

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ANALÝZA MOŽNOSTÍ ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI ASYNCHRONNÍCH
MOTORŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

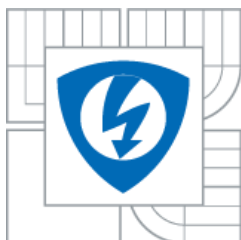
Bc. Jiří Novotný

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

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

ANALÝZA MOŽNOSTÍ ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

ANALYSIS OF POSSIBILITIES TO IMPROVEMENT INDUCTION MOTORS EFFICIENCY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

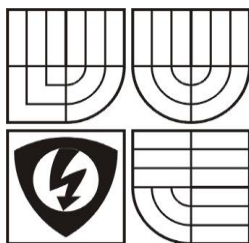
Bc. Jiří Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach

BRNO, 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Jiří Novotný
Ročník: 2

ID: 121034
Akademický rok: 2013/14

NÁZEV TÉMATU:

Analýza možností zvýšení účinnosti asynchronních motorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostudujte aktuální normu pro určování účinnosti asynchronním motorů
2. Teoreticky se seznámte s možnostmi zvyšování účinnosti asynchronních motorů
3. Vytvořte model asynchronního motoru v programu Maxwell. Na tomto modelu vyzkoušejte vliv různých úprav na účinnost.
4. Výsledky simulací porovnejte s laboratorním měřením na různých vzorcích.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ČSN EN 60034-2 (350000): Točivé elektrické stroje - Část 2: Metody určování ztrát a účinnosti točivých elektrických strojů ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)
- [2] BOLDEA, I a S NASAR. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-493-0004-5.

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 28.5.2014

Vedoucí projektu: Ing. Martin Mach

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

V první části této diplomové práce zabývající se zvyšováním účinností asynchronních motorů, jsou stručně uvedeny základní poznatky o asynchronních strojích s následným přehledem ztrát asynchronních motorů. Další část práce se zabývá možnostmi zvýšení účinnosti asynchronních motorů při nezvyšování nákladů na vývoj. Praktická část se skládá z měření čtyř motorů s různými strojírenskými úpravami tak, aby bylo možno porovnávat výhody těchto úprav. Naměřené hodnoty jsou porovnány analýzou v konečno prvkovém prostředí programu Maxwell 2D Design, ve kterém jsou nasimulovány stejné modely motorů, přičemž jsou prakticky využity teoretické poznatky o zvýšení účinnosti, které jsou do simulací implementovány.

Klíčová slova

Asynchronní motor; činitel plnění drážky; dodatečné ztráty; Joulovy ztráty; Maxwell; mechanické ztráty; měděná klec; měření nakrátko; měření naprázdno; měření při zatížení; nezvyšování výrobních nákladů na výrobu; prodloužení magnetického obvodu; ztráty v železe; zvyšování účinnosti

Abstract

In the first part of the master's thesis dealing with the increasing efficiency of induction motors there are briefly presented basic information about induction motors, followed by an overview of the losses of induction motors. The next part deals with the ways to increase efficiency of induction motors without increasing tooling costs. The practical part consists of four measurements of four induction motors, with their various mechanical adjustments to make comparing benefits of these modifications possible. The measured results are compared by a finite element method in Maxwell 2D Design program, in which the same motors are simulated as measured. Theoretical knowledge about the increase of efficiency is practically applied while being implemented in the simulations.

Keywords

Additional losses; cooper cage; extension of the magnetic core; factor of filling the slot; improving the effeciency; induction motors; iron losses; Maxwell; mechanical losses; no-load measurement; no tooling cost; short-circuit test; torque measurement; winding losses

Bibliografická citace

NOVOTNÝ, J. *Analýza možností zvýšení účinnosti asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Mach.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Analýza možností zvýšení účinnosti asynchronních motorů* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Machovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora



Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
PŘEHLED SYMBOLŮ A ZNAČEK	13
1 ÚVOD	15
2 ASYNCHRONNÍ STROJE	17
2.1 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PŘI STAVBĚ ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	20
2.1.1 MATERIÁLY PRO MAGNETICKÉ OBVODY	20
2.1.2 MATERIÁLY PRO VODIČE	22
2.1.3 IZOLAČNÍ MATERIÁLY	22
3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH.....	23
3.1 ÚČINNOST ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	23
3.2 ZTRÁTY V ŽELEZE.....	25
3.3 ZTRÁTY VE VINUTÍ.....	26
3.4 ZTRÁTY MECHANICKÉ.....	26
3.5 PŘÍDAVNÉ (DODATEČNÉ) ZTRÁTY PŘI ZATÍŽENÍ	27
4 PŘÍDAVNÉ ZTRÁTY	27
4.1.1 CARTERŮV ČINITEL.....	27
4.2 POVRCHOVÉ ZTRÁTY NAPRÁZDNO	29
4.3 PULZAČNÍ ZTRÁTY NAPRÁZDNO	31
4.4 PŘÍDAVNÉ ZTRÁTY PŘI ZATÍŽENÍ.....	31
5 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	32
5.1 ROTOR S MĚDĚNÝMI TYČEMI, KTERÉ JSOU UMÍSTĚNY V DRÁŽKÁCH HLINÍKOVÉ KLECE	32
5.2 PRODLOUŽENÍ DÉLKY MAGNETICKÉHO OBVODU.....	35
5.3 ZLEPŠENÍ KVALITY MATERIÁLU PLECHŮ.....	36
5.4 ZVÝŠENÍ Činitele plnění drážky	37
6 POSTUP MĚŘENÍ ZTRÁT ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ.....	38
6.1 MĚŘENÍ ODPORŮ VINUTÍ	38
6.2 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	39
6.3 MĚŘENÍ NAKRÁTKO.....	40
6.4 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ.....	40
7 MĚŘENÍ ZTRÁT NA ASYNCHRONNÍCH MOTORECH.....	41
7.1 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍHO MOTORU	41
7.1.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	42
7.1.2 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ	44
7.2 MĚŘENÍ PRODLOUŽENÉHO MOTORU	47
7.2.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	48



7.2.2 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ	49
7.3 MĚŘENÍ MOTORU S KVALITNĚJŠÍMI STATOROVÝMI PLECHY	52
7.3.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	52
7.3.2 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ	53
7.4 MĚŘENÍ MOTORU S KVALITNĚJŠÍMI PLECHY VE STATORU I ROTORU	56
7.4.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	56
7.4.2 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ	57
7.5 MĚŘENÍ NAKRÁTKO VŠECH MOTORŮ	60
7.6 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ZE ZKOUŠKY NAPRÁZDNO	60
7.7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ZE ZKOUŠKY PŘI ZATÍŽENÍ	62
8 SIMULACE MOTORŮ V PROSTŘEDÍ ANSOFT MAXWELL	68
8.1.1 MAXWELL	68
8.1.2 VYTVOŘENÍ MODELU	68
8.2 SIMULOVÁNÍ ZÁKLADNÍHO MOTORU	72
8.3 SIMULOVÁNÍ MOTORU S KVALITNĚJŠÍMI PLECHY	76
8.4 SIMULOVÁNÍ PRODLOUŽENÍ MAGNETICKÉHO OBVODU	78
8.5 SIMULOVÁNÍ PLNĚNÍ DRÁŽKY	79
9 ZÁVĚR	81
LITERATURA	83
PŘÍLOHY	85

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Třídy účinnosti pro 2 pólové (50Hz), 3f asynchronní motory v Evropě [14]	15
Obr. 2-1 Asynchronní motor s kotvou nakrátko [12]	18
Obr. 2-2 Asynchronní motor s kroužkovou kotvou [12]	18
Obr. 2-3 Momentová charakteristika asynchronního stroje [15]	19
Obr. 2-4 BH křivka pro plech 0,5 mm [16]	21
Obr. 2-5 Na levém obrázku jde vidět část BH křivky a napravo je ztrátová BP křivka [17]	21
Obr. 2-6 Průřez měděných vodičů ve statorové drážce: a) kruhový, b) obdélníkový [16]	22
Obr. 3-1 Tok výkonu v asynchronním motoru [11]	24
Obr. 3-2 Charakteristický podíl ztrát u 4 pólového asynchronního motoru (50Hz) [14]	25
Obr. 4-1 Průběh magnetické indukce nad drážkou [10]	28
Obr. 4-2 Průběhy veličin γ a β jako funkce poměru o/δ [10]	28
Obr. 4-3 Průběh přídavného pole při zanedbání vyšších harmonických [10]	29
Obr. 4-4 Hodnoty koeficientů pro výpočet povrchových ztrát dle Spoonera [10]	30
Obr. 4-5 Průběhy B_{max} nad drážkovou roztečí t_{d1} pro výpočet pulzačních ztrát [10]	31
Obr. 5-1 Typy rozložení měděných plátů uložených v hliníkovém odlitku rotorové drážky [2]	33
Obr. 5-2 Porovnání účinnosti u 11kW (73Nm) motorem a prototypem s měděnými pláty v drážkách klece rotoru [2]	33
Obr. 5-3 Detail rotoru s měděnými tyčemi v hliníkové kleci [2]	34
Obr. 5-4 Zobrazení nedokonalého spojení měděných tyčí v hliníkové v rotorové drážce [2]	34
Obr. 5-5 Porovnání mechanických ztráty v nežíhaném a žíhaném vzorku [2]	36
Obr. 5-6 Porovnání magnetických ztrát standartního a žíhaného jádra [2]	36
Obr. 6-1 Schéma zapojení měření	38
Obr. 6-2 Určení ztrát magnetických a mechanických [16]	39
Obr. 7-1 Určení mechanických ztrát ze závislosti $\Delta P_k = f(U_0^2)$ základního motoru	43
Obr. 7-2 Vypočítané ztráty při měření naprázdno v závislosti na napětí $\Delta P = f(U)$ základního motoru	43
Obr. 7-3 Závislost pro odečítání ΔP_{Fe} dána ze zkoušky naprázdno základního motoru	45
Obr. 7-4 Závislost jednotlivých ztrát při zatížení na momentu $\Delta P = f(M)$ základního motoru	45
Obr. 7-5 Závislost účinnosti na momentu $\eta = f(M)$ základního motoru	46
Obr. 7-6 Závislost účinníku na momentu $\cos\varphi = f(M)$ základního motoru	46
Obr. 7-7 Měřicí pracoviště základního motoru (motor – tenzometrická hřídel – dynamometr)	47
Obr. 7-8 Určení mechanických ztrát ze závislosti $\Delta P_k = f(U_0^2)$ prodlouženého motoru	48



Obr. 7-9 Vypočítané ztráty v závislosti na napětí $\Delta P = f(U)$ prodlouženého motoru	49
Obr. 7-10 Závislost jednotlivých ztrát při zatížení na momentu $\Delta P = f(M)$ prodlouženého motoru	50
Obr. 7-11 Závislost účinnosti na momentu $\eta = f(M)$ prodlouženého motoru	50
Obr. 7-12 Závislost účinníku na momentu $\cos\varphi = f(M)$ prodlouženého motoru.....	51
Obr. 7-13 Měřicí pracoviště při měření prodlouženého motoru.....	51
Obr. 7-14 Ztráty v závislosti na napětí $\Delta P = f(U)$ u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy..	53
Obr. 7-15 Závislost jednotlivých ztrát při zatížení na momentu $\Delta P = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy	54
Obr. 7-16 Závislost účinnosti na momentu $\eta = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy	54
Obr. 7-17 Závislost účinníku na momentu $\cos\varphi = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy.....	55
Obr. 7-18 Měřicí pracoviště při měření základního motoru s kvalitnějšími statorovými plechy...	55
Obr. 7-19 Vypočítané ztráty v závislosti na napětí $\Delta P = f(U)$ u motoru s kvalitnějšími plechy ...	57
Obr. 7-20 Závislost jednotlivých ztrát při zatížení na momentu $\Delta P = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími plechy.....	58
Obr. 7-21 Závislost účinnosti na momentu $\eta = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími plechy.....	58
Obr. 7-22 Závislost účinníku na momentu $\cos\varphi = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími plechy	59
Obr. 7-23 Měřicí pracoviště motoru s kvalitnějšími plechy	59
Obr. 7-24 Porovnání ztrát naprázdno všech motorů $\Delta P_0 = f(U)$	60
Obr. 7-25 Porovnání Joulových ztrát naprázdno všech motorů $\Delta P_{J1} = f(U)$	61
Obr. 7-26 Porovnání ztrát v železe naprázdno všech motorů $P_{Fe} = f(U)$	61
Obr. 7-27 Porovnání Joulových statorových ztrát všech motorů $\Delta P_{J1} = f(M)$ při zatížení.....	62
Obr. 7-28 Porovnání Joulových rotorových ztrát všech motorů $\Delta P_{J2} = f(M)$ při zatížení.....	62
Obr. 7-29 Porovnání ztrát v železe všech motorů $P_{Fe} = f(M)$ při zatížení	63
Obr. 7-30 Porovnání dodatečných ztrát všech motorů $\Delta P_d = f(M)$ při zatížení.....	63
Obr. 7-31 Závislost celkových ztrát $\Delta P_{cel} = f(M)$ při zatížení	64
Obr. 7-32 Porovnání účinníku všech motorů $\cos\varphi = f(M)$ při zatížení	64
Obr. 7-33 Porovnání účinnosti všech motorů $\eta = f(M)$ při zatížení.....	65
Obr. 7-34 Detail účinností okolo jmenovitého momentu (2,02 Nm) všech motorů $\eta = f(M)$ při zatížení.....	65
Obr. 7-35 Momentová charakteristika všech motorů $M = f(n)$	66
Obr. 7-36 Proudová charakteristika všech motorů $I = f(M)$ při zatížení.....	66
Obr. 8-1 Strom v prostředí RMXprt Designu a nakreslený model motoru	68



Obr. 8-2 BH křivka plechů M700-50A	69
Obr. 8-3 BP křivka plechů M700-50A.....	69
Obr. 8-4 Nastavená mesh asynchronního motoru.....	70
Obr. 8-5 Detail meshe přes vzduchovou mezeru	70
Obr. 8-6 Průběh momentu $M = f(t)$ pro $n = 2841$ základního motoru.....	71
Obr. 8-7 Průběh proudů $I_{ef} = f(t)$ pro $n = 2841$ základního motoru.....	71
Obr. 8-8 Porovnání momentu měřeného a simulovaného $M = f(n)$ základního motoru.....	73
Obr. 8-9 Porovnání proudu měřeného a simulovaného $I = f(n)$ základního motoru.....	73
Obr. 8-10 Joulovy ztráty ve statoru i rotoru při různých simulacích základního motoru.....	74
Obr. 8-11 Porovnání výkonu a příkonu při různých simulacích základního motoru.....	74
Obr. 8-12 Porovnání účinností měřeného a simulovaného motoru $\eta = f(n)$	75
Obr. 8-13 Závislost simulovaného proudu $I = f(n)$ pro různé materiály plechů.....	76
Obr. 8-14 Závislost simulovaného výkonu $P_2 = f(n)$ pro různé materiály plechů.....	77
Obr. 8-15 Závislost simulované účinnosti $\eta = f(n)$ pro různé materiály plechů	77
Obr. 8-16 Závislost délky motoru na účinnosti $\eta = f(l)$	78
Obr. 8-17 Porovnání proudů $I = f(n)$	79
Obr. 8-18 Porovnání simulovaných ztrát ve vinutí statoru a rotoru $\Delta P_{J1}, \Delta P_{J2} = f(n)$	80
Obr. 8-19 Porovnání účinnosti $\eta = f(M)$ při různém plnění drážky.....	80

SEZNAM TABULEK

Tab. 1-1 Účinnosti motorů, dáno evropskými normami [1].....	16
Tab. 3-1 K_T k výpočtu mechanických ztrát motorů velkého výkonu [7]	27
Tab. 4-1 Hodnoty koeficientu k_o pro různé materiály	30
Tab. 5-1 Střední hodnoty činitelů plnění drážky [7]	37
Tab. 7-1 Parametry měřených motorů	41
Tab. 7-2 Parametry základního motoru Atas Náchod.....	41
Tab. 7-3 Hodnoty odporů vinutí základního motoru	41
Tab. 7-4 Naměřené a vypočítané hodnoty měření naprázdno základního motoru	42
Tab. 7-5 Naměřené hodnoty při zatěžovací zkoušce základního motoru	44
Tab. 7-6 Vypočítané hodnoty z měření při zatížení základního motoru	44
Tab. 7-7 Přepočítané hodnoty odporů vinutí z naměřených u prodlouženého motoru	47
Tab. 7-8 Naměřené a vypočítané hodnoty při měření naprázdno prodlouženého motoru.....	48



<i>Tab. 7-9 Naměřené hodnoty při zatěžovací zkoušce prodlouženého motoru</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 7-10 Vypočítané hodnoty z měření při zatížení prodlouženého motoru.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 7-11 Přepočítané hodnoty odporů vinutí z naměřených u motoru s kvalitnějšími satorovými plechy.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 7-12 Naměřené a vypočtené hodnoty při měření naprázdno u motoru s kvalitnějšími satorovými plechy.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 7-13 Naměřené hodnoty při zatěžovací zkoušce u motoru s kvalitnějšími satorovými plechy</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 7-14 Vypočítané hodnoty z měření při zatížení u motoru s kvalitnějšími satorovými plechy</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 7-15 Přepočítané hodnoty odporů vinutí z naměřených u motoru s kvalitnějšími plechy</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 7-16 Naměřené a vypočítané hodnoty měření naprázdno u motoru s kvalitnějšími plechy...</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 7-17 Naměřené hodnoty zkoušky při zatížení u motoru s kvalitnějšími plechy.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 7-18 Vypočítané hodnoty z měření při zatížení u motoru s kvalitnějšími plechy</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 7-19 Naměřené a vypočítané hodnoty všech motorů při měření nakrátko</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 7-20 Procentuální podíl jednotlivých ztrát ze ztrát celkových u všech motorů ve jmenovitém bodě</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 7-21 Porovnání motorů při jmenovitém momentu</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 8-1 Porovnání naměřených a simulovaných hodnot základního motoru.....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 8-2 Porovnání měřeného základního motoru se simulací základního motoru s měděnou klecí</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 8-3 Porovnání ztrát a účinnosti při simulování jmenovitých hodnot motoru</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 8-4 Účinnost v závislosti na délce motoru</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 8-5 Porovnání základního a prodlouženého motoru při simulování při jmenovitých otáčkách</i>	<i>79</i>



PŘEHLED SYMBOLŮ A ZNAČEK

B	[T]	magnetická indukce
$\cos\varphi$	[-]	účinník
D	[m]	průměr rotoru
f	[Hz]	frekvence
H	[A/m]	intenzita magnetického pole
I_n	[A]	jmenovitý proud
k_a	[-]	zvláštní vířivé ztráty
k_c	[-]	Carterův činitel
k_{dr}	[-]	činitel plnění drážky
k_e	[-]	klasické vířivé ztráty
k_h	[-]	hysterezní ztráty
k_T	[-]	hustota uložení vodičů v drážce
l	[m]	délka magnetického obvodu
m	[-]	počet fází
M	[Nm]	moment
n	[ot/min]	otáčky
n_{s1}	[ot/min]	synchronní otáčky
o	[m]	otevření drážky
p	[-]	počet pólpárů
P_0	[W]	příkon naprázdno
P_{cel}	[W]	celkové ztráty
P_d	[W]	ztráty dodatečné
$P_{elektrický} (P_1)$	[W]	elektrický příkon
P_{Fe}	[W]	ztráty v železe (v magnetickém obvodu)
P_{J1}	[W]	ztráty ve statoru
P_{J2}	[W]	ztráty v rotoru
P_k	[W]	konstantní ztráty
$P_{mechanický} (P_2)$	[W]	mechanický výkon
P_p	[W]	pulzační ztráty
P_v	[W]	povrchové ztráty
R	[Ω]	odpor
s	[-]	skluz



S	$[m^2]$	průřez vodiče
T	$[^{\circ}C]$	teplota
t_d	$[m]$	rozteč drážky
U_n	$[V]$	jmenovité napětí
V	$[m^3]$	objem
Z	$[-]$	počet drážek statoru
μ	$[-]$	permeabilita
δ	$[m]$	šířka vzduchové mezery
ρ	$[\Omega m]$	rezistivita materiálu
η	$[-]$	účinnost
Φ	$[Wb]$	magnetický tok
ω	$[rad/s]$	úhlová rychlost

1 ÚVOD

Za účelem snížit spotřebu elektrické energie a tak i množství CO₂ emisí vypracovala EU novou legislativu s pomocí Mezinárodní Elektrotechnické Komise IEC (International Electrotechnical Commission) pro sjednocení testování energetické účinnosti a požadavky na označování motorů. V této práci se vychází zejména z IEC/EN 60034-30, která definuje třídy energetické účinnosti a IEC/EN 60034-2-1 stanovující metody určení účinnosti ze zkoušek a zjištění ztrát.

