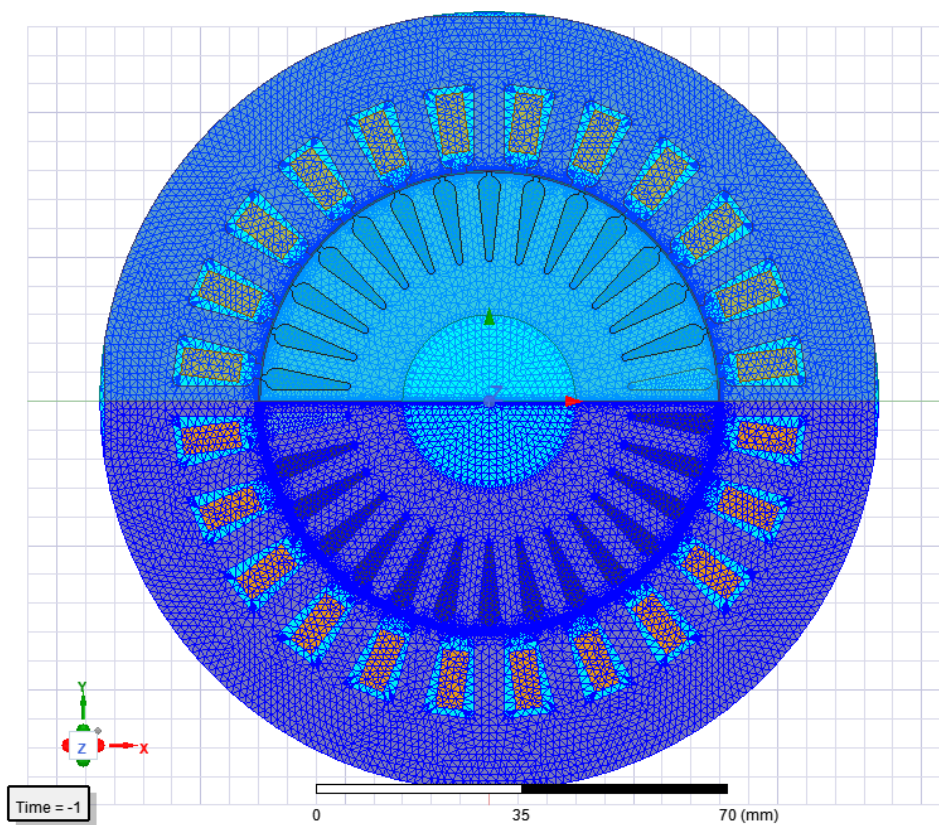
### 4.1 Motory s 1V vinutím

Tieto dva motory sú zhrnuté v jednej podkapitole, pretože vytváranie ich Maxwell modelu sa nijak nelíši. Nakoľko všetky modely už sú vytvorené v programe RMXprt nie je potrebné ich znova vytvárať v Maxwell, ale stačí exportovať RMXprt model.

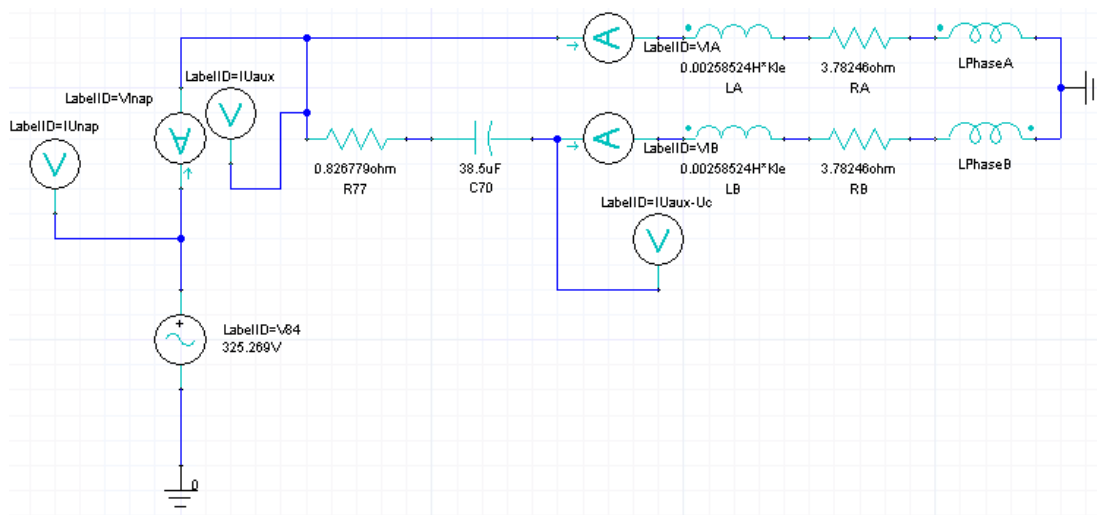
Po vytvorení Maxwell modelu z RMXprt si program zoberie všetky geometrické rozmery motoru a tak isto všetky ostatné parametre (odpor, kapacita, informácie o vinutí atď.) Pred začiatkom simulácie je ale potrebné zmeniť určité nastavenia modelu.

Na začiatok je vhodné si do obvodového modelu (obrázok 4.2) pridať voltmetre a ampérmetre, aby následne bolo možné dopočítať určité parametre (napríklad príkon). Na určitú presnosť výpočtu je nutné mať vhodne zvolenú sieť (mesh) obrázok 4.1 a čas kroku simulácie. Vo všetkých modeloch v tejto práci je sieť hustá minimálne 3-4 elementy na najmenšiu šírku. Krok simulácie bol zvolený na 500 krokov na periódu a celková dĺžka simulácie je 0,2 s. Ako posledné je potrebné skontrolovať materiál, keďže Maxwell si vytvorí „vlastný“ materiál ak nie je splnená podmienka, že posledné dva body BH krivky majú menší sklon ako 2. Na dosiahnutie tohto sklonu je nutné si BH krivku materiálu odhadom extrapolovať napríklad v programe excel a zaručiť sklon posledných dvoch bodov menší ako 2.

Po splnení týchto podmienok je možné zapnúť simuláciu, dĺžka simulácie motorov v tejto práci trvala približne 6 až 8 hodín.