Na základě kladných amerických zkušeností se v Evropě také stanovily minimální hodnoty účinnosti elektrických motorů, které schválil Evropský parlament v roce 2009. Nazývají se Minimální třídy účinnosti motorů (MEPS Minimum Energy Performance Standard). Tyto nové Evropské standarty vyžadují nemalé úsilí na vylepšení účinnosti zejména u malých a středních výrobců.

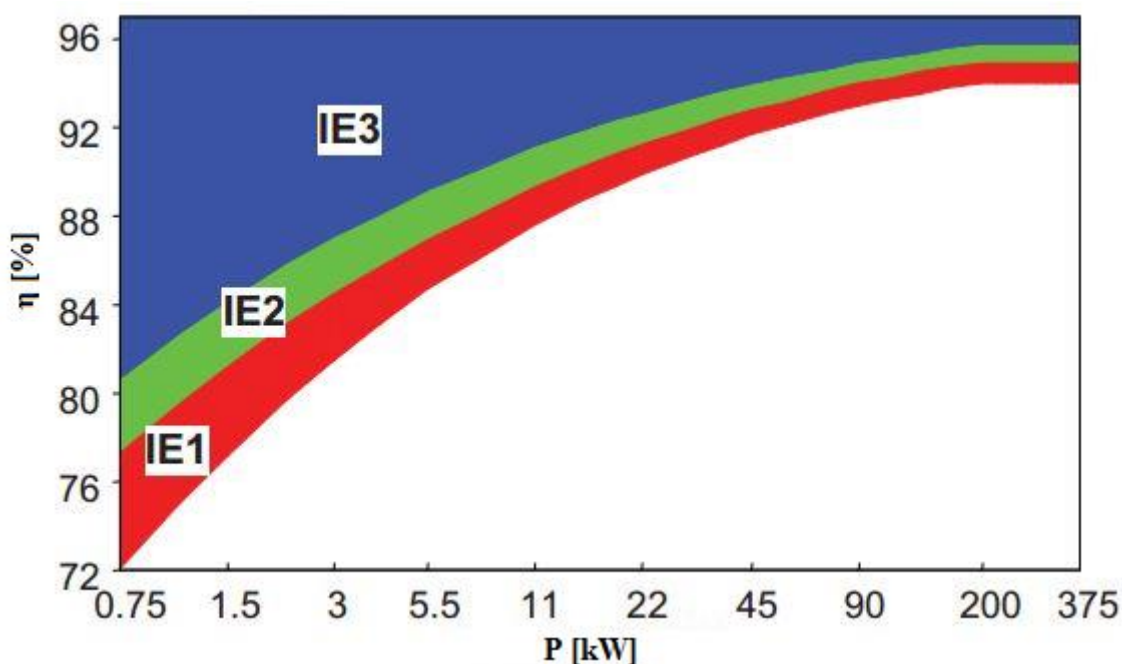
MEPS je důležitý v tom, že nařizuje minimální povinné úrovně účinnosti pro motory prodávající se na evropském trhu a definuje jak toho dosáhnout. Toto nařízení se vztahuje na 2, 4 a 6 pólové třífázové asynchronní motory ve výkonové škále 0,75 ÷ 375 kW pro nepřetržitý provoz (jsou dané určité výjimky). Např. třídy účinnosti 2 pólových, 3f asynchronních motorů podle IE (International Efficiency):

IE1: standartní účinnost (Standard)

IE2: zvýšená účinnost (High)

IE3: vysoká účinnost (Premium)

IE4: velmi vysoká účinnost (Super Premium - zatím pouze v USA)



Obr. 1-1 Třídy účinnosti pro 2 pólové (50Hz), 3f asynchronní motory v Evropě [14]

Tab. 1-1 Účinnosti motorů, dáno evropskými normami [1]

Od 16.6. 2011	Motory musí splňovat třídu účinnosti IE2.
Od 1.1. 2015	Motory se jmenovitým výkonem 7,5-375 kW musí splňovat třídu účinnosti IE3, nebo úroveň IE2 bude-li vybavena systémem variabilní rychlosti pohonu.
Od 1.1. 2017	Motory se jmenovitým výkonem 0,75-375 kW musí splňovat třídu účinnosti IE3, nebo úroveň IE2 bude-li vybavena systémem variabilní rychlosti pohonu.

V budoucnu se počítá s analogií USA trhu, kde už figuruje super prémiová třída účinnosti IE4 (Super Premium Efficiency). Je důležité zdůraznit, že tyto požadavky jsou nesmírně náročné z finančních nákladů pro výrobce (malé a střední). V úvahu se bere úplně nový design motorů. [1] [2]

V této diplomové práci je rozebrána problematika ztrát v asynchronním motoru teoreticky i prakticky. Úvodní kapitola je věnována asynchronním strojům jako takovým (jejich popisu, vlastnostem a vhodným materiálům pro výrobu). Následující kapitoly vysvětlují vznik ztrát v asynchronních strojích. Dále je zde rozebrána možnost omezení ztrát a s tím spojené zvýšení účinnosti. Praktická část se skládá z měření čtyř vzorků motorů. Ve školních laboratořích byly měřeny ve třech stavech (naprázdno, nakrátko a při zatížení). Poté byly dopočítány jednotlivé ztráty dle normy a byly vyneseny porovnávající závislosti. Poslední část této práce obsahuje simulace motorů v programu Maxwell, který využívá metodu konečných prvků. V tomto prostředí se využije různých úprav daných motorů podle teoretických předpokladů, pro zjištění dosažení vyšší účinnosti. A to vše při ideologii nezvyšování pořizovacích cen asynchronních motorů.

2 ASYNCHRONNÍ STROJE

Nejrozšířenějšími střídavými elektrickými stroji jsou asynchronní stroje. Jako každý elektrický stroj může i asynchronní stroj měnit elektrickou energii na mechanickou a naopak. V praxi se však více využívají asynchronní motory než asynchronní generátory.

Asynchronní stroj se skládá ze statoru a rotoru. Stator tvoří pevná kostra ze svařence nebo odlitku a v kostře je umístěn magnetický obvod válcového tvaru složený z ocelových plechů, ve kterých jsou vyraženy drážky pro vinutí (většinou třífázové). Pro trojfázové vinutí platí, že každá fáze je umístěna v jedné třetině drážek po obvodu vzduchové mezery. Vinutí je vyvedeno na statorovou svorkovnici se šesti svorkami, toto uspořádání umožňuje snadnou změnu konfigurace zapojení z trojúhelníku na hvězdu a naopak. Na obou stranách stroje jsou připevněny ložiskové štíty pro hřídel rotoru. Celá konstrukce musí být dostatečně tuhá, protože vzduchová mezera těchto strojů musí být co nejmenší. Na rotorové hřídeli je upevněn rotorový magnetický obvod opět složený z plechů s drážkami. Podle konstrukce rotorového vinutí se rozlišují stroje s kotvou nakrátko (Obr. 2-1) a s kroužkovou kotvou (Obr. 2-2). V případě kotvy nakrátko je aktivní část vinutí tvořena tyčemi (většinou hliníkovými) v drážkách, které jsou na obou stranách obvodu spojeny čelními kruhy nakrátko. U kroužkové kotvy je vinutí uspořádáno v cívkách podobně jako na statoru. V rotoru je spojeno do uzlu a zbývající tři vývody jsou připojeny na tři kroužky umístěné izolovaně na hřídeli. Vodivý styk s kroužky obstarávají dosedací kartáče, které jsou upevněny v držáku kartáčů na statoru a odtud vyvedeny na rotorovou svorkovnici. Připojením odporů na rotorovou svorkovnici je možné měnit parametry rotorového vinutí. Držák kartáčů je obvykle vybaven odklápečem, který umožní zvednout kartáče z kroužků a zároveň zkratovat roubíky umístěné na rotoru. Pak lze stroj provozovat, aniž by docházelo ke ztrátám při tření kartáčů a kroužků. [13]

Výkony vyráběných asynchronních strojů se pohybují od zlomků W do tisíců kW. Kmitočet nejrozšířenějších trojfázových a jednofázových motorů je 50 Hz, otáčky jsou zpravidla v mezích od 500 do 3000 ot/min, ale existují i stroje s mnohem vyššími otáčkami.

Vlastní princip činnosti asynchronního motoru je založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů vytvořených ve vinutí rotoru magnetickým polem. Asynchronní motor je založen na indukci napětí a proudů v rotoru, a proto se také občas nazývá indukčním motorem. Točivé magnetické pole se vytvoří ve vinutí statoru, kde jsou vinutí jednotlivých fází prostorově natočena o 120° s protékajícím trojfázovým harmonickým proudem.

V praxi se uvádějí otáčky asynchronních motorů v otáčkách za minutu. Synchronní otáčky [15]:

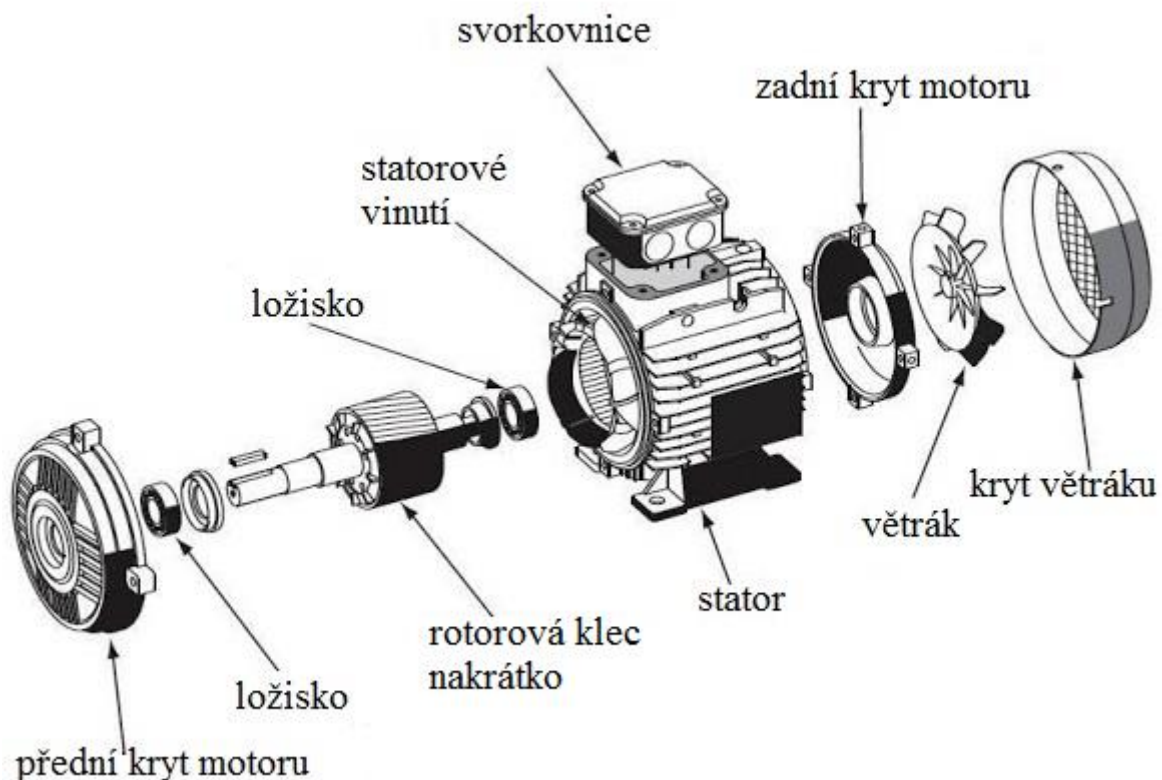
$$n_{s1} = \frac{60 f_1}{p} \quad (2.1)$$

Skutečné otáčky asynchronního motoru jsou dány vztahem [15]:

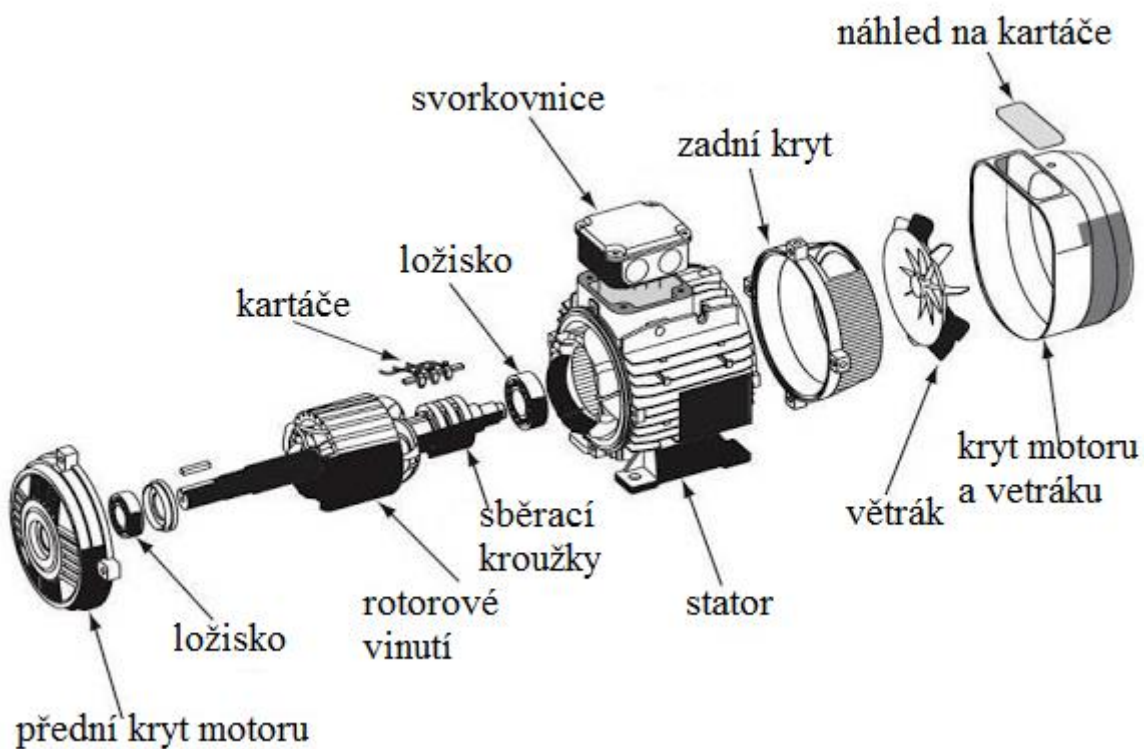
$$n = n_{s1}(1 - s) \quad (2.2)$$

Mírou „asynchronizmu“ neboli rozdílu otáček synchronních n_{s1} a otáček rotoru n je skluz [15]:

$$s = \frac{n_{s1} - n}{n_{s1}} \quad (2.3)$$



Obr. 2-1 Asynchronní motor s kotvou nakrátko [12]



Obr. 2-2 Asynchronní motor s kroužkovou kotvou [12]

Indukované proudy v obvodu rotoru vytvářejí rovněž točivé magnetické pole, které se vzhledem ke statoru stroje otáčí rychlostí danou vztahem [15]:

$$n_2 = n_{s1} - n = \frac{f_2}{p} \quad (2.4)$$

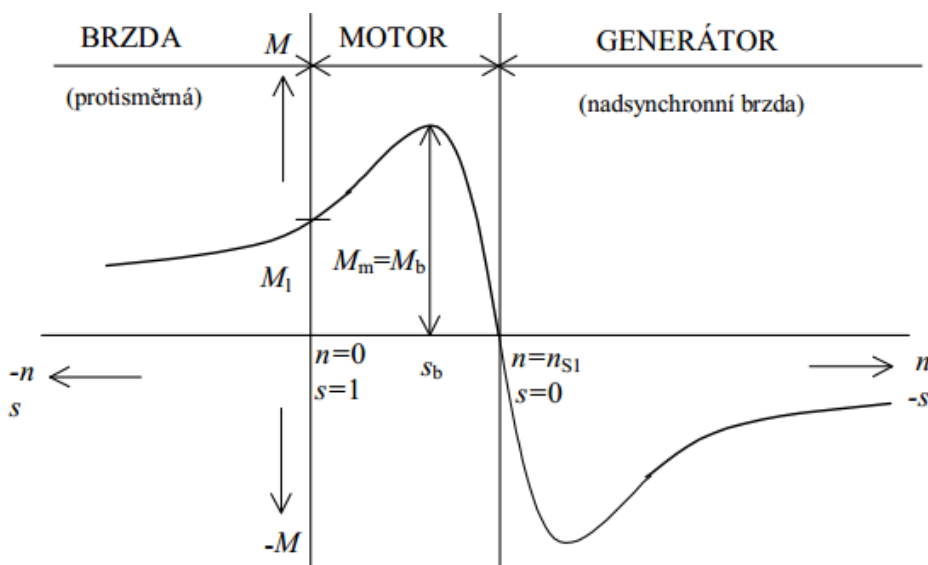
Kde frekvence f_2 je frekvence napětí a proudu ve vinutí rotoru, definováno jako [15]:

$$f_2 = n_2 p = (n_{s1} - n) \frac{f_1}{n_{s1}} = s f_1 \quad (2.5)$$

Jmenovitý točivý moment motoru na hřídeli M_{mech} pro jmenovitý výkon P_2 a jmenovité otáčky n se určí [15]:

$$M_{mech} = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{\frac{2\pi n}{60}} = 9,55 \frac{P_2}{n} \quad (2.6)$$

Grafickým vyjádřením závislosti momentu na otáčkách (tj. i na skluzu) je momentová charakteristika na Obr. 2-3. [15]



Obr. 2-3 Momentová charakteristika asynchronního stroje [15]

Motor rozbíhající se záběrným momentem M_1 je do maximálního momentu M_m v nestabilním stavu. Malá změna zatížení způsobí velkou změnu otáček a motor může být zastaven. Po překonání maximálního momentu (moment zvratu) se motor dostává do stabilního stavu a pracuje ve svém jmenovitém stavu (momentu) a jmenovitých otáčkách. Na změnu zatížení v tomto stavu reaguje motor malou změnou otáček.