Obrázok 4.1 Sieť motorov 1V v programe Maxwell

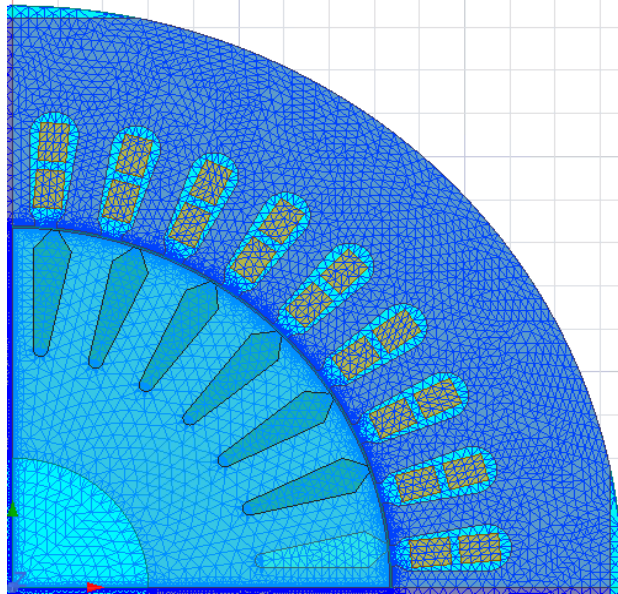


Obrázok 4.2 Obvodový model motorov 1V v programe Maxwell

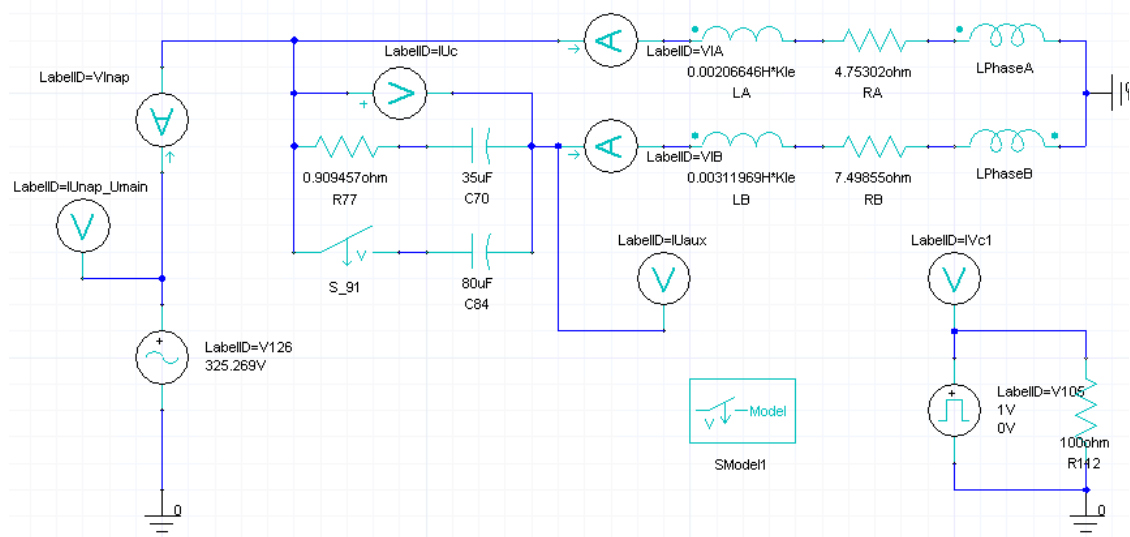
## 4.2 Maxwell model JMO90-4S-90

Tento model rovnako ako modely 1V bol len exportovaný z RMXprt a podobne ako v kapitole 4.1 boli upravené otáčky na pracovný bod, materiál a vytvorená dostatočne hustá sieť, aby sa výsledok čo najviac približoval realite.

Na obrázku 4.3 je znázornená sieť motoru JMO90-4S-90 a na obrázku 4.4 je obvodový model v programe Maxwell, tento obvodový model sa trochu líši od toho v kapitole 4.1 pretože tento motor je uvažovaný aj s rozbehovým kondenzátorom.



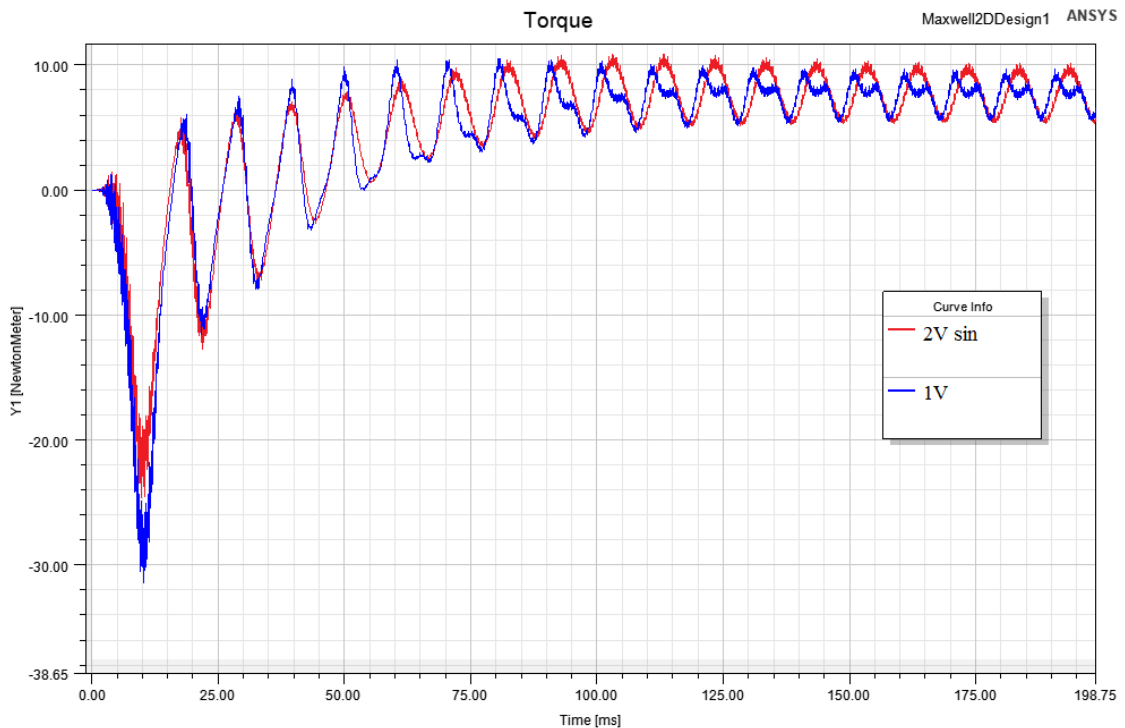
Obrázok 4.3 Sieť motoru JMO90-4S-90 v programe Maxwell



Obrázok 4.4 Obvodový model motoru JMO90-4S-90 v programe Maxwell

### 4.3 Maxwell model s 2V vinutím

Tieto modely boli vytvorené na základe všeobecných poznatkov, ktoré hovoria o zlepšení tvaru priebehu indukcie vo vzduchovej medzere. Vďaka čomu by sa mal zlepšiť priebeh momentu znížiť zvlnenie poprípade hluk. Z obrázku 4.5 je však vidieť, že priebehy momentov pre oba druhy vinutí sú si veľmi podobné a je tiež vidieť, že zvlnenie momentu sa použitím tohto vinutia veľmi nezmenší.



Obrázok 4.5 Priebeh momentov s 1V a 2V vinutiami

### 4.4 Porovnanie výsledkov z merania, RMxprt a Maxwell

Výsledky simulácií je potrebné porovnať s výsledkami z merania, aby bola overená presnosť výpočtu v programoch Maxwell a RMxprt. Výsledky tohto porovnania stanovia, ktorý zo simulačných programov je vhodnejší a ktorého výsledky sa viac približujú realite. Porovnávané sú výsledky z merania s výsledkami z RMxprt a Maxwell pre motor JMO90-4S-90.



Tabuľka 4.1 Porovnanie výsledkov z programov Maxwell a RMxpvt s meraním pre motor JMO90-4S-90

Veličina	RMxpvt	Meranie	Maxwell
$I_A$ [A]	3,69	3,95	3,28
$I_B$ [A]	4,22	4,10	4,27
$I_n$ [A]	6,31	6,25	6,34
$\cos(\varphi)$ [-]	1	1	1
$M_n$ [Nm]	7,25	7,40	7,51
$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	1450	1417	1453
$P_1$ [W]	1451	1440	1453
$P_2$ [W]	1101	1098	1100
$P_{\text{mech}}$ [W]			1143
$\Delta P_{\text{jhf}}$ [W]		74,51	51,13
$\Delta P_{\text{jpf}}$ [W]		128,4	136,7
$\Delta P_{\text{js}}$ [W]	198,6	202,9	187,9
$\Delta P_C$ [W]	349,7	342,0	356,5
$\eta_1$ [%]	75,89	76,25	75,73
$\eta_2$ [%]	75,89	76,25	75,46

Z tabuľky 4.1 je zrejmé, že hodnoty výsledkov sa trochu líšia. Nakoľko z Maxwell je obtiažnejšie dostať niektoré parametre, je potrebné ich dopočítať. Dopočítavané boli hlavne straty a účinnosť. Zo strát bolo potrebné dopočítať straty v kondenzátore  $\Delta P_K$  a straty v satorovom vinutí  $\Delta P_{\text{js}}$  analyticky. Pri výpočte sa vychádzalo zo vzorca 1.7. Straty v kondenzátore  $\Delta P_K$ :

$$\Delta P_K = I_B^2 \cdot R_K = 4,27^2 \cdot 0,91 = 16,59 \text{ W}$$

Kde  $R_K$  je odpor kondenzátoru, jeho hodnota je prevzatá z obvodového modelu v programe Maxwell. A straty vo vinutí statoru  $\Delta P_{\text{js}}$

$$\Delta P_{\text{js}} = I_A^2 \cdot R_A + I_B^2 \cdot R_B = 3,28^2 \cdot 4,75 + 4,27^2 \cdot 7,5 = 187,9 \text{ W}$$

Kde  $R_A$  a  $R_B$  sú odpory hlavnej a pomocnej fáze, ktoré sú tak isto prevzaté z obvodového modelu. Ostatné straty Maxwell dokáže vyčíslit' pomocou vstavaných funkcií (straty v železe – core loss, straty v rotore – solid loss, mechanické straty sú uvažované tie, ktoré vyčíslil RMxpvt).

Celkové straty  $\Delta P_C$  sa určia ako súčet všetkých strát:

$$\Delta P_C = \Delta P_K + \Delta P_{\text{js}} + \Delta P_{\text{JR}} + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{mech}}. \quad (4.1)$$

Hodnota príkonu  $P_1$  je zo súčinu napájacieho prúdu a napätia a hodnota výkonu  $P_2$  je zo súčinu otáčok a momentu. Všetky ostatné hodnoty sú výstupy z grafov priebehu daných veličín.

Ďalej je potrebné určiť v tejto práci najdôležitejší parameter a to je účinnosť, v tabuľke 4.1 sú znázornené dve hodnoty účinnosti, každá z nich bola počítaná iným spôsobom. Prvá z nich je počítaná ako:

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_{\text{mech}} - \Delta P_{\text{mech}}}{P_1} = \frac{1143 - 42,93}{1453} \cdot 100 = 75,71 \% . \quad (4.2)$$

Druhá z nich sa počíta ako:

$$\eta_2 = \frac{P_1 - \Delta P_c}{P_1} \cdot 100 = \frac{1453 - 356,6}{1453} \cdot 100 = 75,46 \% . \quad (4.3)$$

V prvej možnosti (4.2) sú od výkonu  $P_{\text{mech}}$  odrátané mechanické straty  $\Delta P_{\text{mech}}$ , pretože Maxwell automaticky o tieto straty navyšuje výkon stroja. V druhej možnosti (4.3) sú od príkonu odrátané celkové straty. Tieto dve možnosti by mali dať rovnaký výsledok, problém však je, že sa líšia. Tento rozdiel je možné brať ako chybu výpočtu, ktorá môže byť spôsobená menej presným výpočtom strát (pri simulácii nebol zapnutý spätný vplyv strát v železe na magnetické pole kvôli dĺžke simulácie), keďže niektoré z nich museli byť analyticky dopočítané, mechanické straty dokonca rovno prebraté z programu RMXprt. Alebo sa tieto hodnoty môžu rozchádzať na základe menej presného odhadu  $\Delta P_{\text{mech}}$ .

Pri porovnaní jednotlivých výstupov z tabuľky 4.1 medzi sebou, je vidieť, že prúdy jednotlivých fáz sa voči sebe značne líšia, avšak ich súčty už majú menšiu odchýlku. Tieto rozdiely sú pravdepodobne spôsobené rozdielnymi rozptylovými reaktanciami v daných programoch, vďaka ktorým sú prúdy voči sebe inak posunuté. Tak isto to môže byť spôsobené odchýlkou odporu rotoru pretože aj otáčky z merania sa odchyľujú od otáčok zo simulácií.