Se záběrným momentem souvisí záběrný proud. Při spouštění je motor připojen k síti, ale rotor se ještě netočí (začíná se rozebíhat). Motor je v tzv. zkratu, kdy je odebírán ze sítě velký zkratový proud. Motory jsou na tento proud dimenzovány, proto se musí spouštět tak, aby se tento zkratový proud omezil.

Pro spouštění motorů s kotvou nakrátko je více způsobů. Je potřeba omezit již zmiňovaný záběrný proud, ale zároveň je důležité, aby záběrný moment zůstal co největší. Možnosti spouštění motorů:

1. Přímé připojení k síti (nejjednodušší) – motor se zapne pomocí stykače. Kvůli velikosti záběrného proudu se mohou tímto způsobem spouštět motory jen do příkonu 3 kW.
2. Přepínač hvězda trojúhelník – motor v zapojení do hvězdy je připojen na fázové napětí, které je $\sqrt{3}$ krát menší než sdružené, proud je v zapojení do hvězdy 3x menší. Po rozběhu se motor přepne do zapojení trojúhelníku. Při tomto rozběhu je ovšem menší záběrný moment, proto se takto spouštějí jen motory bez zatížení (pila, ventilátor, obráběcí stroje).
3. Spouštěcí autotransformátor – má několik odboček pro volbu vhodného převodu a napětí.
4. Rozběhová spojka – motor se rozebíhá naprázdno, po dosažení daných otáček se pomocí rozběhové spojky připojí poháněné zařízení.
5. Speciální klece – rotor je vyroben ze speciální klece – odporová, dvojité či vírové. Dochází k vylepšení momentové charakteristiky a zároveň k poklesu záběrného proudu. [6]

2.1 Materiály používané při stavbě elektrických strojů

Metodiky návrhů a výpočtů elektrických strojů dosáhly v současné době vysokého stupně dokonalosti. Dalšího zlepšení parametrů navrhovaných strojů je možné dosáhnout v mnoha případech zlepšením jakosti, aktivních materiálů, izolací a konstrukčních materiálů, které jsou využívány při konstrukci elektrických strojů. [7]

Asynchronní motory se skládají ze tří hlavních materiálů (magnetické, elektrické a izolační). Elektrický obvod je izolován od magnetického jádra. Prvořadé je snižování vířivých ztrát v magnetickém obvodu, tyto ztráty rostou s tloušťkou plechu. Izolační systém se skládá z vodiče, slotu a mezifázové izolace.

Magnetické, elektrické a izolační materiály jsou charakterizovány jejich parametry (BH křivkou, odporem, dielektrickou konstantou a elektrickým polem V/m) a také jejich ztrátami.

V asynchronních strojích se v současné době využívají magneticky měkké materiály pro ocelové plechy, které tvoří magnetický obvod motoru. Závislost BH křivky závisí na výrobních postupech. Jejich měrné ztráty ve W/kg závisí na hysterezním cyklu BH křivky, frekvenci, odporu a napětí. Nejčastějším materiálem pro vinutí statoru je čistá měď a pro rotorové klecové vinutí kotvy nakrátko hliník či mosaz. [16]

2.1.1 Materiály pro magnetické obvody

Části magnetického obvodu elektrických strojů se vyrábějí buď z tenkých ocelových plechů pro elektrotechniku (elektrotechnických plechů) nebo z lité oceli na odlitky či z litiny, eventuálně z dalších magnetických materiálů. Tenké plechy pro elektrotechniku se pokud možno vyrábějí z nejčistší oceli zkujňované v martinských pecích, nebo z elektrooceli vyrobené v elektrických obloukových pecích.

Vlastnosti oceli závisí na obsahu křemíku a na podmínkách její výroby. Ocel s malým obsahem křemíku má menší poměrnou permeabilitu a větší měrné ztráty. Ocel s vysokým obsahem křemíku mají menší ztráty vířivými proudy, ztráty hysterezní a vysokou poměrnou permeabilitu v polích s malou intenzitou. Přísada křemíku snižuje hustotu a zvyšuje rezistivitu oceli.

V elektrotechnickém průmyslu jsou využívány anizotropní plechy válcované za studena, které mají ve směru válcování větší permeabilitu a menší ztráty v polích s malou intenzitou než plechy válcované za tepla. [7]

2.1.1.1 Magneticky měkké materiály

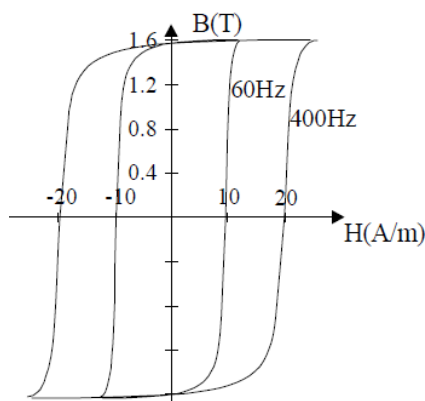
Ve vakuu je magnetická indukce B a intenzita magnetického pole H vyjádřena podle permeability vakua $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m [16]:

$$B = \mu_0 H \quad (2.7)$$

V jiném prostředí než ve vakuu dochází k magnetizaci podle [16]:

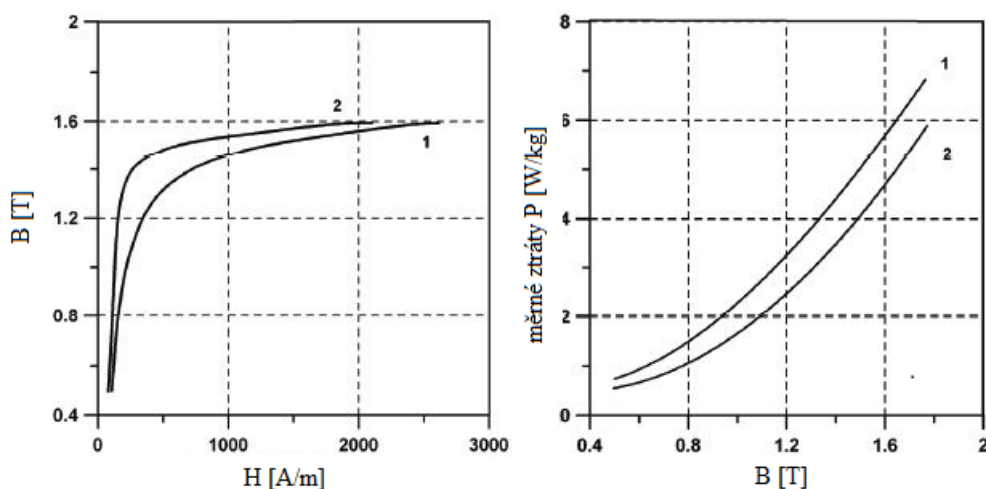
$$B = \mu H; \mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.8)$$

Kde μ je nazývané permeabilitou a μ_r relativní permeabilitou (bezrozměrná).



Obr. 2-4 BH křivka pro plech 0,5 mm [16]

Na Obr. 2-5 vlevo lze vidět dva odlišné průběhy BH křivky, kde číslem 1 je naznačen částečně zdeformovaný materiál plechů (při ražení) a číslem 2 nepoškozený materiál. Na obrázku vpravo je vyznačena závislost měrných ztrát plechů (1 částečně zdeformovaný, 2 nepoškozený materiál). [17]



Obr. 2-5 Na levém obrázku jde vidět část BH křivky a napravo je ztrátová BP křivka [17]

Magneticky měkké materiály používané v tenkých plechách mají nízkou hysterezi a ztráty vířivými proudy (méně než 2 W/kg do 1T, 60Hz). [16]

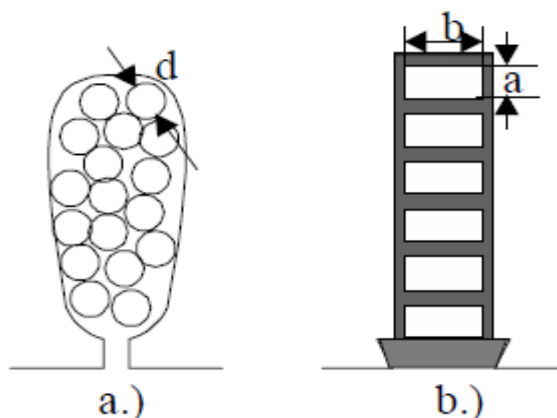
2.1.2 Materiály pro vodiče

K materiálům používaným na vodiče při stavbě elektrických strojů patří v první řadě měď a hliník. Stříbro, jehož rezistivita je o 4 % menší než rezistivita mědi, patří k nedostatkovým materiálům a v elektrických strojích se téměř nepoužívá.

Poměrně velká elektrická vodivost umožňuje široké použití hliníku v elektrotechnickém průmyslu. Důležitými vlastnostmi hliníku jsou malá hustota, nízká tavná teplota, velmi dobrá plastičnost a pevná s velmi tenkou vrstvou oxidu na povrchu chránící hliník před korozí. Hustota hliníku je asi 3,3 krát menší a rezistivita je asi 1,7 krát větší než u mědi. Proto na jednotku hmotnosti má hliník dvakrát větší využitelnost než měď. [7]

Měděné vodiče jsou využívány pro třífázové satorové vinutí. Měď má vysokou čistotu a je vyráběna nejčastěji elektrolýzou. Čistota mědi je nad 99 %. Průřez měděných vodičů (drátů), které jsou vsypány do satorových drážek, mají kruhový anebo obdélníkový tvar (Obr. 2-6). Odpor magnetického měděného vodiče $\rho_{Co} = (1,65 \div 1,8)10^{-8}$ při 20°C se mění s teplotou [16]:

$$\rho_{Co}(T) = (\rho_{Co})_{20^{\circ}\text{C}} [1 + (T - 20) / 273] \quad (2.9)$$



Obr. 2-6 Průřez měděných vodičů ve satorové drážce: a) kruhový, b) obdélníkový [16]

2.1.3 Izolační materiály

Izolační materiály se při výrobě elektrických strojů používají k izolaci částí elektrických strojů, nacházejících se na různém elektrickém potenciálu. Tyto materiály mohou být plynné, kapalně nebo pevné. V elektrických strojích se v převážné míře používají pevné izolační materiály.

Tloušťka mezizávitové a drážkové izolace určuje do značné míry rozměry a hmotnost stroje. Tepelná stálost a tepelná vodivost izolace určuje dovolené teploty a tím i volbu elektromagnetických zatížení. Izolace musí mít potřebné mechanické vlastnosti a musí umožňovat mechanizaci a automatizaci technologických procesů při výrobě. Izolace do značné míry určuje kvalitu elektrického stroje. Při oteplení izolace dochází ke stárnutí izolace, tj. zhoršení izolačních vlastností a mechanické pevnosti.

Základem pro klasifikaci izolace je tepelná stálost, tj. schopnost izolačních materiálů plnit své funkce při provozní teplotě po dobu srovnatelnou s uvažovanou dobou nasazení stroje. [7]

Hlavním účelem izolace satorového vinutí je udržet fázové proudy v cestách vinutí a zabránit mezizávitovému zkratu, fázovému zkratu a zkratu fáze se zemí. Satorové i rotorové plechy jsou od sebe izolovány speciální povrchovou úpravou (0,013 mm silnou) pro snížení vířivých ztrát v magnetickém jádře. Rotorová klec není izolována od plechů v rotoru.

Izolační materiály se vyrábějí stále tenčí a kvalitnější pro zlepšení výkonu stroje a jsou řazeny do několika tříd: A (105 °C), B (130 °C), F (155 °C), H (180 °C) a dalších méně častých.

Hlavní kladené požadavky na izolaci vinutí jsou elektrická pevnost (mechanická pevnost, odolnost proti vlhkosti, tepelná stálost) a dobrá tepelná vodivost. [16]

3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH

Charakteristickým rysem všech elektrických strojů a tedy i asynchronního stroje je skutečnost, že se při práci zahřívá. Část elektrické energie se přemění v energii tepelnou, která je nazývána ztráty. Teplo se vytváří ve všech částech stroje, v nichž dochází ke vzniku elektrických, magnetických nebo mechanických ztrát.

Udrží-li se konstantní zatížení stroje tak po určitém čase od počátku zatěžování, se dosáhne rovnovážného tepelného stavu, kdy se teplo vznikající ve stroji rovná teplu odváděnému z povrchu stroje do okolí. V tomto případě se vně stroje vytváří ustálené tepelné pole, které udržuje konstantní oteplení jednotlivých částí stroje.

Tepelné pole asynchronního stroje má velice komplikovaný charakter, který je závislý na prostorovém rozložení ztrát, na směru a rychlosti proudění chladicího vzduchu kolem ohřátých úseků stroje a na průtočném množství vzduchu. [8]

3.1 Účinnost asynchronních strojů

Pro určování účinnosti asynchronního stroje se zjišťují tyto ztráty:

1. Joulovy ztráty ve vinutí statoru ΔP_{J1} .
2. Joulovy ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{J2} .
3. Ztráty v železe statoru i rotoru ΔP_{Fe} .
4. Ztráty mechanické ΔP_{mech} (tření rotoru o vzduch, tření v ložiskách, ventilační ztráty).
5. Přídavné (dodatečné) ztráty ΔP_d
 - vířivými proudy ve vinutích statoru, rotoru i dalších částí stroje,
 - na povrchu statoru a rotoru,
 - tepové v zubech statoru a rotoru. [8]

Účinnost asynchronních motorů reprezentuje efektivnost přeměny elektrické energie na mechanickou energii na konci hřídele motoru, vypočítá se podle vzorce [3]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{mechanický}}{P_{elektrický}} = \frac{P_{mechanický}}{P_{mechanický} + \sum ztrát} \quad (3.1)$$

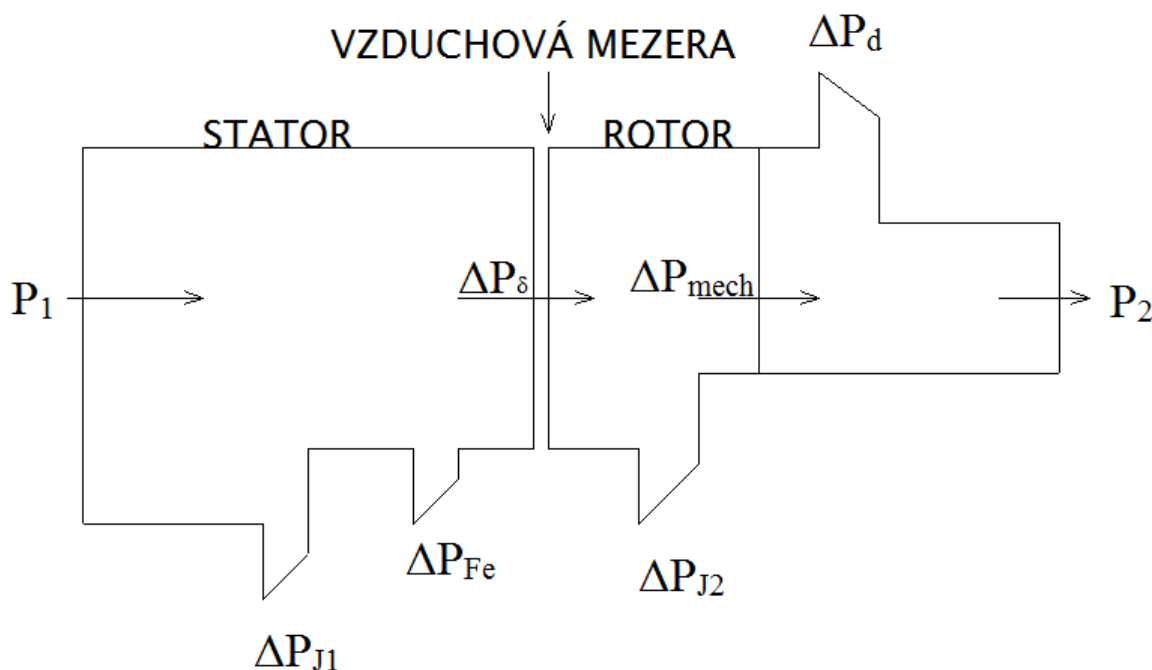
Účinnost je tedy poměr vstupního elektrického výkonu na výstupním mechanickém výkonu. Rozdíl mezi vstupním (elektrickým) a výstupním (mechanickým) výkonem je součet ztrát motoru. Ztráty vznikající při elektromechanické přeměně se mění na teplo. Bylo vypočítáno, že tyto ztráty mohou dosahovat až 60 % z vstupního příkonu. [3]

Příkon odebíraný trojfázovým elektromotorem z napájecí sítě je dán vztahem [15]:

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi \quad (3.2)$$

Kde U_1 a I_1 jsou fázové veličiny a φ je fázový posun mezi napětím a proudem.

Na Obr. 3-1 je vyznačen tok výkonu asynchronním strojem, na kterém je vidět změna činného příkonu P_1 na užitečný mechanický výkon na hřídeli P_2 .

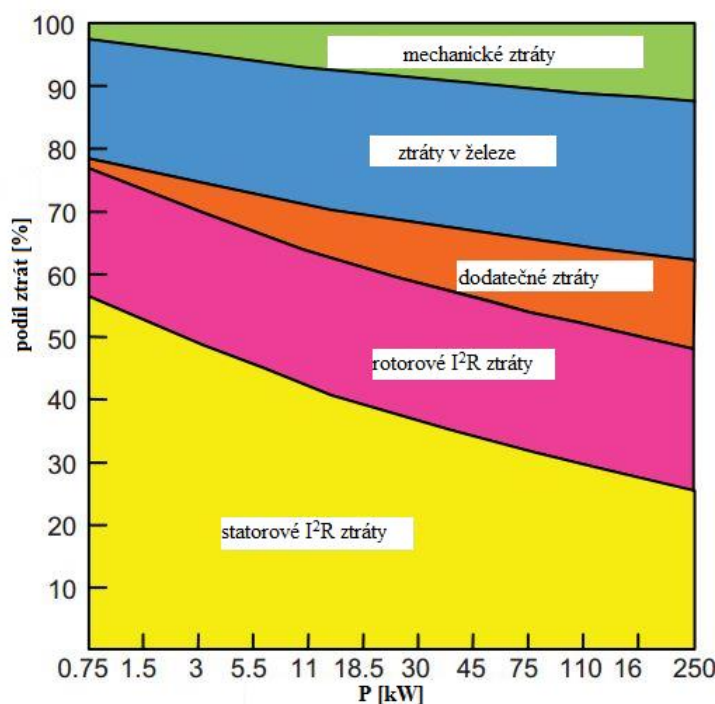


Obr. 3-1 Tok výkonu v asynchronním motoru [11]

V indukčním (asynchronním) motoru jsou celkové ztráty dány sumou ztrát [3]:

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{J1} + \Delta P_{J2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d \quad (3.3)$$

Největší část ztrát v asynchronním motoru je způsobena statorovým vinutím, dále následují ztráty v rotorovém vinutí a ztráty v železe. Ztráty dodatečné a mechanické mají nejmenší podíl na ztrátách výkonu motoru (viz Obr. 3-2). [14]



Obr. 3-2 Charakteristický podíl ztrát u 4 pólového asynchronního motoru (50Hz) [14]

3.2 Ztráty v železe

Nazývané také jako magnetické ztráty jsou způsobeny vířivými proudy a hysterezními ztrátami v nalisovaných plechách statoru a rotoru. Jsou ovlivněny velikostí procházejícího proudu a frekvencí. Tyto ztráty se mění v závislosti sycení a frekvence. Lze je zjistit měřením bez zatížení. [3]

Ztráty vířivé jsou způsobeny naindukovaným napětím v materiálu. V jednotlivých částech se tvoří miniaturní smyčky, ve kterých se indukuje procházející napětí úměrné časové změně toku. Hysterezní ztráty jsou úměrné kvalitě materiálu (ploše hysterezní smyčky).