Tieto prúdové odchýlky sa najviac prejavajú v jednotlivých zložkách strát, avšak chyba v stratách celkových už takúto odchýlku neobsahuje. Výsledné účinnosti sú teda len s veľmi malou odchýlkou voči realite (približne 1%). Celkovo hodnoty dopočítané programom RMXprt sa viac približujú nameraným hodnotám, preto je vhodnejšie sa viac riadiť týmito výsledkami.

## 4.5 Porovnanie výsledkov RMXprt a Maxwell

Výsledky z programu Ansys Maxwell sú zhrnuté v prílohe A.1 a A.2 kde sú aj k nim prislúchajúce RMXprt hodnoty pre daný motor. V tabuľke 4.2 sú zhrnuté najpodstatnejšie veličiny týkajúce sa účinnosti, tak isto sú k nim priradené aj RMXprt výsledky.

Z tabuľky 4.2 je vidieť, že účinnosti počítané podľa 4.2 a 4.3 sa nie úplne zhodujú, to je pravdepodobne spôsobené ako už bolo spomenuté v 4.3 buď chybou výpočtu, vďaka ktorej sú prúdy inak posunuté a majú rozdielne veľkosti, čo ovplyvňuje aj rozloženie strát alebo nie úplne presným odhadom mechanických strát. Nakoľko vo všetkých prípadoch aspoň jedna účinnosť vypočítaná v Maxwell dosahuje požadovaných 81,4% a približuje

sa aj hodnotám z RMxpřt je veľmi pravdepodobné, že dané motory môžu v praxi dosiahnuť túto účinnosť.

Tabuľka 4.2 Porovnanie výsledkov z programov Maxwell a RMxpřt s meraním pre motor JMO90-4S-90

Značka a jednotka	Model motoru							
	KS plechy						JMO90-4S-90	
	1V				2V sin dopl.			
	RMxpřt	Maxwell	RMxpřt	Maxwell	RMxpřt	Maxwell	RMxpřt	Maxwell
$l_{Fe}$ [mm]	100	100	90	90	100	100	90	90
$l_{Ov}$ [mm]	90	90	100	100	90	90	90	90
$P_1$ [W]	1339	1367	1313	1332	1346	1361	1451	1453
$P_2$ [W]	1100	1099	1100	1099	1100	1100	1101	1100
$P_{mech}$ [W]		1141		1142		1142		1143
$\Delta P_K$ [W]	12,82	13,35	10,63	11,21	11,3	11,52	16,22	16,57
$\Delta P_{JS}$ [W]	113,7	110,4	95,52	92,68	120,0	112,9	198,6	187,85
$\Delta P_{JR}$ [W]	46,72	58,70	37,98	47,50	50,53	56,90	44,27	51,70
$\Delta P_{Fe}$ [W]	23,71	28,60	25,96	30,60	22,38	26,20	47,52	57,40
$\Delta P_D$ [W]	42,42	42,42	43,09	43,09	42,20	42,20	42,93	42,93
$\Delta P_C$ [W]	239,4	253,5	213,2	225,1	246,4	249,7	349,7	356,5
$\eta_1$ [%]	82,12	80,33	83,77	82,50	81,7	80,80	75,89	75,73
$\eta_2$ [%]		81,46		83,11		81,65		75,47

Z tabuliek v prílohe (A.1, A.2) je zrejmé, že na dosiahnutie požadovanej účinnosti 81,4% je potrebné využitie materiálu s menším stratovým číslom (M250-50A) a buď motor predĺžiť, alebo zväčšiť osovú výšku.

Z tabuľky A.1 je vidieť, že symetrickým jedno vrstvovým vinutím sa dá dosiahnuť vyššiu účinnosť, ako pri použití sínusového rozloženia vinutia. Túto skutočnosť potvrdzujú oba simulačné programy, aj Maxwell aj RMxpřt. Navyše toto vinutie môže byť jednoduchšie na navinutie z technologického hľadiska. Nakoľko je táto práca venovaná najmä znižovaniu strát, otázkou ostáva, aké bude mať motor výsledné prevádzkové vlastnosti, čo sa týka vibrácií alebo hluku. Z tabuľky A.1 je tiež vidieť, že maximálny moment a momentová preťažiteľnosť motorov je značne menšia, ako pri pôvodnom vinutí JMO90-4S-90.

## 5. ZÁVER

Táto bakalárska práca sa zaoberá zvyšovaním účinnosti jednofázových asynchrónnych motorov. Pre účely práce bol vybraný asynchrónny motor JMO90-4S-90 od firmy EMP s.r.o. Slavkov u Brna.

Prvá časť práce rozoberá všeobecne problematiku jednofázových asynchrónnych strojov. Je tu uvedený princíp činnosti, ale aj najpoužívanejšie typy jednofázových strojov. Ďalej sú tu analyzované straty v elektrických strojoch, nakoľko znalosť tejto problematiky je nevyhnutná pre riešenie.

V druhej časti boli predstavené jednotlivé riešenia motorov a výber plechov a vinutí. Plechy pre všetky riešenia boli zvolené od firmy Kienle+Spiess, pretože tieto plechy majú väčší prierez drážky, čo značne pomáha znižovať straty v statorovom vinutí. Vinutia boli volené symetricky rozložené a to buď jednovrstvové alebo dvojvrstvové sínusové. Kapitola taktiež obsahuje popis, akými spôsobmi je možné znižovať straty a vysvetlenie ich princípu.

V praktickej časti práce boli vytvorené modely pre motory z kapitoly 2 v programe RMxprt a Maxwell. Model motoru JMO90-4S-90 bol následne porovnaný s meraním. Výsledky merania boli dodané výrobcom motoru. Na základe výsledkov tohto porovnania sa viac s meraním zhodoval program RMxprt, Maxwell však stále slúžil na kontrolu výsledkov.

V poslednej kapitole je vyhodnotenie výsledkov z programu RMxprt a Maxwell. Podľa týchto výsledkov, sa u niektorých variant motorov úspešne podarilo dosiahnuť účinnosť IE2 (81,4%). Takto upravené motory však využívajú kvalitnejšie materiály a väčší objem medi, čo samozrejme zvyšuje ich cenu. Modely, ktoré dosahujú účinnosť väčšiu ako 81,4% museli byť buď predĺžené alebo musela byť zvýšená ich osová výška, čo môže prinášať problémy pri montáži do kostry alebo koncového zariadenia. Pre model s jednovrstvovým vinutím a využitím plechov IEC90/4.284 sa podarilo dosiahnuť účinnosť 81,38% bez nejakého zväčšovania motoru, tento výsledok síce stráca 0,02% na požadovanú IE2, ale z výsledkov porovnania merania so simuláciami je vidieť, že účinnosť simulácií je nepatrne menšia ako reálna účinnosť, preto by sa tento motor tiež mohol uvažovať ako dostatočne účinný.