Klasický empirický výpočet pro magnetické ztráty je založen na údajích o měrných ztrátách v železe (W/kg) podle výrobce, které jsou téměř vždy pro sinusové hodnoty indukce. Celkové ztráty v železe se rovnají [4]:

$$P_{Fe} = k_h \cdot f \cdot B^\alpha + k_e \cdot f^2 \cdot B^2 + k_a \cdot f \cdot B^{3/2} \quad (3.4)$$

Kde koeficient k_h jsou ztráty hysterezní, k_e jsou klasické vířivé a k_a jsou ztráty zvláštní vířivé. Koeficient α se běžně nastavuje na hodnotu $\alpha = 2$ a ignorují se ztráty zvláštní vířivé. Pak lze o ztrátách v železe napsat [4]:

$$P_{Fe} = f^2 \cdot B^2 \cdot \left(\frac{k_h}{f} + k_e \right) \quad (3.5)$$

3.3 Ztráty ve vinutí

Zvané také jako Joulovy ztráty jsou v rotoru a vinutí statoru. Statorové a rotorové vinutí má vnitřní odpor, který je úměrný odebíranému proudu, velikosti motoru, objemu rotorové klece a délce vinutí. Ztráty jsou rozptýleny ve formě tepla a zvyšují se s velikostí zatížení. [3]

Elektrické ztráty ve všech fázích vinutí statoru [3]:

$$P_{J1} = m \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (3.6)$$

Elektrické ztráty ve všech fázích vinutí kroužkového rotoru či v klecovém rotoru nakrátko [3]:

$$P_{J2} = m \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (3.7)$$

3.4 Ztráty mechanické

Mechanické ztráty neboli třecí a ventilační ztráty vznikají v důsledku pohybu rotoru. Třením v ložiskách umístěných na obou koncích rotoru. Mechanické ztráty závisí na velikosti motoru a na počtu pólů. [3]

Ztráty třením v ložiskách a ventilační ztráty v motorech s radiální ventilací bez radiálních ventilačních kanálů, s rotorem nakrátko a ventilačními lopatkami na kruzích nakrátko jsou [7]:

$$\Delta P_{mech} \approx K_T \left(\frac{n}{1000} \right)^2 (10D)^3 \quad (3.8)$$

U motorů s vnějším průměrem $D_e \leq 0,25 \text{ m}$ je činitel $K_T = 5$ pro $2p = 2$,

$K_T = 6$ pro $2p \geq 4$,

U motorů s vnějším průměrem $D_e > 0,25 \text{ m}$ je činitel $K_T = 6$ pro $2p = 2$,

$K_T = 7$ pro $2p \geq 4$.

Mechanické ztráty motorů s vnějším ofukováním ($0,1 \leq D_e \leq 0,5$) m [7]:

$$\Delta P_{mech} \approx K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 \quad (3.9)$$

$K_T = 1$ pro $2p = 2$,

$K_T = 1,3(1 - D_e)$ pro $2p \geq 4$.

U motorů s radiální ventilací středního a velkého výkonu jsou mechanické ztráty [7]:

$$\Delta P_{mech} = 1,2 \cdot 2 p t_p^3 (n_{vk} + 1) 10^3 \quad (3.10)$$

Kde n_{vk} je počet radiálních ventilačních kanálů, jestliže kanály nejsou je $n_{vk} = 0$.

U motorů s axiální ventilací jsou mechanické ztráty dány vztahem [7]:

$$\Delta P_{mech} \approx K_T \left(\frac{n}{1000} \right)^2 (10D_v)^3 \quad (3.11)$$

Kde D_v je vnější průměr ventilátoru, ve většině konstrukcí je možné uvažovat $D_v \approx D_e$.

$K_T = 2,9$ pro motory s $D_e \leq 0,25 \text{ m}$,

$K_T = 3,6$ pro motory s $D_e = 0,25$ až $0,5 \text{ m}$.

U motorů velkého výkonu ($0,5 < D_e < 0,9 \text{ m}$) jsou mechanické ztráty [7]:

$$\Delta P_{mech} = K_T (10D_e)^3 \quad (3.12)$$

Hodnoty činitele K_T pro tyto motory jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 3-1 K_T k výpočtu mechanických ztrát motorů velkého výkonu [7]

$2p$	2	4	6	8	10	12
K_T	3,65	1,5	0,7	0,35	0,2	0,2

3.5 Přídavné (dodatečné) ztráty při zatížení

Dodatečné ztráty jsou předmětem řady studií a analýz, protože jsou těžko zjistitelné a měřitelné. Jsou popsány jako ztráty, které zůstávají po odečtení ztrát ve vinutí, ztrát v magnetickém obvodu a mechanických ztrát. Největší příspěvek těchto ztrát je generován při zatížení motoru. Hlavní příčinou těchto ztrát jsou vyšší harmonické magnetického napětí. Důsledkem těchto ztrát může být vibrování motoru. [3]

Velikost těchto ztrát se dříve udávala jako $0,5 \div 2 \%$ z příkonu motoru, ale to už dle nové normy neplatí, počítá se samostatně dle individuálních výsledků měření. [5]

4 PŘÍDAVNÉ ZTRÁTY

Tyto ztráty, jak již bylo zmíněno, jsou velice těžko zjistitelné, a proto jsou v této kapitole více rozebrány.

Měření přídavných ztrát na asynchronních strojích je obtížnou záležitostí. Při měření bylo zjištěno, že mimo ztráty naprázdno a nakrátko se vyskytují ještě další ztráty závislé na zatížení stroje. Jsou to tzv. přídavné ztráty při zatížení.

V celé čtvrté kapitole se vychází z [10].

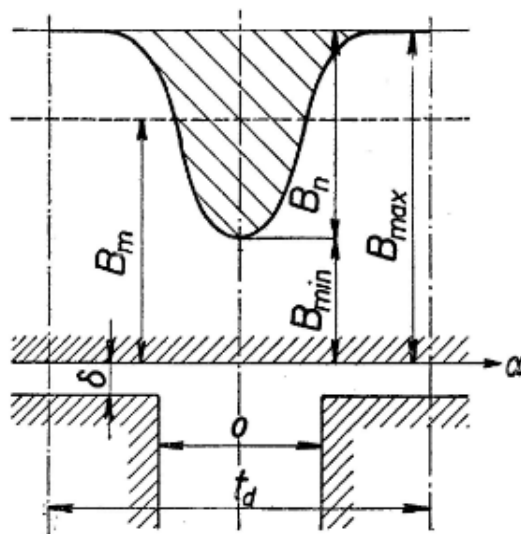
4.1.1 Carterův činitel

Pro lepší orientaci v následujících kapitolách je vysvětlen Carterův činitel, který zohledňuje vliv drážkování na magnetickou vodivost vzduchové mezery. Drážky pro uložení vinutí jsou vytvořeny v magneticky vodivém materiálu. Předpokládá se, že proti hladkému magnetickému pólu je drážkovaná kotva. Má-li magnetická indukce ve vzduchové mezeře při nedrážkované kotvě hodnotu B_{max} , klesne indukce při stejném magnetickém napětí v ose drážky na hodnotu B_{min} (Obr. 4-1). Hodnota B_{min} je funkcí otevření drážky σ , velikosti původní vzduchové mezery (nyní mezery nad zubem) δ a drážkové rozteče t_d . Střední indukce přitom klesla z původní hodnoty B_{max} na hodnotu B_s . Této změně střední indukce nad drážkovou roztečí tedy odpovídá fiktivní zvětšení vzduchové mezery nedrážkovaného obvodu z hodnoty δ na hodnotu δ' . Vztah mezi těmito veličinami udává rovnice [10]:

$$\delta' = k_c \delta \quad (4.1)$$

Z této rovnice vyplývá vztah [10]:

$$B_s = \frac{1}{k_c} B_{max} \quad (4.2)$$

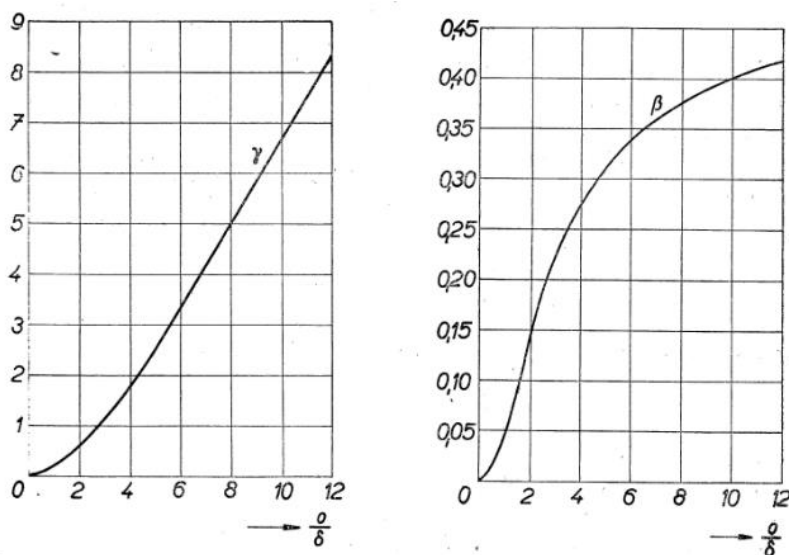


Obr. 4-1 Průběh magnetické indukce nad drážkou [10]

Výpočet činitele k_c provedl jako první Carter příhodným zobrazením nekonečně hluboké drážky o nekonečné rozteči t_d vytvořené v materiálu s nekonečnou permeabilitou ($\mu = \infty$). Po něm má činitel název *Carterův činitel*. Podle Cartera platí [10]:

$$k_c = \frac{t_d}{t_d - \gamma \delta} \quad (4.3)$$

Koeficient γ je funkcí poměru otevření drážky ke vzduchové mezeře.


 Obr. 4-2 Průběhy veličin γ a β jako funkce poměru o/δ [10]

Amplituda poklesu indukce v ose drážky B_n (viz Obr. 4-1) je dána vztahem [10]:

$$B_n = 2\beta B_{\max} \quad (4.4)$$

V němž veličina β je rovněž funkcí poměru o/δ (Obr. 4-2).

Rozbor ukazuje, že předpoklad nekonečné hloubky drážky je přípustný, ale u nekonečné rozteče může v určitých případech vést ke značným chybám. Z toho důvodu byly v praxi zavedeny různé korekce Carterova činitele. Například pro oblast $o/\delta > 12$ platí s dobrým přiblížením vztah [10]:

$$k_c = \frac{t_d}{t_d + \delta - \frac{3}{4}o} \quad (4.5)$$

Poměrně dobré výsledky dává též přibližný vzorec Ossanův [10]:

$$k_c = \frac{t_d + 8\delta}{(t_d - o) + 8\delta} \quad (4.6)$$

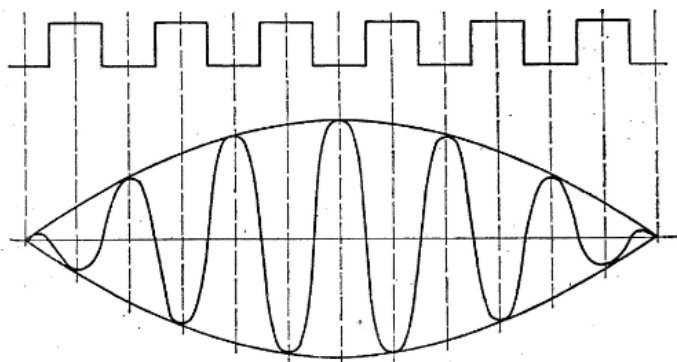
4.2 Povrchové ztráty naprázdno

Je-li motor s drážkovaným statorem a hladkým rotorem, tak průběh intenzity magnetického pole o p pólových dvojicích se vlivem drážkování statoru deformuje. Výsledné pole je dáno superpozicí původního pole o intenzitě [10]:

$$H_0(\alpha, t) = H_0 \cos(\omega t - p\alpha) \quad (4.7)$$

a přidavné pole o intenzitě [10]:

$$H_1(\alpha, t) = H_1 \cos(\omega t - p\alpha) \cos Z_1 \alpha \quad (4.8)$$



Obr. 4-3 Průběh přidavného pole při zanedbání vyšších harmonických [10]

Otáčí-li se železný rotor při normálním chodu vzhledem k přidavnému poli o intenzitě $H_1(\alpha, t)$ prakticky synchronní rychlostí ω , vnikají na povrchu rotoru vířivé proudy, které mají za následek přidavné ztráty a tím i oteplení železa v rotoru. Obdobně vznikají i další přidavné ztráty na povrchu statoru vlivem drážkování rotoru.

Povrchové ztráty se značně snižují použitím tenkých plechů. To platí pro případ, že se povrch rotoru po složení již neopravovává. Při opravování by mohlo dojít k porušení izolace mezi plechy. Za předpokladu, že střední hodnota magnetické indukce B_δ je ve vzduchové mezeře podél celého vrtání sinusově rozložená, pak pro výpočet povrchových ztrát platí vztah [10]:

$$P_v = \frac{k_0}{2} (Z_1 n_s)^{1,5} (B_{01} t_{d1})^2 \pi D l \left(\frac{t_{d1} - o_1}{t_{d1}} \right) \quad (4.9)$$

kde amplituda B_{01} je dána vztahem [10]:

$$B_{01} = \beta_1 k_{c1.2} \beta_\delta \quad (4.10)$$

Podobně se určí velikost přídavných ztrát na povrchu statoru, vzniklých drážkováním rotoru [10]:

$$P_{v1} = \frac{k_0}{2} (Z_2 n_s)^{1,5} (B_{02} t_{d2})^2 \pi D l \left(\frac{t_{d2} - o_2}{r_{d2}} \right) \quad (4.11)$$

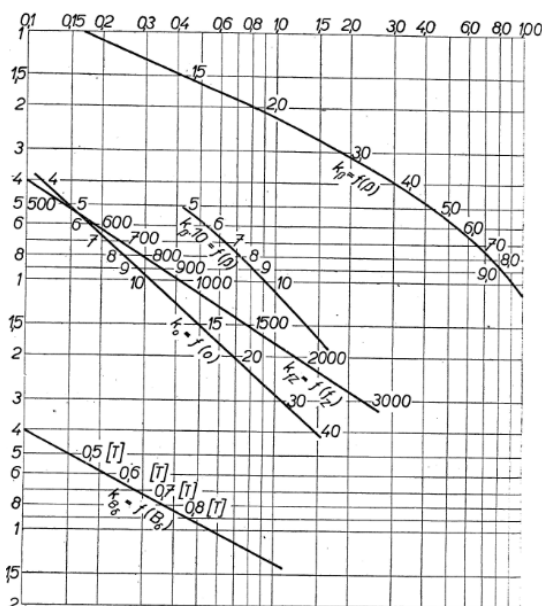
Tab. 4-1 Hodnoty koeficientu k_0 pro různé materiály

Masivní povrch z kujného železa	$k_0 = 23,3$
Masivní povrch z litiny	$k_0 = 17,5$
Rotor skládaný z plechů o tloušťce 2 mm	$k_0 = 8,6$
Rotor skládaný z plechů o tloušťce 0,55 mm	$k_0 = 2,8$

Existují i odlišné metody výpočtu povrchových ztrát, např. pomocí Spoonerových koeficientů. Dle Spoonera lze vyjádřit povrchové ztráty vztahem na jednotku povrchu vztahem [10]:

$$P_v' = K_{B9} k_{fz} k_\beta k_0 \quad (4.12)$$

Hodnoty koeficientů jsou zaznamenány v křivkách (Obr. 4-4) pro dynamové plechy o tloušťce 0,5 mm a při ztrátovém čísle $V_{10} = 3 \text{ W/kg}$.

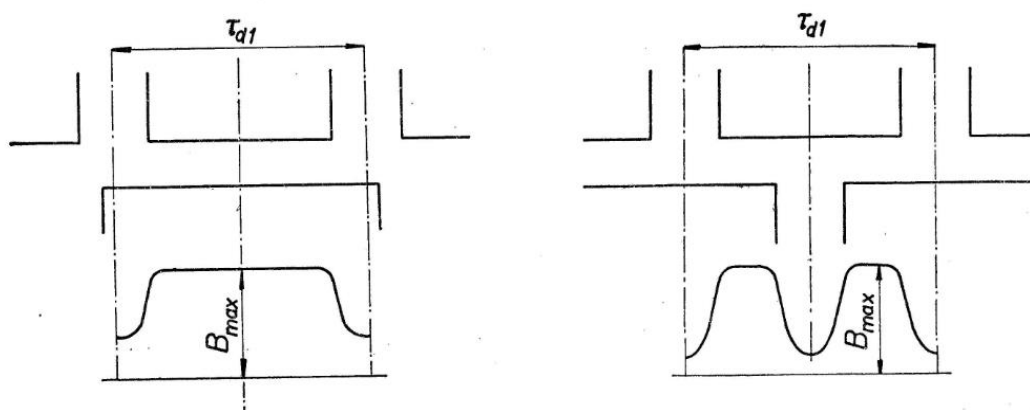


4.3 Pulzační ztráty naprázdno

Magnetická indukce v zubech je závislá na vzájemné poloze statorových a rotorových zubů proti sobě vlivem drážkování statoru a rotoru. Je-li zub statoru proti zubu rotoru, je magnetická vodivost vzduchové mezery maximální. V opačném případě je magnetická vodivost vzduchové mezery minimální. Průběhy magnetické indukce nad drážkovou roztečí t_{d1} jsou vyznačeny na Obr. 4-5.

Pohybuje-li se rotor vůči statoru, mění se periodicky magnetická vodivost, a tím i magnetický tok drážkovou roztečí statoru. Tok Φ procházející statorovým zubem poté pulzuje mezi svou maximální hodnotou Φ_{max} a minimální hodnotou Φ_{min} , tím vznikají v železe statoru přídavné ztráty vířivými proudy. Těmto ztrátám se říká pulzační ztráty [10]:

$$P_{P1} = (3n_s Z_2 B_{P1}) \cdot 10^{-8} \quad (4.13)$$



Obr. 4-5 Průběhy B_{max} nad drážkovou roztečí t_{d1} pro výpočet pulzačních ztrát [10]

4.4 Přídavné ztráty při zatížení

Fyzikální příčinou přídavných ztrát při zatížení jsou vyšší harmonické magnetického napětí, které vyvolávají tzv. povrchové a pulzační ztráty. U kotev nakrátko se pak ještě vyskytují při rovných tyčích přídavné ztráty v kleci a při šikmých neizolovaných tyčích ztráty způsobené protékajícím proudem.