Ako pokračovanie v práci by bolo vhodné overiť dopad daných úprav na prevádzkové vlastnosti stroja, čo sa týka hluku alebo vibrácií. Tak isto by bolo zaujímavé preveriť dopad ďalších úprav na rotore a statore na účinnosť stroja.

## LITERATÚRA

- [1] ONDRUŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje*.
- [2] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [3] Automationforum.co. *Automationforum.co* [online]. 2018 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://automationforum.co>
- [4] DOSPĚL, Leoš. *Zlepšení energetických parametrů jednofázových asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015, 43 listů : foto, grafy, tabulky. Bakalárska Práca. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
- [5] Bodine electric company. *Https://www.bodine-electric.com/blog/ac-induction-gearmotors/* [online]. Northfield Road Northfield, IL 60093 USA, 2016 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.bodine-electric.com/>
- [6] ŠTĚPINA, Jaroslav. *Jednofázové indukční motory*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1957, 198 s.
- [7] SOUČEK, Jiří. *Návrh a analýza jednofázového motoru v šestipólovém provedení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013, 53 l. : il. Bakalárska Práca. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] *IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors: 9AKK107319 EN 05-2018 \*20848* [online]. ABB, 2018, 2 s. [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: [https://library.e.abb.com/public/db64d153e3c346938e18916e66fb1d0d/9AKK107319%20EN%2005-2018\\_20848\\_ABB\\_Technical\\_note\\_IEC\\_60034\\_30\\_1.pdf](https://library.e.abb.com/public/db64d153e3c346938e18916e66fb1d0d/9AKK107319%20EN%2005-2018_20848_ABB_Technical_note_IEC_60034_30_1.pdf). ABB.
- [9] BOLDEA, Ion a Syed NASAR. *The induction machines design handbook*. 2. vydanie. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. ISBN 9781420066685.
- [10] *EEGUIDE.COM* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.eeguide.com>

- [11] SHARMA, S., B. GAUR a D. PUNETHA. *Optimization technique to mitigate the losses in single phase induction motor*. 2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation, Dehradun, India, 2016. ISBN 978-1-5090-0674-8.
- [12] SVS FEM [online]. Brno [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/>
- [13] BRÁZDA, M. a R. STAŇA. *Výpočet asynchronního motoru*. Brno, 1973.
- [14] *Report on Study on International Efficiency (IE) Efficiency Classes for Low Voltage AC Motors* [online]. Energy Efficiency Office, 2015, 13 s. [cit. 21.5.2021]. Dostupné z: [https://www.emsd.gov.hk/filemanager/en/content\\_764/Report%20on%20International%20Efficiency%20Efficiency%20Classes%20for%20Low%20Voltage%20AC%20Motors.pdf](https://www.emsd.gov.hk/filemanager/en/content_764/Report%20on%20International%20Efficiency%20Efficiency%20Classes%20for%20Low%20Voltage%20AC%20Motors.pdf)

## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

### Skratky:

IEC	International Electrotechnical Commission
OV	Osová výška
1V	Jedno vrstvomé vinutie
2V	Dvoj vrstvomé vinutie

### Symboly:

$B_{JR}$	magnetická indukcia v jarme rotoru	(T)
$B_{JS}$	magnetická indukcia v jarme statoru	(T)
$B_m$	maximálna magnetická indukcia	(T)
$B_{ZR}$	magnetická indukcia v zube rotoru	(T)
$B_{ZS}$	magnetická indukcia v zube statoru	(T)
$B_\delta$	magnetická indukcia vo vzduchovej medzere	(T)
$C$	elektrická kapacita	(F)
$C_b$	kapacita prevádzkového kondenzátora	(F)
$\cos(\varphi)$	účinník	(-)
$C_r$	kapacita rozbehového kondenzátora	(F)
$d$	prierez vodiča	(m)
$d_h$	prierez vodiča hlavnej fázy	(m)
$D_{inR}$	vnútorný priemer rotorových plechov	(m)
$D_{inS}$	vnútorný priemer statorových plechov	(m)
$D_{outR}$	vonkajší priemer rotorových plechov	(m)
$D_{outS}$	vonkajší priemer statorových plechov	(m)
$d_p$	prierez vodiča pomocnej fázy	(m)
$f$	frekvencia	(Hz)
$I_1$	fázor statorového prúdu	(A)
$I_1$	statorový prúd	(A)
$I_A$	fázor prúdu v hlavnej fáze	(A)
$I_A$	prúd hlavnou fázou	(A)
$I_B$	fázor prúdu v pomocnej fáze	(A)
$I_B$	prúd pomocnou fázou	(A)
$I_C$	prúd kondenzátorom	(A)
$I_n$	menovitý prúd	(A)

$k_h$	materiálový súčiniteľ	(-)
$k_{ph}$	činiteľ plnenia hlavnej fáze	(-)
$k_{pp}$	činiteľ plnenia pomocnej fáze	(-)
$k_p$	činiteľ plnenia drážky	(-)
$k_{op}$	činiteľ opracovania	(-)
$k_v$	materiálový súčiniteľ	(-)
$k_{v1}$	činiteľ vinutia	(-)
$l$	dĺžka zväzku	(m)
$l_{Fe}$	dĺžka železa	(m)
$l_{OV}$	osová výška	(m)
$M$	moment	(Nm)
$m$	počet fáz	(-)
$M_1'$	spätný moment	(Nm)
$M_2'$	súbežný moment	(Nm)
$m_a$	hmotnosť vinutia hlavnej fáze	(kg)
$m_b$	hmotnosť vinutia pomocnej fáze	(kg)
$m_m$	hmotnosť	(kg)
$M_{max}$	maximálny moment	(Nm)
$M_{max}/M_n$	momentová preťažiteľnosť	(-)
$M_n$	menovitý moment	(Nm)
$M_p$	zaťažovací moment	(Nm)
$M_z$	záberový moment	(Nm)
$N$	počet závitov	(-)
$n$	otáčky	(min <sup>-1</sup> )
$N_{1T}$	počet závitov v jednej drážke	(-)
$N_{2301T}$	počet závitov pri napätí 230V	(-)
$N_A$	počet závitov hlavnej fáze	(-)
$N_B$	počet závitov pomocnej fáze	(-)
$N_{H1T}$	počet závitov hlavnej fázy v jednej drážke	(-)
$N_k$	počet závitov v k-tej drážke	(-)
$n_n$	menovité otáčky	(min <sup>-1</sup> )
$N_{P1T}$	počet závitov pomocnej fázy v jednej drážke	(-)
$N_x$	neznámy počet závitov	(-)
$p$	počet pólov	(-)
$P$	výkon	(W)