Přesný výpočet těchto ztrát je velmi komplikovaný a pro případ šikmé klece je pro neurčitost příčné impedance téměř nemožný. Podle teoretických analýz i měření jsou přídavné ztráty při zatížení úměrné druhé mocnině zatěžovacího proudu. [10]

5 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

Zvýšení účinnosti indukčních motorů se řadí do dvou částí:

- A. První je nazývána jako „High Tooling cost (HTC)“ (zvyšování nákladů na výrobu), založena na novém designu motorů s vysokými náklady na investice, zejména v důsledku realizování nových výzkumů, nových zařízení pro výrobu a nových výrobních linek. Bez finančních limitů tento přístup umožňuje odpovídající účinnostní vzestup, jak je uvedeno u některých výrobků na trhu od největších elektrotechnických firem na světě.
- B. Druhá je známá jako „No Tooling Cost (NTC)“ (nezvyšování nákladů na výrobu). Je založena na produkci technologických postupů s minimem ekonomických dopadů pro společnosti a koncové zákazníky. Zejména se jedná o modifikaci statorového vinutí, zvýšení plnění drážky, jakost magnetického materiálu, délky magnetického jádra, účinnějšího technologického zpracování rotoru pro snížení přídavných ztrát, a to v důsledku žíhání plechů. Cílem je získat co nejlepší účinnost za použití stejného typu a tvaru statoru i rotoru které jsou přijaté nynější standardizovanou výrobou bez nákupu nových výrobních zařízení. NTC přístup je velmi praktický z hlediska nákladů na výrobu, i když umožňuje menší růst účinnosti s ohledem na HTC. [1]

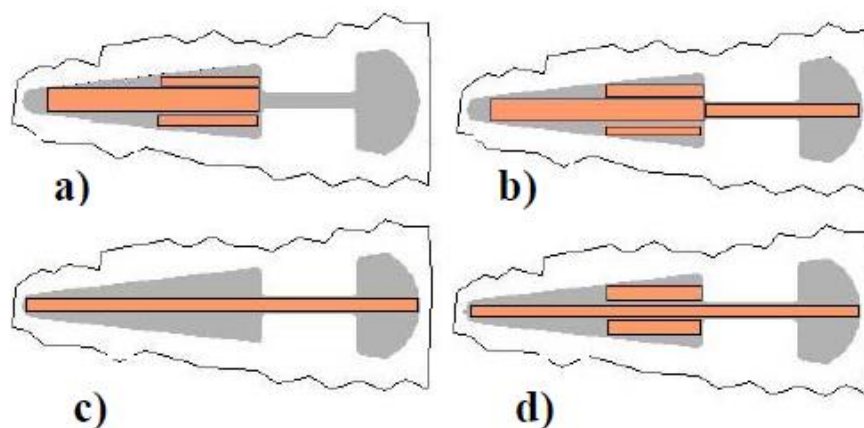
V teoretické i praktické části se analyzuje pouze metoda *nezvyšování provozních nákladů*. Níže zmíněné teoretické návrhy budou zkoumány blíže při vlastních simulacích v kapitole 8.

5.1 Rotor s měděnými tyčemi, které jsou umístěny v drážkách hliníkové klece

Přítomnost měděných tyčí v rotorové drážce umožňuje snížení odporu rotoru a to v důsledku snížení Joulových ztrát rotoru. Je důležité zmínit, že takové uspořádání drážky neovlivní negativním způsobem spouštění motoru z hlediska proudu, ani točivého momentu. [2]

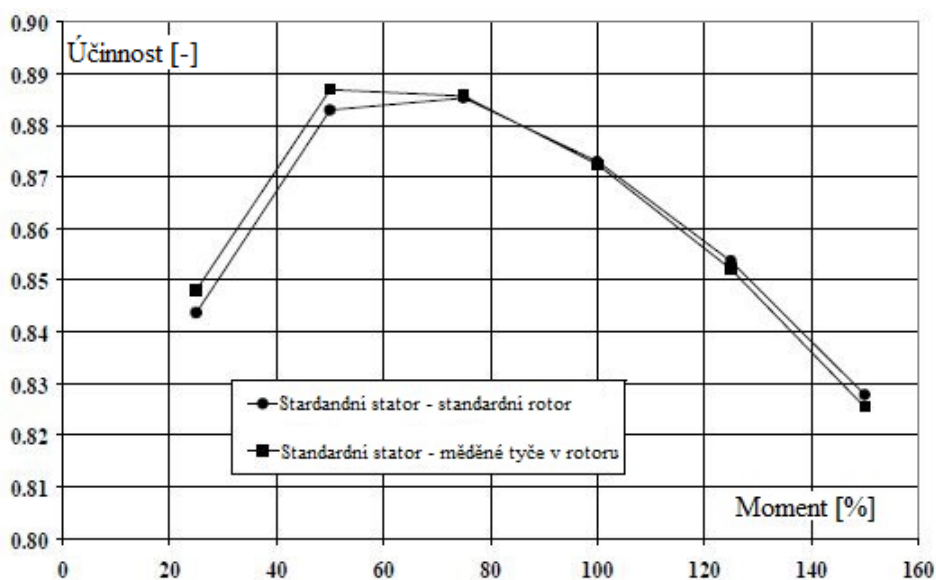
Konstrukční úvahy byly následující. Posuzování bylo provedeno na drážkách rotoru u 11 kW asynchronního motoru za použití obdélníkových měděných tyčí, a tak aby se nezvýšily výrobní náklady. Hlavním cílem bylo získat minimální odpor rotorové klece. Pozornost musí být také věnována rozběhu motoru z hlediska proudu a záběrového momentu. Skutečností je, že úsilí připojit nižší hodnoty odporu při jmenovitých otáčkách (včetně velkého množství mědi v drážce) může vést k neakceptovatelnému rozběhovému proudu i točivého momentu. Jinak řečeno, aby se zachovaly rozběhové vlastnosti motoru, musí být zvoleno rozložení měděné tyče tak, aby byl zaručen dostatečný skin efekt.

Obr. 5-1 ukazuje typy částí drážek rotoru s vloženými měděnými pláty. Aby bylo zajištěno snížení odporu rotoru a zároveň správného účinku skin efektu, byla provedena analýza postavení a tvaru měděných tyčí v rotorové kleci pomocí metody konečných prvků. Při porovnání s výchozím motorem výsledky ukázaly, že snížení odporu rotoru bylo až o 20 % při zanedbatelné změně rozběhového proudu a točivého momentu. Z nasimulovaných výsledků bylo vybráno pro realizaci prototypu řešení „d“ kvůli montážní jednoduchosti. [2]



Obr. 5-1 Typy rozložení měděných plátů uložených v hliníkovém odlitku rotorové drážky [2]

Simulace ukázaly, že zavedení měděných tyčí do hliníkové klece rotoru nevykazuje výrazné zlepšení účinnosti motoru (Obr. 5-2). Díky počítačové simulaci za pomoci metody konečných prvků je patrné, že dojde ke snížení odporu rotorových tyčí až o 20 % (při menší než jmenovité zátěži). Ovšem při jmenovité zátěži má standardní motor o trochu vyšší účinnost než analyzovaný prototyp. Tento výsledek je velmi zvláštní s ohledem na dané množství mědi začleněné do drážek rotoru. [2]



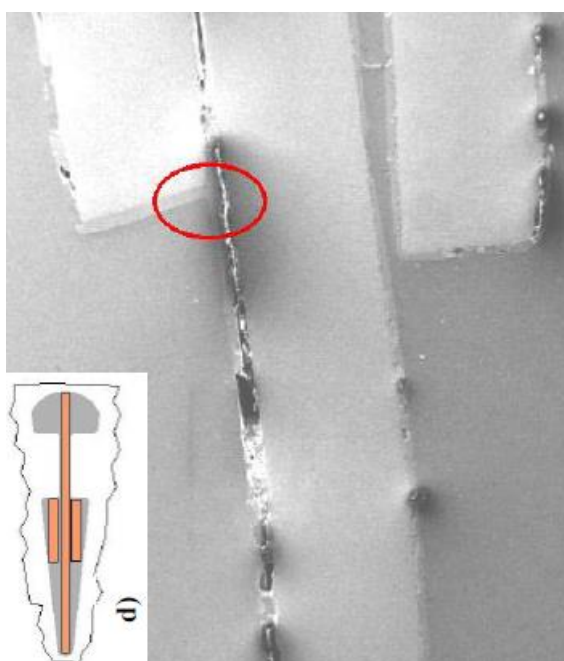
Obr. 5-2 Porovnání účinnosti u 11kW (73Nm) motorem a prototypem s měděnými pláty v drážkách klece rotoru [2]



Obr. 5-3 Detail rotoru s měděnými tyčemi v hliníkové kleci [2]

Při výrobě prototypu rotorové drážky hrály některé jevy důležitou roli během odlití hliníku:

- Přítomnost vzduchových bublin v drážkách rotoru během odlití hliníku, to zejména zapříčinilo právě přítomnost měděných tyčí, protože hliník fúzí nedosahuje na menší části drážek rotoru.
- Přítomnost oxidu v kontaktu mezi povrchem měděné tyče a hliníku. Tato oxidace je produkována díky vysoké teplotě v průběhu tlakového odlití hliníku.
- Špatný kontakt mezi měděnými tyčemi a hliníkovým povrchem v důsledku jejich fyzikálních vlastností. Za to mohou především špatné svařovací vlastnosti hliníku. [2]



Obr. 5-4 Zobrazení nedokonalého spojení měděných tyčí v hliníkové v rotorové drážce [2]

5.2 Prodloužení délky magnetického obvodu

Tento způsob pojednává o snížení ztrát v magnetickém obvodu. Prodloužení magnetického obvodu v axiálním směru je považován ze jednoduchý a efektivní způsob jak zvýšit účinnost motoru. V tomto případě „nový“ motor využívá stejný typ plechů statoru i rotoru jako originální. Je dobré zdůraznit, že nárůstem délky motoru v axiálním směru je nárůst účinnosti rovnocenný jako snížení výkonu u většího stroje. Jinak řečeno je materiálové omezení (indukce ve vzduchové mezeře a proudová hustota) v prodlouženém motoru menší než u standartních motorů. Důsledkem toho jsou nižší ztráty motoru. Napětí bývá konstantní, tudíž je potřeba změnit (přepočítat) počet závitů statorové vinutí. V důsledku většího množství materiálu pro výrobu jsou i nepatrně vyšší pořizovací náklady.

Je-li délka motoru nezměněna, točivý moment a napájecí napětí jsou závislé na počtu závitů a aktivním materiálu, viz rovnice [2]:

$$\begin{aligned}M_n &= I_0 \cdot B_0 \cdot \delta_0 \\U_n &= I_0 \cdot B_0 \cdot N_0\end{aligned}\tag{5.2}$$

V důsledku nárůstu délky magnetického obvodu motoru, se musí zavést obecné zásady návrhu. Díky nárůstu délky motoru jsou zavedeny poměry (zadání s „'“ znamená prodloužený) [2]:

$$\lambda = \frac{l'}{l_0}; \beta = \frac{B'}{B_0}; \sigma = \frac{\delta'}{\delta_0}; \nu = \frac{N'}{N_0}\tag{5.3}$$

Kde l je délka motoru, B je magnetická indukce, δ je proudová hustota v rotorové kleci a N je počet závitů.

Aby měl motor stejný jmenovitý moment a stejné napájecí napětí jako originální motor, musí platit [2]:

$$1 = \lambda \cdot \beta \cdot \sigma\tag{5.4}$$

$$1 = \lambda \cdot \beta \cdot \nu\tag{5.5}$$

$$\sigma = \nu\tag{5.6}$$

$$\beta = \frac{1}{\lambda \cdot \nu}\tag{5.7}$$

U nově navrženého motoru uvažujeme změny:

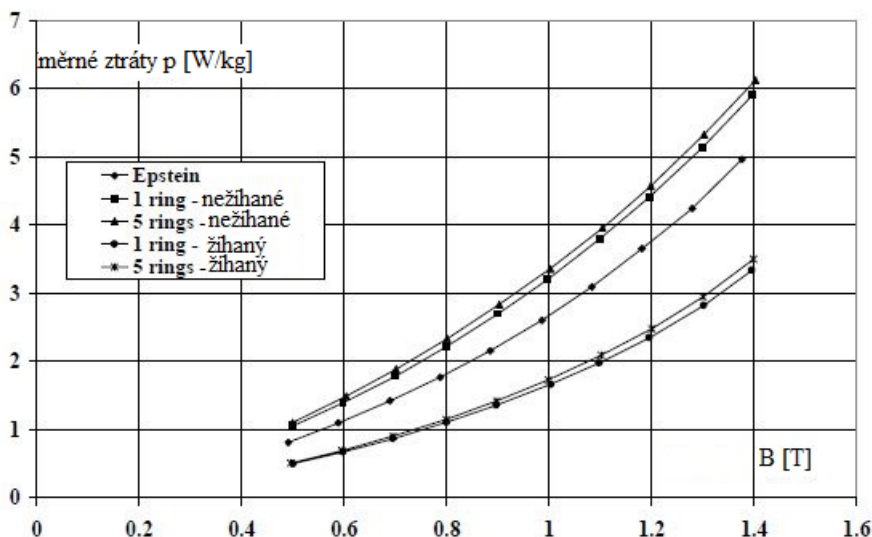
- návrh změny parametrů (hlavní rozměry, přepočítané vinutí, atd.)
- magnetizační proud versus křivka napájecího napětí (podle měření naprázdno)
- ztráty v magnetickém obvodu na křivce napájecího napětí (podle měření naprázdno)

Je důležité zdůraznit, že efektivita zvyšování účinnosti prodloužením magnetického obvodu zahrnuje zvětšení objemu, hmotnosti a nákladů motoru v důsledku použití více materiálu. [2]

5.3 Zlepšení kvality materiálu plechů

Aplikované žíhání jádra statoru umožňuje zlepšení magnetických i elektrických vlastností plechů (snížení magnetických ztrát a magnetizačního proudu).

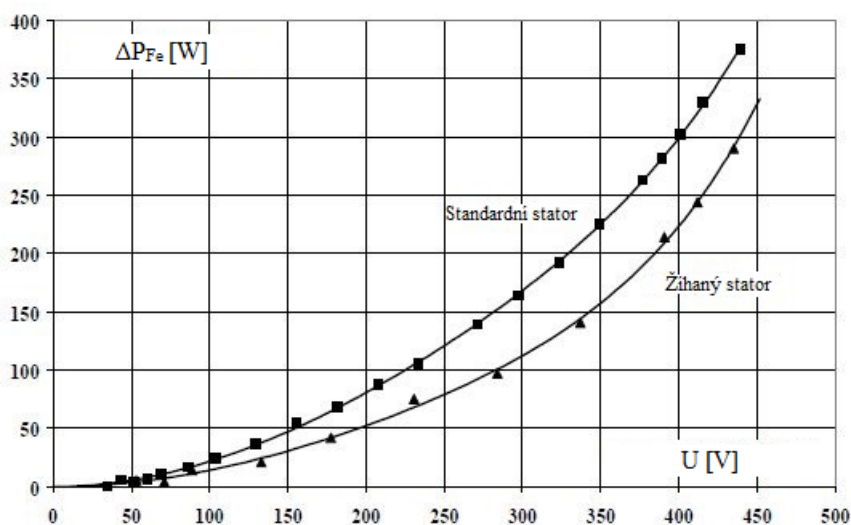
Obr. 5-5 znázorňuje měrné magnetické ztráty před a po žíhání toroidního vzorku. Z obrázku je patrné, že žíhání umožňuje až 50 % snížení magnetických ztrát.



Obr. 5-5 Porovnání mechanických ztráty v nežíhaném a žíhaném vzorku [2]

Proces žíhání jádra motoru byl proveden při 730 °C. Žíhané byly plechy statoru i rotoru (v obvodu rotoru lze magnetické ztráty zanedbat), tím se očekává zlepšení propustnosti materiálu s následným snížením magnetizačního proudu i snížení Joulových ztrát nezatíženého statoru.

Výsledky experimentů byly zjištěny měřením naprázdno, nakrátko a při zatížení. Na Obr. 5-6 je vidět, že mechanické ztráty žíháním klesly až o 25 % při jmenovitém napětí. Magnetizační proud se naopak vůbec nezměnil. Nezanedbatelné zvýšení účinnosti motoru nastává hlavně při menším zatížení než jmenovitém.



Obr. 5-6 Porovnání magnetických ztrát standartního a žíhaného jádra [2]

Plechý mají také menší ztráty, jestliže jsou vypálené laserem, než když jsou vyraženy. Ovšem laserové vypalování je mnohem nákladnější.

5.4 Zvýšení činitele plnění drážky

Důležitým faktorem je činitel plnění vinutí, podle nynějších výrobních postupů nebývá plnohodnotně využit. Jedná se tedy o omezení největších ztrát, které se díky Joulovým ztrátám v motoru tvoří.

Zuby jsou po magnetické stránce nejvíce zatěžovaným místem magnetického obvodu a proto je při návrhu asynchronních strojů snaha volit takové rozměry drážek, které umožňují umístění nutného počtu vodičů vinutí a izolace v co nejmenším prostoru. Využití prostoru drážky pro umístění vodičů se vyjadřuje činitelem plnění drážky k_{dr} , který udává poměr celkového průřezu všech vodičů v drážce k ploše drážky S_d [7]:

$$k_{dr} = \frac{S_v V_d n_p}{S_d} \quad (5.8)$$

Kde S_v je průřez vodiče, V_d je počet vodičů v drážce a n_p je počet paralelních vodičů (drátů) tvořících jeden vodič (efektivní).

Činitel k_{dr} závisí na celkovém množství izolace v drážce, neboli na tloušťce drážkové a cívkové izolace a izolace vodičů a na tloušťce různých izolačních vložek. Je nutné brát v úvahu i tzv. mrtvý prostor nezaplňný izolací ani vodiči. Při nárůstu tloušťky izolace se činitel zmenšuje. To vede k horšímu využití plochy a tudíž i celé zubové zóny stroje.

U vinutí z obdélníkových průřezů je činitel vypočítán dostatečně přesně, protože při návrhu je přesně určena poloha každého vodiče v drážce. U vsypávaných vinutí z drátů není možné přesně předem určit polohu vodiče v drážce. Mimoto hustota rozmístění vodičů v drážce není konstantní a to závisí na síle, kterou vyvine navíječ při ukládání vinutí do drážky. Přílišná hustota uložení vodičů kruhového průřezu je spojena s poklesem spolehlivosti v důsledku mechanických poškození izolace vodičů.