$P_1$	príkon	(W)
$P_2$	výkon	(W)
$P_{\text{mech}}$	mechanický výkon	(W)
$P_{2N}$	menovitý výkon	(W)
$Q_1$	počet drážok v statore	(-)
$Q_2$	počet drážok v rotore	(-)
$R_1$	odpor statorového vinutia	( $\Omega$ )
$R_2$	odpor rotorového vinutia	( $\Omega$ )
$R_{20}$	odpor pri teplote 20°C	( $\Omega$ )
$R_A$	odpor hlavnej fáze	( $\Omega$ )
$R_B$	odpor pomocnej fáze	( $\Omega$ )
$s$	sklz	(-)
$S$	prierez	(mm <sup>2</sup> )
$S_{\text{cu}}$	prierez čistej medi	(mm <sup>2</sup> )
$S_D$	prierez drážky	(mm <sup>2</sup> )
$U$	fázor napájacieho napätia	(V)
$U_1$	napájacie napätie	(V)
$U_c$	napätie na kondenzátore	(V)
$U_n$	menovité napätie	(V)
$U_r$	napätie na rozptylovej impedancii	(V)
$U_{rs}$	napätie indukované spätným polom	(V)
$U_{rsp}$	napätie indukované súbežným polom	(V)
$U_x$	neznáme napätie	(V)
$X_\mu$	magnetizačná reaktancia	( $\Omega$ )
$X_{r1}$	rozptylová reaktancia statoru	( $\Omega$ )
$X_{r2}$	rozptylová reaktancia rotoru	( $\Omega$ )
$Z'_s$	vnútorná súbežná impedancia	( $\Omega$ )
$Z'_{sp}$	vnútorná spätná impedancia	( $\Omega$ )
$Z_r$	rozptylová impedancia	( $\Omega$ )
$\alpha$	teplotný odporový súčiniteľ	(K <sup>-1</sup> )
$\gamma$	posun medzi prúdmi v hlavnej a pomocnej fáze	(°)
$\delta$	dĺžka vzduchovej medzery	(m)
$\Delta P$	straty	(W)
$\Delta P_C$	celkové straty	(W)
$\Delta P_{\text{cu}}$	straty v medi	(W)
$\Delta P_{\text{cu1}}$	straty vo vinutí statoru	(W)

$\Delta P_{cu2}$	straty vo vinutí rotoru	(W)
$\Delta P_d$	dodatočné straty	(W)
$\Delta P_{Fe}$	straty v železe	(W)
$\Delta P_h$	straty hysterézne	(W)
$\Delta P_{jhf}$	straty vo vinutí hlavnej fáze	(W)
$\Delta P_{jpf}$	straty vo vinutí pomocnej fáze	(W)
$\Delta P_{JR}$	straty v rotore	(W)
$\Delta P_{JS}$	straty v statore	(W)
$\Delta P_K$	straty v kondenzátore	(W)
$\Delta P_{mech}$	mechanické straty	(W)
$\Delta P_v$	straty vírivými prúdmi	(W)
$\varepsilon_1$	pomerný úbytok na rozptylovej impedancii statoru	(-)
$\eta$	účinnosť	(%)
$\eta_n$	menovitá účinnosť	(%)
$\vartheta$	požadovaná teplota	(°C)
$\vartheta_1$	referenčná teplota	(°C)
$\rho_{20}$	merná rezistivita pri 20°C	( $\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}$ )
$\tau$	pólová rozteč	(°)
$\Phi$	magnetický tok	(Wb)
$\chi_a$	činiteľ vinutia	(-)

# **ZOZNAM PRÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ.....</b>	<b>59</b>
--	-----------

## Příloha A - Výsledky simulací

### A.1 Tabulka MW vs. RMxpirt pre 1V KS motory

Veličina	Značka a jednotka	Program				
		RMxpirt	Maxwell	RMxpirt	Maxwell	
Délka železa	$l_{Fe}$ [mm]	100	100	90	90	
Osová výška	$l_{ov}$ [mm]	90	90	100	100	
Prúd	Hl. fáza	$I_A$ [A]	3,81	3,62	4,19	4,01
	Pom. fáza	$I_B$ [A]	3,94	4,01	3,37	3,46
	Menovitý	$I_n$ [A]	5,83	6,03	5,72	5,88
Uhol medzi $I_A$ a $I_B$	$\gamma$ [°]	83,57	72	83,41	73,8	
Straty	Kondenzátor	$\Delta P_K$ [W]	12,82	13,35	10,63	11,21
	Stator	$\Delta P_{JS}$ [W]	113,7	110,4	95,52	92,68
	Rotor	$\Delta P_{JR}$ [W]	46,72	58,7	37,98	47,50
	Železo	$\Delta P_{Fe}$ [W]	23,71	28,6	25,96	30,60
	Mechanické	$\Delta P_{mech}$ [W]	42,42	42,42	43,09	43,09
	Celkové	$\Delta P_C$ [W]	239,4	253,4	213,2	225,1
Moment	Menovitý	$M_n$ [Nm]	7,29	7,54	7,23	7,5
	Maximálny	$M_{max}$ [Nm]	10,84	10,52	10,79	9,69
	Preťažiteľnosť	$M_{max}/M_n$ [-]	1,49	1,40	1,49	1,29
Príkon	$P_1$ [W]	1339	1367	1313	1332	
Výkon	$P_2$ [W]	1100	1099	1100	1099	
Otáčky	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	1441	1444	1453	1454	
Účinnosť	$\eta_1$ [%]	82,12	80,33	83,77	82,50	
	$\eta_2$ [%]		81,46		83,11	
Účinník	$\cos(\varphi)$ [-]	1	1	0,999	1	