Hustota uložení vodičů v drážce se vyjadřuje technologickým činitelem plnění drážky k_T , který je vyjádřen [7]:

$$k_T = \frac{d_{vi}^2 V_d n_p}{S_d} \quad (5.9)$$

V čitateli zlomku je součin plochy čtverce opsaného izolovanému dílčímu vodiči a průměru d_{vi} a počtu všech dílčích vodičů v drážce $V_d n_p$. Ve jmenovateli je plocha drážky bez izolace, ve které se mohou nacházet vodiče vinutí. Snaha je dosáhnout hustoty v rozmezí 0,7 až 0,75 při ručním navíjení a 0,7 až 0,72 při strojním navíjení. [7]

Tab. 5-1 Střední hodnoty činitelů plnění drážky [7]

typ vinutí	hodnoty činitelů	
	k_T	k_{dr}
Vsypávaná vinutí z lakovaného drátu kruhového průřezu na napětí do 660 V	0,72	0,3

Zvětšením průměru vodiče ve statorové drážce, by bylo možno získat nižší odpor vinutí, a tím i snížit proudovou hustotu:

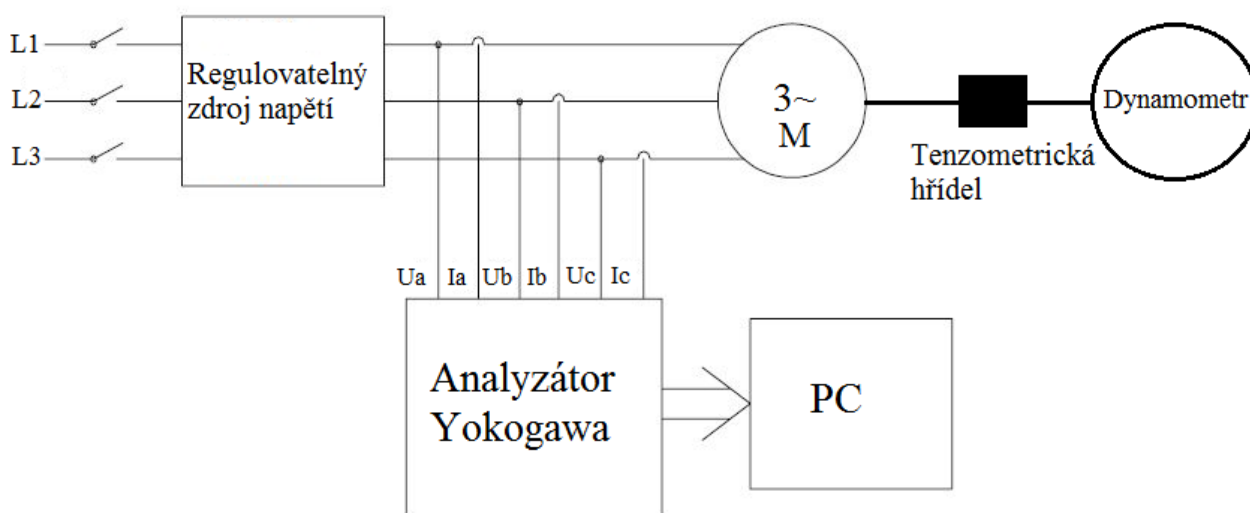
$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (5.10)$$

6 POSTUP MĚŘENÍ ZTRÁT ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

Měřením na poskytnutých vzorcích motorů byly zjišťovány jednotlivé ztráty. Měření bylo realizováno ve třech provedení a to při zatížení, kdy se nastavoval moment na dynamometru, a byly odečítány naměřené hodnoty. Následně naprázdno, kdy se nastavovalo napájecí napětí, a byly odečítány naměřené hodnoty. A nakonec nakrátko, kdy byl rotor zabrzděn a napětím se nastavoval jmenovitý proud.

Motor byl před samotným měřením přes hodinu spuštěn, aby došlo k ustálení teplot ve všech částech motoru, tím bylo docíleno objektivních hodnot. Kdyby teploty motoru nebyly konstantní, nastala by nevynucená chyba měření.

Motor byl napájen přes třífázový regulovatelný zdroj napětí. Snímané hodnoty byly odečítány z třífázového analyzátoru Yokogawa a ukládány do PC, hodnoty odporů byly měřeny multimetrem. Měřicí pracoviště (Obr. 6-1) ještě obsahovalo daný motor, tenzometrická hřídel TORQUE-MASTER pro přesné snímání momentu na hřídeli (jmenovitým moment 5 Nm, maximální snímatelné otáčky 20 000 ot/min) a dynamometr.



Obr. 6-1 Schéma zapojení měření

6.1 Měření odporů vinutí

Je důležité měřit odpory statorového vinutí před a po každé zkoušce (dáno normou [5]). Odpor statorového vinutí byl měřen za studena před zapnutím motoru, při jmenovitém stavu, po zatížení, před zkouškou naprázdno a po zkoušce naprázdno. Přičemž jmenovitého stavu bylo dosaženo po ustálení teplot v motoru (záleží na velikosti daného motoru). Předpokladem je čím větší objem motoru, tím delší doba ustálení teploty. Kdyby byl motor studený, tak by byly konstantní ztráty vyšší a to je nežádoucí.

Každá z fází se měří zvlášť a výsledný odpor se dělí dvěma, protože se jedná o motor zapojený do hvězdy. Pro libovolnou fázi platí:

$$R_x = \frac{R_{0x}}{2} \quad (6.1)$$

Kde index x je číslo fáze vinutí a index $0x$ je naměřená hodnota odporu. Naměřené velikosti odporů slouží k dopočítání statorových ztrát.

6.2 Měření naprázdno

Stavem naprázdno se rozumí stav, kdy se motor točí bez zátěže na hřídeli, otáčky motoru jsou takřka synchronní a rotor je brzděn pouze mechanickými ztrátami. Rotorovým vinutím protéká zanedbatelný proud a tak jsou Joulovy ztráty v rotorovém vinutí téměř nulové.

Měření bylo provedeno od nejvyššího napětí, toto napětí nesmí přesáhnout $150\% \times U_n$, ovšem z daného zdroje napětí bylo možno dosáhnout jen $U_{max} = 466,5 \text{ V}$ a po kroku 30 V bylo napětí snižováno a odečítány hodnoty U, I, P_0 , dokud proud stále klesal a nezačal stoupat.

Stroj odebírá ze sítě činný výkon na pokrytí mechanických ztrát, ztrát ve vinutí statoru a ztrát v železe statoru (rotor se otáčí téměř stejně rychle jako točivé pole, ztráty v železe rotoru jsou zanedbatelné) a hlavně jalový výkon na vytvoření magnetického pole. Jalová složka proudu značně převyšuje činnou složku, účinník je proto velmi malý (cca 0,1) [13]:

$$\cos \varphi = \frac{\Delta P_0}{\sqrt{3} U_0 I_0} \quad (6.2)$$

Odpor vinutí byl pro každý napěťový krok odlišný, a tak statorové ztráty [14]:

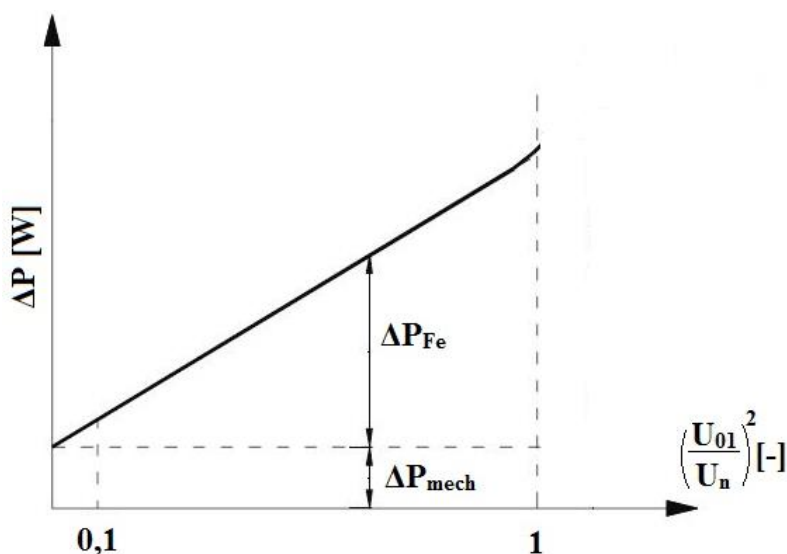
$$\Delta P_{J1} = 3 R I_0^2 \quad (6.3)$$

Joulovy ztráty ve vinutí statoru ΔP_{J1} byly odečteny od ztrát naprázdno ΔP_0 , a tak byly získány společně mechanické ztráty a ztráty v železe magnetického obvodu [14]:

$$\Delta P_0 - \Delta P_{J1} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = \Delta P_k \quad (6.4)$$

Grafické znázorněním rozdílu $\Delta P_0 + \Delta P_{J1}$, dále označovány jako ztráty konstantní ΔP_k (dle normy [5]), na druhé mocnině napětí $\Delta P_k = f(U_0^2)$ a extrapolací na nulové napětí se zjistí hodnota ztrát mechanických ΔP_{mech} . Tato složka ztrát je závislá na otáčivé rychlosti stroje, která byla po celou dobu konstantní. Ztráty v železe se následně zjistí [5]:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_k - \Delta P_{mech} \quad (6.5)$$



Obr. 6-2 Určení ztrát magnetických a mechanických [16]

6.3 Měření nakrátko

Je stav při zabrzděném rotoru, kdy jsou otáčky nulové. Statorové a rotorové (točivé) pole působí proti sobě a výsledný tok je velmi malý, ve stroji v podstatě existují jenom rozptylové toky. Při měření proud stoupá s napětím velmi rychle a dosahuje jmenovité hodnoty při malém napětí.

Ztráty v železe jsou zanedbatelné, ztráty vznikají pouze průtokem proudu přes odpory obou vinutí. Účinnost je skoro konstantní, je dán poměrem odporů a rozptylových reaktancí a dosahuje hodnoty cca 0,5. Ztráty nakrátko závisí na I^2 a při lineární závislosti U a I závisí i na U^2 . [13]

Záběrný moment při sníženém napětí se vypočítá z poměru kvadrátů sníženého napětí U_{1n} k jmenovitému napájecímu U_1 [11]:

$$M_{zab} = M_{nam} \frac{U_{1n}^2}{U_1^2} \quad (6.6)$$

6.4 Měření při zatížení

Z měření při zatížení lze určit statorové a rotorové Joulovy ztráty, ztráty v železe (určené pomocí výpočtu z normy a odečtení z křivky naprázdno Obr. 7-3) a dodatečné ztráty.

Indukční motor byl připojen přes spojku na dynamometr, na kterém byl nastaven zátěžný moment. Postupovalo se od hodnoty momentu $M \times 1,5$ až k nulovému momentu po kroku 0,5 Nm.

Ze zapojených měřicích přístrojů bylo možné odečíst hodnoty příkonu, výkonu, účinnosti, otáček, proudů a napětí jednotlivých fází. Z těchto hodnot byly dopočítány všechny potřebné hodnoty k určení účinnosti a ztrát. Všechny ztráty byly určeny dle normy ČSN EN 60034-2-1 [5].

Moment motoru potřebný pro nastavení měření byl vypočítán ze štítkových hodnot motoru podle vzorce [15]:

$$M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2\pi \frac{n}{60}} \quad (6.7)$$

Joulovy ztráty ve statoru byly vypočítány stejně jako při měření naprázdno [3]:

$$\Delta P_{J1} = 3RI^2 \quad (6.8)$$

Joulovy ztráty rotoru byly vypočítány z příkonu stroje, Joulových statorových ztrát a mechanických ztrát, násobeno skluzem stroje [14]:

$$\Delta P_{J2} = (P_1 - \Delta P_{J1} - \Delta P_{Fe})s \quad (6.9)$$

Výkon byl vypočítán podle [14]:

$$P_2 = 2\pi Mn / 60 \quad (6.10)$$

Mechanické ztráty jsou totožné z měření naprázdno. A dodatečné jsou dány rozdílem [14]:

$$\Delta P_d = P_1 - P_2 - \Delta P_{J1} - \Delta P_{J2} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{mech} \quad (6.11)$$

Účinnost se rovná výkonu lomeno příkonu. Avšak u každého motoru vyšly rozdílné hodnoty mechanických ztrát, a tak pro zjištění elektrické účinnosti při stejné hladině mechanických ztrát, jsou k výkonu stroje připočítávány rozdíly těchto mechanických ztrát.

7 MĚŘENÍ ZTRÁT NA ASYNCHRONNÍCH MOTORECH

K ověření poznatků o ztrátách v asynchronním motoru byly k analýze vybrány čtyři motory od společnosti Atas Náchod a.s., s různými úpravami, které jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 7-1 Parametry měřených motorů

název motoru	délka	plechy		závitů	Ø vinutí
[-]	[mm]	statoru	rotoru	[-]	[mm]
základní	60	M700-50A	M700-50A	92	0,53
prodloužený	70	M700-50A	M700-50A	80	0,56
kvalitnější statorové plechy	60	M270-35A	M700-50A	92	0,53
kvalitnější plechy	60	M270-35A	M270-35A	92	0,6

První z měřených motorů je sériově vyráběný motor s označením T22VT512 s délkou 60 mm a vyraženými plechy, nazývaný jako *základní*. Druhý motor má prodloužený magnetický obvod o 10 mm, čímž by mělo dojít ke zmenšení magnetické indukce ve vzduchové mezeře a tím i ke zmenšení ztrát v železe. Další motor má kvalitnější statorové plechy neboli plechy s menším ztrátovým činitelem. A poslední čtvrtý motor má kvalitnější statorové i rotorové plechy a vinutí z širšího drátu, tudíž mu vzrostl činitel plnění drážky, který je u těchto motorů malý. Díky automatizovanému navíjení vinutí, je činitel menší, než kdyby se vinutí vsypávalo ručně. Tento motor by měl vykazovat nejmenší ztráty, a to hlavně díky plechům s malým ztrátovým číslem.

První měření je popsáno detailněji a další tři měření už jsou bez příslušných komentářů, jelikož jde o totožné měření a počítání.

7.1 Měření základního motoru

Štítkové hodnoty základního motoru Atas Náchod T22VT512 při 50 Hz:

Tab. 7-2 Parametry základního motoru Atas Náchod

I_n [A]	1,6
U_n [V]	340-460
$\cos\varphi$ [-]	0,83
P_2 [W]	600
n [min^{-1}]	2830

Pro výpočet ztrát bylo zapotřebí znát hodnoty odporů při různých stavech. Přepočítané hodnoty jednotlivých odporů vinutí z naměřených hodnot jsou v Tab. 7-3.

Tab. 7-3 Hodnoty odporů vinutí základního motoru

R_1	R_2	R_3	
[Ω]	[Ω]	[Ω]	
12,985	13,715	13,470	za studena
13,290	14,040	13,755	při jmenovitém stavu
12,985	13,865	13,470	po zatížení
12,020	12,680	12,505	před zkouškou naprázdno
11,670	12,285	12,140	po zkoušce naprázdno

7.1.1 Měření naprázdno

Podle normy by se měla zkouška naprázdno dělat po ustálení ztrát naprázdno, což lze považovat za splněné, když se zkouška naprázdno provádí po zkoušce zatížení. [5]

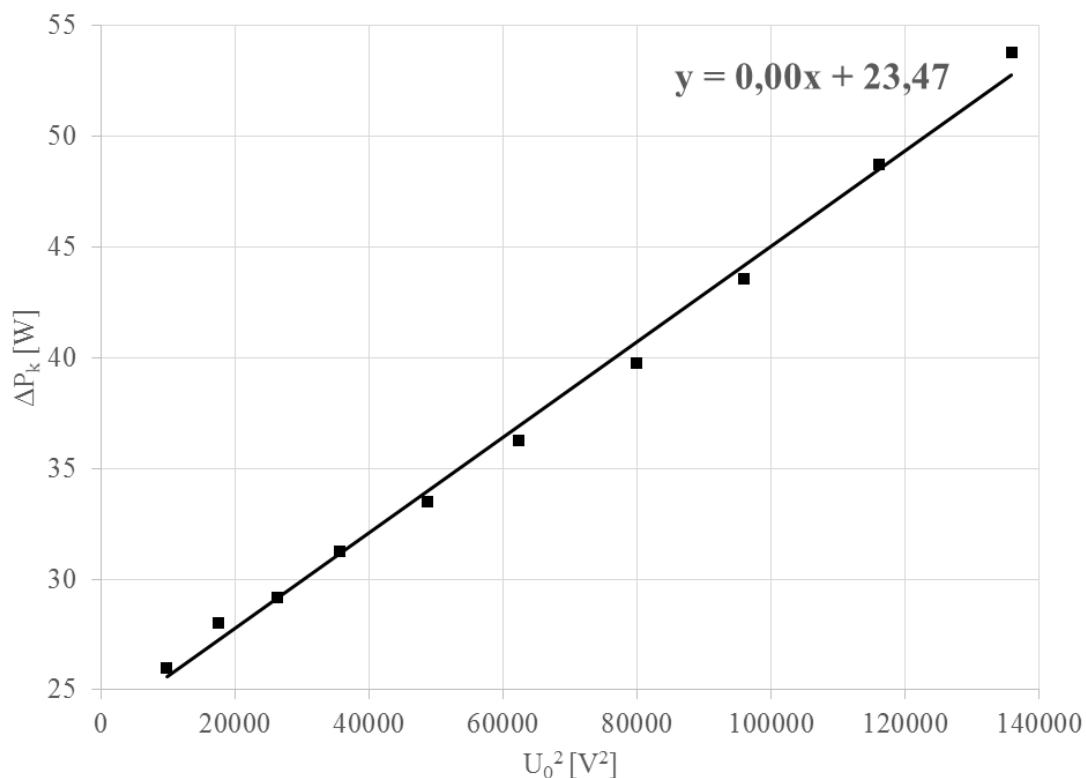
Velkou roli hraje teplotní podmínka v motoru zejména při měření malého zatížení. Motor musí být teplotně v ustáleném provozním stavu, protože se očekává snížení mechanických ztrát v důsledku lepších vlastností ložiskového maziva a také snížení ztrát vířivými proudy v plechách v důsledku zvýšení elektrického odporu.

Podle normy ČSN EN 60034-2-1 byly dopočítány ztráty z měření naprázdno. [5]

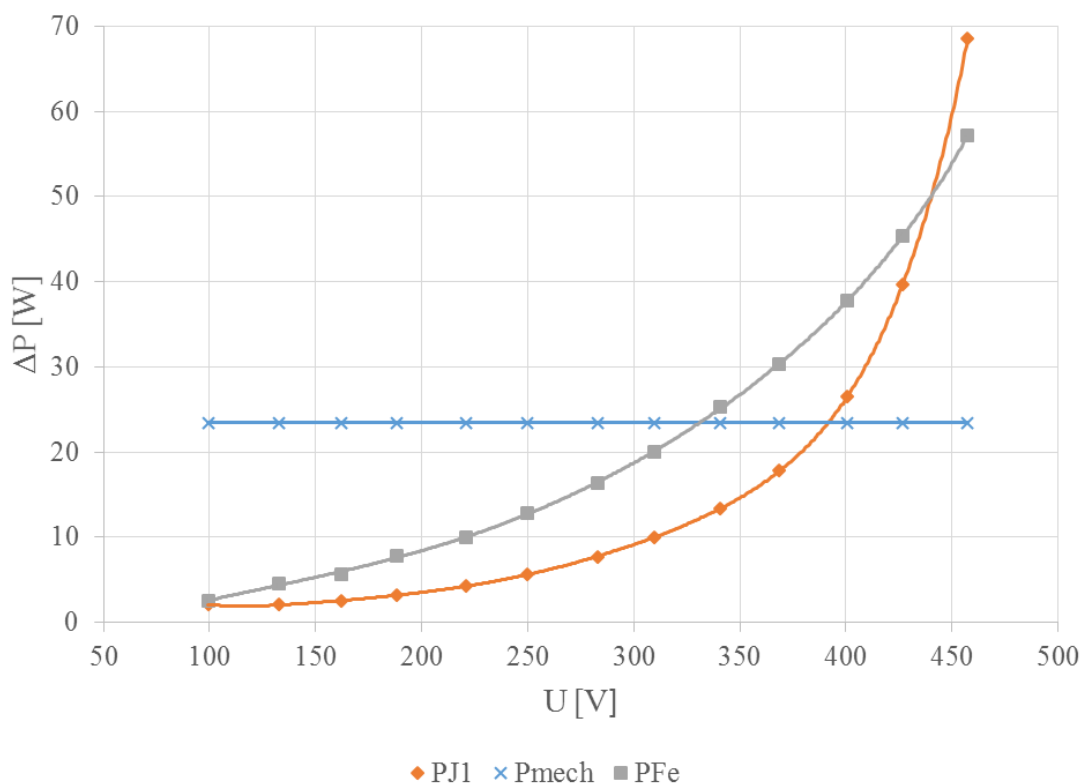
Tab. 7-4 Naměřené a vypočítané hodnoty měření naprázdno základního motoru

U_1	U_2	U_3	U_{avr}	I_1	I_2	I_3	I_{avg}		ΔP_0	ΔP_{J1}	ΔP_k	ΔP_{mech}	ΔP_{Fe}
[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]		[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
455,7	457,6	459,0	457,4	1,39	1,38	1,37	1,38		149,1	68,50	80,60	23,47	57,1
425,5	426,6	428,1	426,7	1,06	1,04	1,04	1,05		108,5	39,67	68,83	23,47	45,4
398,9	401,2	402,3	400,8	0,87	0,87	0,83	0,86		87,8	26,54	61,26	23,47	37,8
367,0	368,9	369,9	368,6	0,71	0,71	0,68	0,70		71,6	17,83	53,77	23,47	30,3
339,4	341,2	341,5	340,7	0,61	0,62	0,60	0,61		62,1	13,38	48,72	23,47	25,3
308,8	309,6	310,9	309,8	0,53	0,53	0,51	0,53		53,5	9,96	43,54	23,47	20,1
281,8	282,9	283,5	282,8	0,46	0,47	0,46	0,46		47,5	7,73	39,77	23,47	16,3
249,2	249,8	249,5	249,5	0,39	0,39	0,40	0,40		41,9	5,65	36,25	23,47	12,8
220,3	220,8	221,0	220,7	0,35	0,34	0,34	0,34		37,8	4,29	33,51	23,47	10,0
188,5	188,7	188,3	188,5	0,30	0,29	0,30	0,30		34,4	3,17	31,23	23,47	7,8
161,8	162,1	162,4	162,1	0,27	0,26	0,26	0,26		31,7	2,51	29,19	23,47	5,7
132,5	132,4	133,0	132,6	0,25	0,24	0,24	0,24		30,1	2,11	27,99	23,47	4,5
99,0	99,2	99,5	99,2	0,24	0,24	0,24	0,24		28,1	2,09	26,01	23,47	2,5

Po odečtení ztrát Joulových od příkonu naprázdno, vzniknou ztráty konstantní ΔP_k . Podle nich a druhé mocnině napětí se zjistí mechanické ztráty (Obr. 7-1). Ztráty v železe vzejdou z rozdílu konstantních a mechanických ztrát viz Tab. 7-4.



Obr. 7-1 Určení mechanických ztrát ze závislosti $\Delta P_k = f(U_0^2)$ základního motoru



Obr. 7-2 Vypočítané ztráty při měření naprázdno v závislosti na napětí $\Delta P = f(U)$ základního motoru

7.1.2 Měření při zatížení

Ve výpočtech, kde se vyskytuje U nebo I , se počítá se střední hodnotou všech fází. Tab. 7-5 obsahuje naměřená data a následující Tab. 7-6 vypočítaná data z měření při zatížení. Je patrné, že s klesajícím zatížením klesají i ztráty od 311,78 W při zatíženém stavu až po 91,78 W při nezatíženém stavu. Nejvyšší účinnost motoru vyšla při jmenovitém momentu stroje 2,043 Nm.

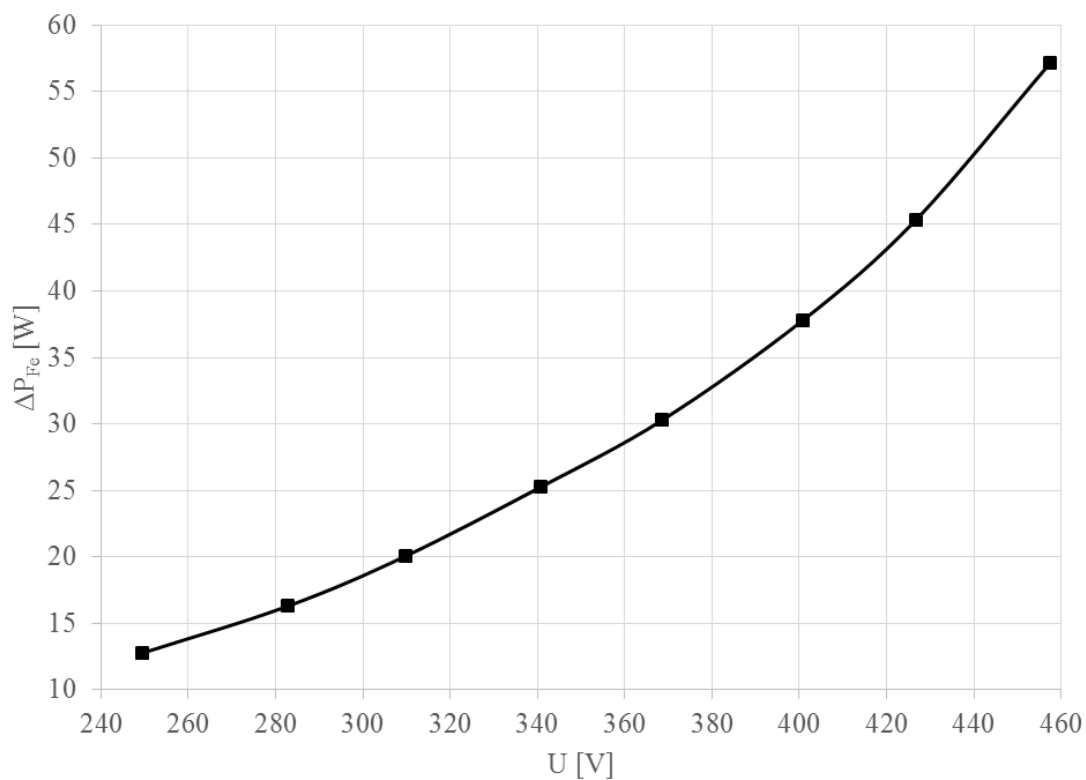
Tab. 7-5 Naměřené hodnoty při zatěžovací zkoušce základního motoru

M	n	U ₁	U ₂	U ₃	U _{avr}	I ₁	I ₂	I ₃	I _{avrg}	cosφ	P ₁
[Nm]	[ot/min]	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]	[-]	[W]
3,083	2736	398,0	400,9	401,9	400,2	1,96	1,99	1,97	1,97	0,873	1195,1
2,561	2792	399,0	401,5	402,6	401,0	1,66	1,69	1,67	1,67	0,847	985,1
2,043	2841	399,2	401,8	403,0	401,3	1,40	1,43	1,40	1,41	0,802	785,3
1,523	2886	399,4	402,2	403,2	401,6	1,18	1,21	1,17	1,18	0,724	596,3
1,006	2926	399,2	402,0	403,0	401,4	1,01	1,03	0,99	1,01	0,596	417,0
0,483	2963	399,7	402,2	403,4	401,8	0,90	0,91	0,87	0,89	0,395	245,9
0,031	2993	399,8	402,3	403,5	401,9	0,87	0,86	0,83	0,85	0,171	101,5

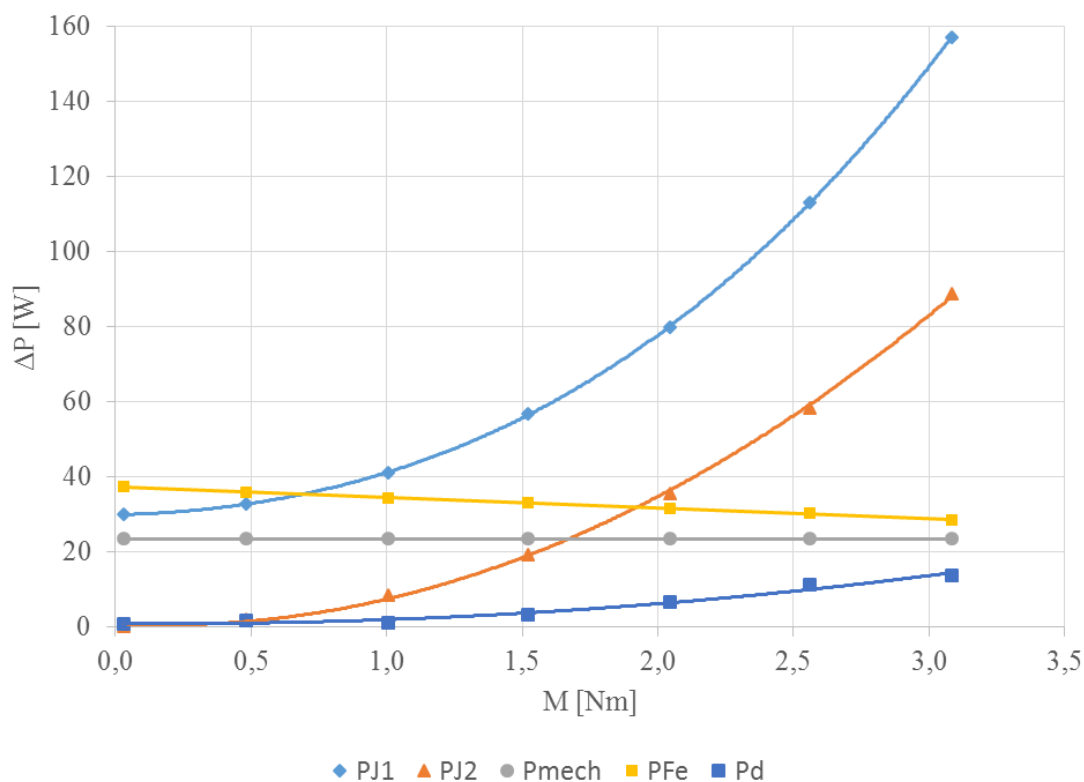
Tab. 7-6 Vypočítané hodnoty z měření při zatížení základního motoru

P ₂	ΔP _{J1}	ΔP _{mech}	ΔP _{Fe}	ΔP _{J2}	ΔP _d	ΔP _{cel}	η
[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[-]
883,32	157,11	23,47	28,65	88,82	13,73	311,78	0,74
748,78	112,94	23,47	30,30	58,37	11,24	236,32	0,76
607,81	79,98	23,47	31,70	35,70	6,64	177,49	0,77
460,28	56,73	23,47	33,20	19,24	3,38	136,02	0,77
308,25	41,22	23,47	34,50	8,42	1,14	108,75	0,74
149,87	32,67	23,47	36,00	2,19	1,70	96,03	0,61
9,72	29,99	23,47	37,30	0,08	0,95	91,78	0,10

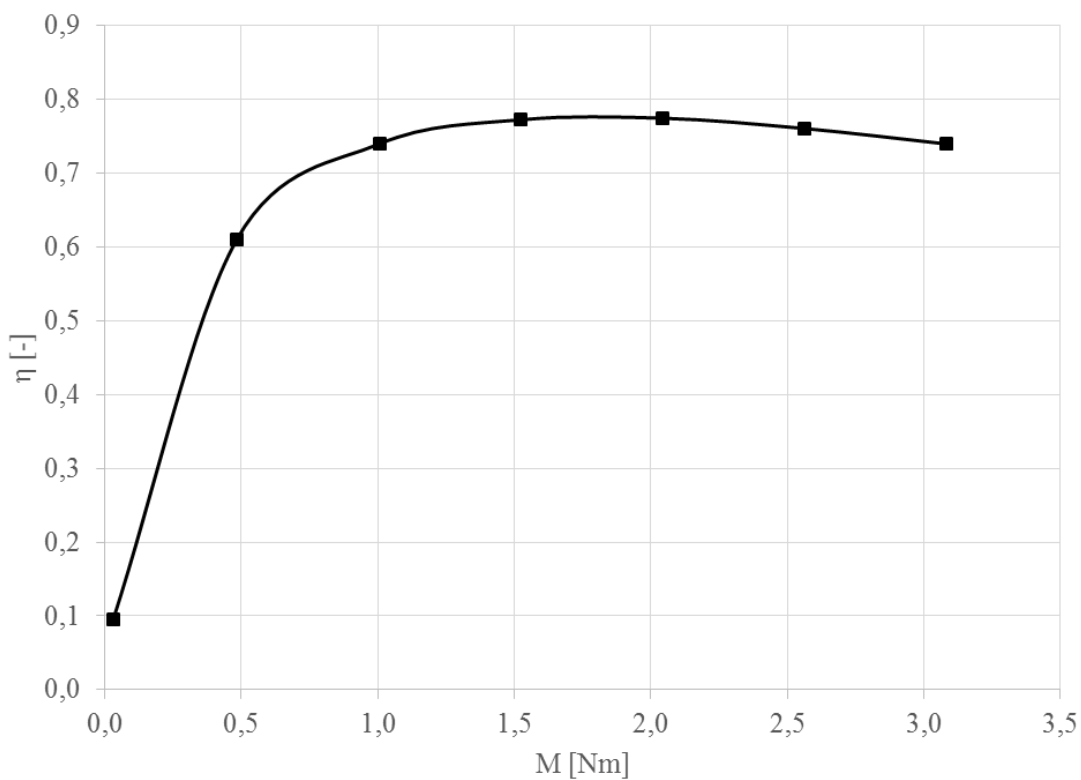
Pro zjištění ztrát v železe ze zatěžovacího měření je nutné vykreslit křivku ztrát v železe z měření naprázdno a dále dle vzorců z normy [5] určit velikost napětí pro odečtení přesných ztrát v železe.



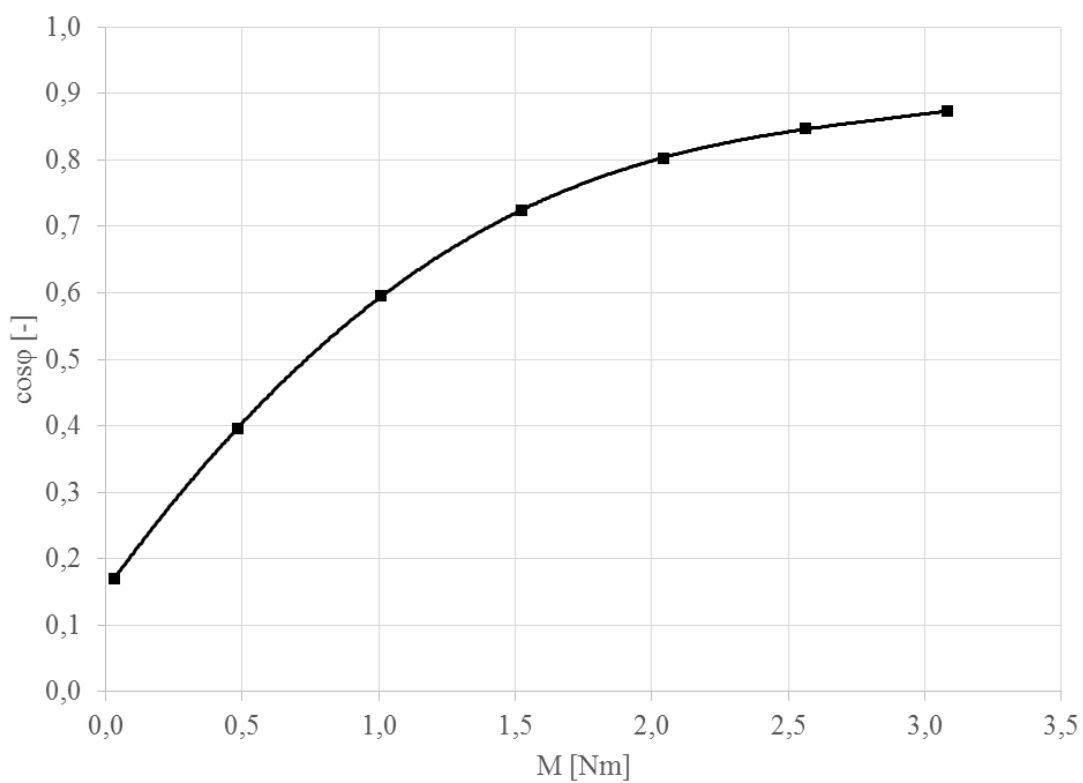
Obr. 7-3 Závislost pro odečítání ΔP_{Fe} dána ze zkoušky naprázdno základního motoru



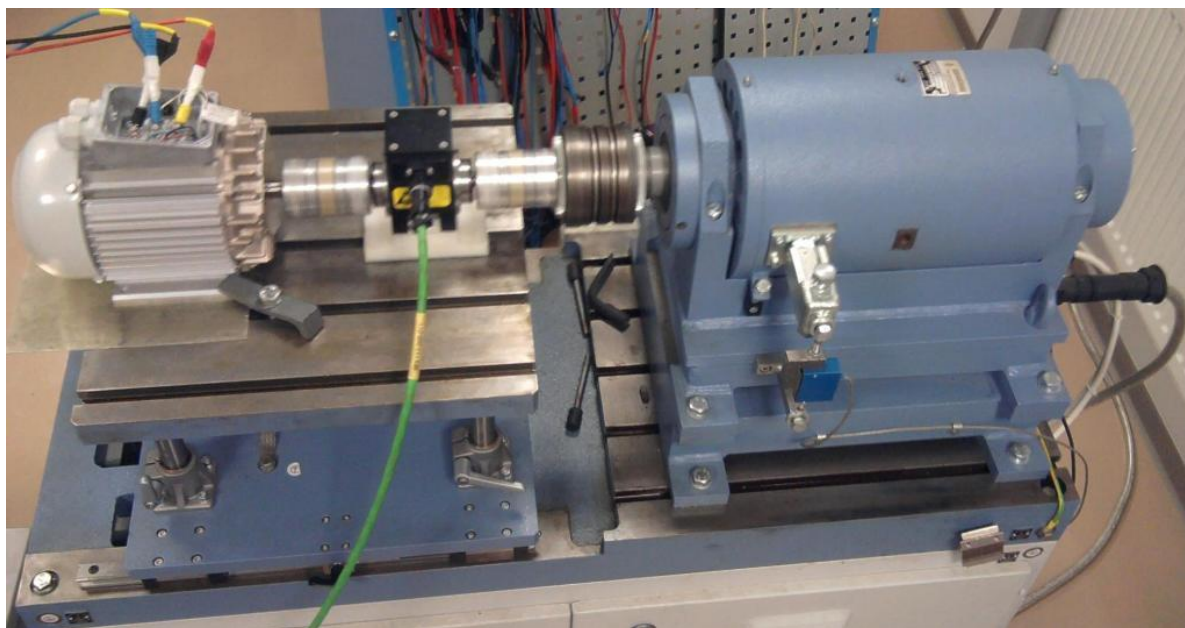
Obr. 7-4 Závislost jednotlivých ztrát při zatížení na momentu $\Delta P = f(M)$ základního motoru



Obr. 7-5 Závislost účinnosti na momentu $\eta = f(M)$ základního motoru



Obr. 7-6 Závislost účiníku na momentu $\cos\varphi = f(M)$ základního motoru



Obr. 7-7 Měřicí pracoviště základního motoru (motor – tenzometrická hřídel – dynamometr)

7.2 Měření prodlouženého motoru

Jedná se o stejný motor jako v předešlé kapitole (základní) s tím rozdílem, že motor má o 10 mm prodloužený magnetický obvod, tudíž má délku 70 mm. Také má přepočítaný počet závitů na 80 z a vyšší průměr vodiče vinutí 0,56 mm, aby bylo docíleno stejného činitele plnění vinutí jako u motoru základního.