## A.2 Tabuľka MW vs. RMxpřt pre 2V motory a JMO90-4S-90

Veličina		Značka a jednotka	Motor					
			JMO90-4S-90		2V SIN Doplnené		2V SIN	
			RMxpřt	Maxwell	RMxpřt	Maxwell	RMxpřt	Maxwell
Dĺžka železa		$l_{Fe}$ [mm]	90	90	100	100	90	90
Osová výška		$l_{ov}$ [mm]	90	90	90	90	90	90
Prúd	Hl. fáza	$I_A$ [A]	3,69	3,28	3,93	3,67	3,68	3,54
	Pom. fáza	$I_B$ [A]	4,22	4,27	3,52	3,56	3,77	3,79
	Menovitý	$I_n$ [A]	6,31	6,34	5,86	5,93	6,01	6,13
Uhol medzi $I_A$ a $I_B$		$\gamma$ [°]	77,14	63,00	77,38	70,20	73,22	66,60
Straty	Kondenzátor	$\Delta P_K$ [W]	16,22	16,57	11,3	11,52	12,24	12,35
	Stator	$\Delta P_{JS}$ [W]	198,6	187,8	120,0	112,8	144,7	140,4
	Rotor	$\Delta P_{JR}$ [W]	44,27	51,70	50,53	56,90	54,18	59,70
	Železo	$\Delta P_{Fe}$ [W]	47,52	57,40	22,38	26,20	20,92	25,20
	Mechanické	$\Delta P_{mech}$ [W]	42,93	42,93	42,20	42,20	41,99	41,99
	Celkové	$\Delta P_C$ [W]	349,7	356,5	246,4	249,7	274,0	279,6
Moment	Menovitý	$M_n$ [Nm]	7,25	7,51	7,30	7,58	7,33	7,62
	Maximálny	$M_{max}$ [Nm]	12,54	12,06	11,15	9,92	10,75	10,87
	Přeřaziteľnosť	$M_{max}/M_n$ [-]	1,73	1,61	1,53	1,31	1,47	1,43
Přikon		$P_1$ [W]	1451	1453	1346	1361	1375	1397
Výkon		$P_2$ [W]	1101	1100	1100	1100	1101	1102
Otáčky		$n$ [min <sup>-1</sup> ]	1450	1453	1438	1438	1434	1435
Účinnosť	$\eta_1$ [%]		75,89	75,73	81,7	80,80	80,07	78,92
	$\eta_2$ [%]		/	75,47	/	81,65	/	79,98
Účinník		$\cos(\varphi)$ [-]	1	1	1	1	0,994	0,993

## A.3 Tabuľka RMxprt výsledkov pre KS motory s materiálom M470-50A

Veličina		Značka a jednotka	KS plechy				
Názov (podľa vinutia)			1V	2V sin	2V sin dopl.	1V	2V JMO
Dĺžka železa		$l_{Fe}$ [mm]	90	90	90	90	90
Osová výška		$l_{OV}$ [mm]	90	90	90	100	90
Magnetická indukcia	Zub statoru	$B_{ZS}$ [T]	1,51	1,52	1,53	1,43	1,51
	Zub rotoru	$B_{ZR}$ [T]	1,60	1,61	1,62	1,51	1,66
	Jarmo statoru	$B_{JS}$ [T]	1,26	1,28	1,28	1,19	1,45
	Jarmo rotoru	$B_{JR}$ [T]	0,67	0,68	0,68	0,59	0,72
	Vzduch. Medz.	$B_{\delta}$ [T]	0,72	0,72	0,72	0,69	0,76
Prúd	Hl. fáza	$I_A$ [A]	3,59	3,99	3,95	3,64	4,72
	Pom. fáza	$I_B$ [A]	3,90	3,64	3,65	3,55	2,89
	Menovitý	$I_n$ [A]	5,99	6,04	5,97	5,83	6,27
Uhol medzi $I_A$ a $I_B$		$\gamma$ [°]	75,47	76,94	78,17	73,59	73,30
Straty	Kondenzátor	$\Delta P_K$ [W]	12,77	11,71	11,75	11,48	10,64
	Stator	$\Delta P_{JS}$ [W]	123,7	143,5	128,8	94,98	166,0
	Rotor	$\Delta P_{JR}$ [W]	53,26	51,21	50,63	40,58	52,67
	Železo	$\Delta P_{Fe}$ [W]	37,74	39,21	39,37	42,78	47,55
	Mechanické	$\Delta P_{mech}$ [W]	42,04	42,15	42,17	42,93	42,15
	Celkové	$\Delta P_C$ [W]	269,5	287,8	272,7	232,8	319,0
Moment	Menovitý	$M_n$ [Nm]	7,32	7,31	7,30	7,25	7,31
	Maximálny	$M_{max}$ [Nm]	9,87	11,08	11,23	9,93	11,02
	Preťažiteľnosť	$M_{max}/M_n$ [-]	1,35	1,52	1,54	1,37	1,51
Príkion		$P_1$ [W]	1368	1388	1388	1372	1334
Výkon		$P_2$ [W]	1099	1100	1100	1099	1101
Otáčky		$n$ [min <sup>-1</sup> ]	1435	1437	1437	1437	1450
Účinnosť		$\eta$ [%]	80,31	79,27	80,12	82,55	77,52
Účinník		$\cos(\varphi)$ [-]	0,993	1	1	0,995	0,984
Odpor	Hl. fáza	$R_A$ [Ohm]	4,40	4,80	4,34	3,67	4,58
	Pom. fáza	$R_B$ [Ohm]	4,40	5,07	4,59	3,67	7,66
Drážky	Stator	[-]	24	24	24	24	36
	Rotor	[-]	30	30	30	30	28
Hmotnosť medi	Hl. fáza	$m_a$ [Kg]	0,84	0,62	0,69	1,02	0,79
	Pom. fáza	$m_b$ [Kg]	0,84	0,66	0,72	1,02	0,72
Prevádzkový kondenzátor		$C_b$ [μF]	38	38	36	36	35

## A.4 Tabuľka RMxprt výsledkov pre JMO90-4S-90 s M470-50A

Veličina		Značka a jednotka	JMO90-4S-90	
			Pôvodný	Optim.
Dĺžka železa		$l_{Fe}$ [mm]	90	90
Osová výška		$l_{OV}$ [mm]	90	90
Magnetická indukcia	Zub statoru	$B_{ZS}$ [T]	1,63	1,55
	Zub rotoru	$B_{ZR}$ [T]	1,68	1,60
	Jarmo statoru	$B_{JS}$ [T]	1,48	1,35
	Jarmo rotoru	$B_{JR}$ [T]	0,71	0,65
	Vzduch. Medz.	$B_{\delta}$ [T]	0,79	0,74
Prúd	Hl. fáza	$I_A$ [A]	3,69	4,23
	Pom. fáza	$I_B$ [A]	4,22	3,14
	Menovitý	$I_n$ [A]	6,31	6,18
Uhol medzi $I_A$ a $I_B$		$\gamma$ [°]	77,1	68,4
Straty	Kondenzátor	$\Delta P_K$ [W]	16,22	11,21
	Stator	$\Delta P_{JS}$ [W]	198,6	174,3
	Rotor	$\Delta P_{JR}$ [W]	44,27	51,78
	Železo	$\Delta P_{Fe}$ [W]	47,52	40,84
	Mechanické	$\Delta P_{mech}$ [W]	42,93	42,24
	Celkové	$\Delta P_C$ [W]	349,7	320,4
Moment	Menovitý	$M_n$ [Nm]	7,25	7,31
	Maximálny	$M_{max}$ [Nm]	12,54	10,55
	Preťažiteľnosť	$M_{max}/M_n$ [-]	1,73	1,44
Príkon		$P_1$ [W]	1451	1421
Výkon		$P_2$ [W]	1101	1100
Otáčky		$n$ [min <sup>-1</sup> ]	1450	1438
Účinnosť		$\eta$ [%]	75,89	77,45
Účinník		$\cos(\varphi)$ [-]	1	1
Odpor	Hl. fáza	$R_A$ [Ohm]	4,75	5,29
	Pom. fáza	$R_B$ [Ohm]	7,50	8,08
Drážky	Stator	[-]	36	36
	Rotor	[-]	28	28
Hmotnosť medi	Hl. fáza	$m_a$ [Kg]	0,69	0,69
	Pom. fáza	$m_b$ [Kg]	0,6	0,6
Prevádzkový kondenzátor		$C_b$ [µF]	35	28

## A.5 Tabuľka RMxprt výsledkov pre M250-50A

Značka a jednotka	Model motoru							
	KS plechy							JMO90-4S-90
Názov	1V		2V sin	2V sin dopl.		1V	2V JMO	Optim.
$l_{Fe}$ [mm]	90	100	90	90	100	90	90	90
$l_{OV}$ [mm]	90	90	90	90	90	100	90	90
$B_{ZS}$ [T]	1,50	1,50	1,49	1,52	1,47	1,47	1,40	1,52
$B_{ZR}$ [T]	1,58	1,59	1,58	1,61	1,56	1,55	1,54	1,56
$B_{JS}$ [T]	1,26	1,27	1,25	1,30	1,22	1,26	1,30	1,33
$B_{JR}$ [T]	0,67	0,67	0,66	0,69	0,65	0,63	0,64	0,63
$B_{\delta}$ [T]	0,71	0,71	0,71	0,72	0,70	0,71	0,70	0,73
$I_A$ [A]	3,75	3,81	3,68	3,90	3,93	4,19	3,96	4,39
$I_B$ [A]	3,87	3,94	3,77	3,77	3,52	3,37	3,03	2,98
$I_n$ [A]	5,90	5,83	6,01	5,90	5,86	5,72	6,10	6,13
$\gamma$ [°]	79,70	83,57	73,22	80,27	77,38	83,41	60,20	69,91
$\Delta P_K$ [W]	12,57	12,82	12,24	12,20	11,30	10,63	10,83	10,50
$\Delta P_{JS}$ [W]	123,9	113,7	144,7	130,9	120,0	95,52	159,5	174,8
$\Delta P_{JR}$ [W]	51,99	46,72	54,18	50,23	50,53	37,98	66,35	53,47
$\Delta P_{Fe}$ [W]	21,29	23,71	20,92	22,30	22,38	25,96	22,03	21,89
$\Delta P_{mech}$ [W]	42,07	42,42	41,99	42,18	42,20	43,09	41,44	42,13
$\Delta P_C$ [W]	251,8	239,4	274,0	257,8	246,4	213,2	300,1	302,8
$M_n$ [Nm]	7,32	7,29	7,33	7,29	7,30	7,23	7,38	7,32
$M_{max}$ [Nm]	10,14	10,84	10,75	11,37	11,15	10,79	9,58	10,40
$M_{max}/M_n$ [-]	1,39	1,49	1,47	1,56	1,53	1,49	1,30	1,42
$P_1$ [W]	1352	1339	1375	1356	1346	1313	1402	1403
$P_2$ [W]	1101	1100	1101	1098	1100	1100	1102	1100
$n$ [min <sup>-1</sup> ]	1436	1441	1434	1437	1438	1453	1425	1437
$\eta$ [%]	81,38	82,12	80,07	80,99	81,7	83,77	78,59	78,42
$\cos(\varphi)$ [-]	0,997	1	0,994	0,999	1	0,999	1	0,996
$R_A$ [Ohm]	4,26	3,78	5,07	4,34	4,21	3,30	5,30	5,38
$R_B$ [Ohm]	4,26	3,78	5,35	4,59	4,43	3,30	8,30	7,99
[-]	24	24	24	24	24	24	36	36
[-]	30	30	30	30	30	30	28	28
$m_a$ [Kg]	0,84	0,88	0,62	0,69	0,73	1,02	0,83	0,68
$m_b$ [Kg]	0,84	0,88	0,66	0,72	0,77	1,02	0,71	0,60
$C_b$ [μF]	38	38,5	37	37	35	34	27	27



## A.6 IE2 účinnosti pre motory s 50Hz napájaním [14]

Výkon [kW]	Póly			
	2	4	6	8
0,12	53,6	59,1	50,6	39,8
0,18	60,4	64,7	56,6	45,9
0,2	61,9	65,9	58,2	47,4
0,25	64,8	68,5	61,6	50,6
0,37	69,5	72,7	67,6	56,1
0,4	70,4	73,5	68,8	57,2
0,55	74,1	77,1	73,1	61,7
0,75	77,4	79,6	75,9	66,2
1,1	79,6	81,4	78,1	70,8
1,5	81,3	82,8	79,8	74,1
2,2	83,2	84,3	81,8	77,6
3	84,6	85,5	83,3	80
4	85,8	86,6	84,6	81,9
5,5	87	87,7	86	83,8
7,5	88,1	88,7	87,2	85,3
11	89,4	89,8	88,7	86,9
15	90,3	90,6	89,7	88
18,5	90,9	91,2	90,4	88,6
22	91,3	91,6	90,9	89,1
30	92	92,3	91,7	89,8
37	92,5	92,7	92,2	90,3
45	92,9	93,1	92,7	90,7
55	93,2	93,5	93,1	91
75	93,8	94	93,7	91,6
90	94,1	94,2	94	91,9
110	94,3	94,5	94,3	92,3
132	94,6	94,7	94,6	92,3
160	94,8	94,9	94,8	93
200-1000	95	95,1	95	93,5