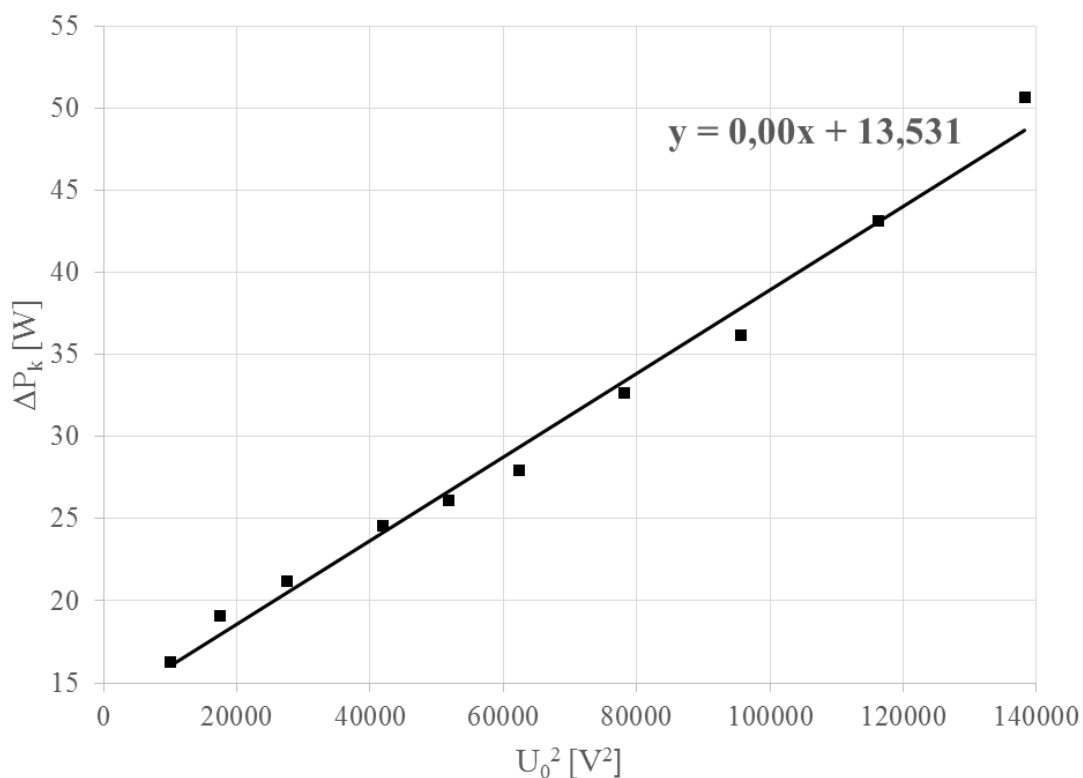
Tab. 7-7 Přepočítané hodnoty odporů vinutí z naměřených u prodlouženého motoru

R ₁	R ₂	R ₃	
[Ω]	[Ω]	[Ω]	
9,675	9,905	9,465	za studena
11,025	11,290	10,745	při jmenovitém stavu
11,250	11,530	10,960	po zatížení
11,195	11,455	10,920	před zkouškou naprázdno
10,430	10,675	10,210	po zkoušce naprázdno

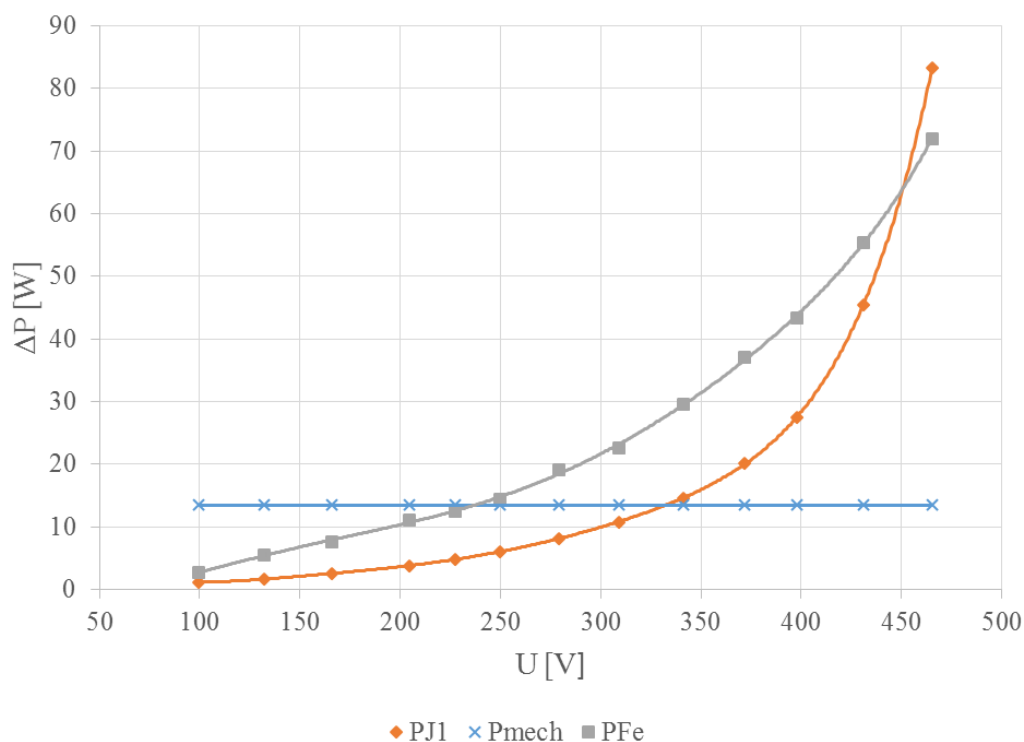
7.2.1 Měření naprázdno

Tab. 7-8 Naměřené a vypočítané hodnoty při měření naprázdno prodlouženého motoru

U_1	U_2	U_3	U_{avr}	I_1	I_2	I_3	I_{avrg}	P_0	ΔP_{J1}	ΔP_k	ΔP_{mech}	ΔP_{Fe}
[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
465,8	465,7	464,1	465,2	1,58	1,66	1,65	1,63	168,7	83,22	85,48	13,53	72,0
431,5	431,4	429,9	430,9	1,17	1,22	1,22	1,20	114,4	45,47	68,93	13,53	55,4
398,6	398,3	397,2	398,0	0,92	0,95	0,95	0,94	84,4	27,57	56,86	13,53	43,3
372,3	372,0	371,2	371,8	0,79	0,81	0,81	0,80	70,8	20,12	50,68	13,53	37,1
341,5	341,3	340,4	341,0	0,68	0,69	0,69	0,68	57,8	14,66	43,10	13,53	29,6
309,7	309,6	308,8	309,3	0,58	0,59	0,59	0,59	47,0	10,83	36,16	13,53	22,6
279,7	279,6	278,9	279,4	0,51	0,51	0,51	0,51	40,8	8,15	32,67	13,53	19,1
249,9	249,7	249,1	249,6	0,44	0,44	0,44	0,44	34,0	6,08	27,95	13,53	14,4
227,7	227,6	226,9	227,4	0,39	0,40	0,40	0,39	31,0	4,87	26,10	13,53	12,6
205,0	204,9	204,2	204,7	0,35	0,35	0,35	0,35	28,4	3,85	24,57	13,53	11,0
166,2	166,1	165,5	165,9	0,28	0,28	0,29	0,28	23,7	2,51	21,19	13,53	7,7
132,4	132,2	131,7	132,1	0,23	0,23	0,24	0,23	20,8	1,73	19,10	13,53	5,6
100,0	99,9	99,3	99,7	0,19	0,20	0,20	0,20	17,5	1,21	16,25	13,53	2,7



Obr. 7-8 Určení mechanických ztrát ze závislosti $\Delta P_k = f(U_0^2)$ prodlouženého motoru



Obr. 7-9 Vypočítané ztráty v závislosti na napětí $\Delta P = f(U)$ prodlouženého motoru

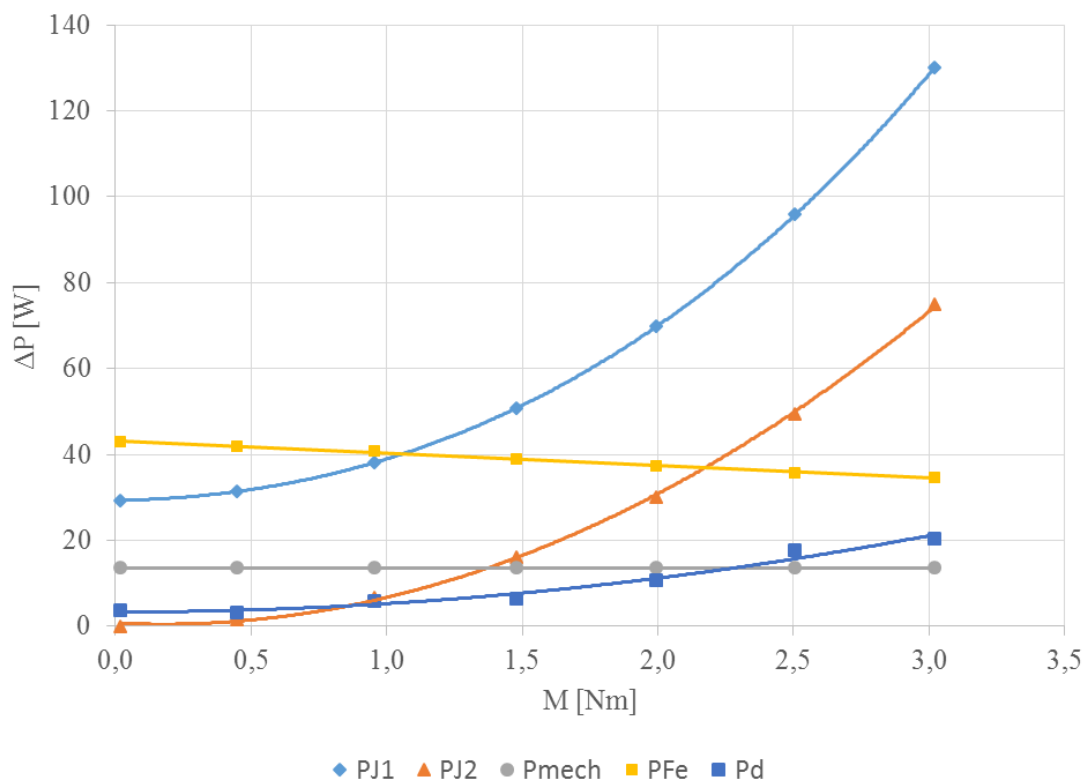
7.2.2 Měření při zatížení

Tab. 7-9 Naměřené hodnoty při zatěžovací zkoušce prodlouženého motoru

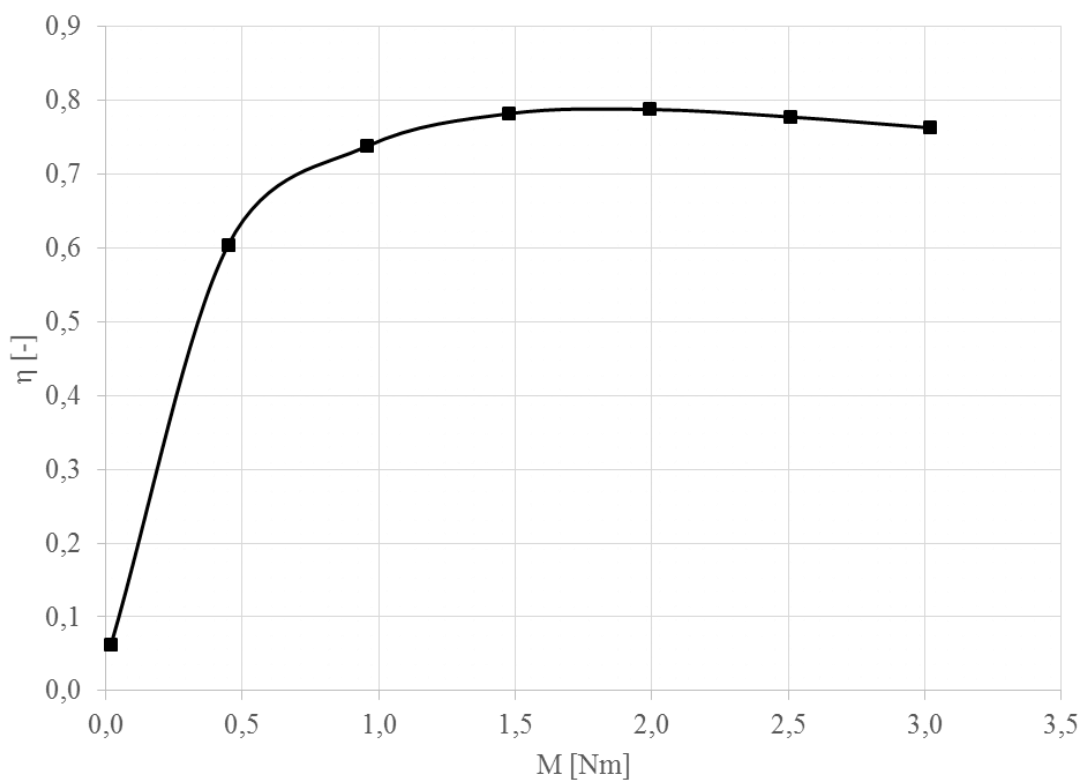
M	n	U ₁	U ₂	U ₃	U _{avr}	I ₁	I ₂	I ₃	I _{avrg}	cosφ	P ₁
[Nm]	[ot/min]	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]	[-]	[W]
3,020	2772	398,52	398,71	397,38	398,20	1,92	2,02	1,96	1,96	0,853	1150,0
2,506	2819	398,18	398,66	397,15	398,00	1,64	1,73	1,68	1,69	0,819	952,0
1,993	2862	398,18	398,54	397,10	397,94	1,40	1,48	1,44	1,44	0,766	758,8
1,477	2901	398,35	398,60	397,32	398,09	1,19	1,26	1,23	1,23	0,677	574,1
0,956	2937	398,40	398,62	397,18	398,07	1,04	1,09	1,08	1,07	0,541	398,8
0,448	2969	399,19	399,43	398,06	398,89	0,95	0,99	0,98	0,97	0,343	230,8
0,019	2993	398,65	399,00	397,63	398,43	0,92	0,96	0,95	0,94	0,147	95,4

Tab. 7-10 Vypočítané hodnoty z měření při zatížení prodlouženého motoru

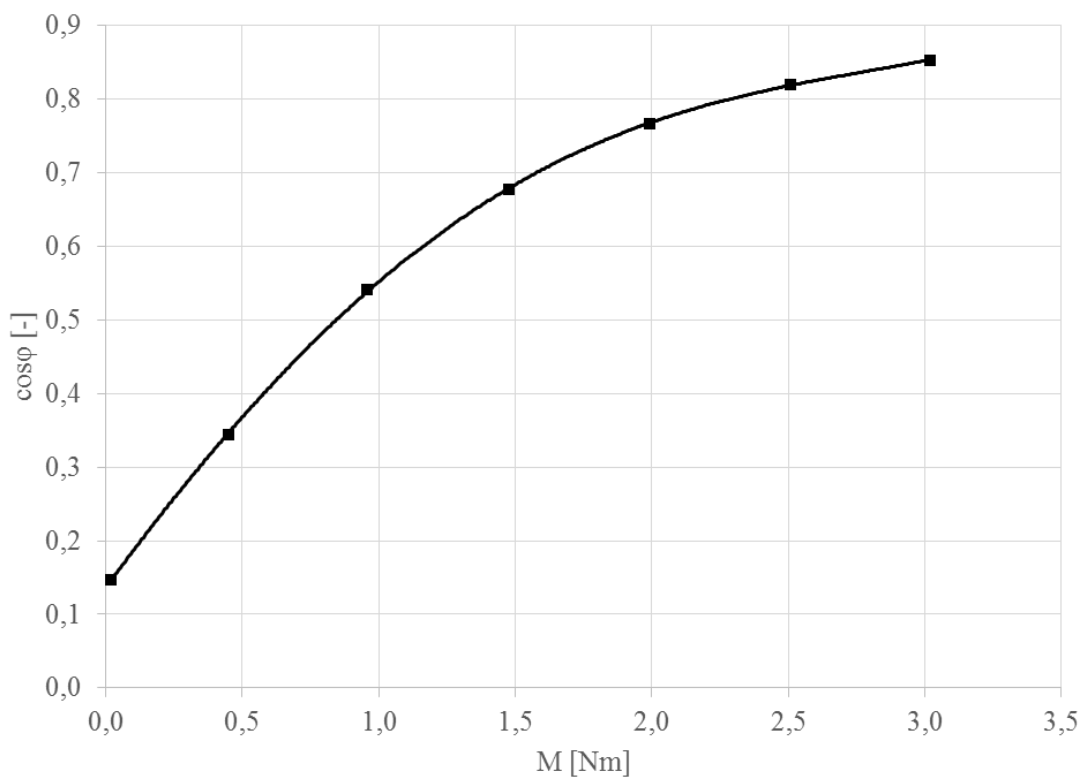
P ₂	ΔP _{J1}	ΔP _{mech}	ΔP _{Fe}	ΔP _{J2}	ΔP _d	ΔP _{cel}	η
[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[-]
876,66	130,07	13,531	34,50	74,89	20,36	273,34	0,76
739,78	95,84	13,531	35,80	49,50	17,58	212,25	0,78
597,32	69,76	13,531	37,40	29,98	10,81	161,47	0,79
448,70	50,65	13,531	38,80	15,99	6,46	125,43	0,78
294,03	38,11	13,531	40,70	6,72	5,74	104,80	0,74
139,29	31,41	13,531	41,80	1,63	3,16	91,52	0,60
5,96	29,26	13,531	43,00	0,05	3,64	89,48	0,06



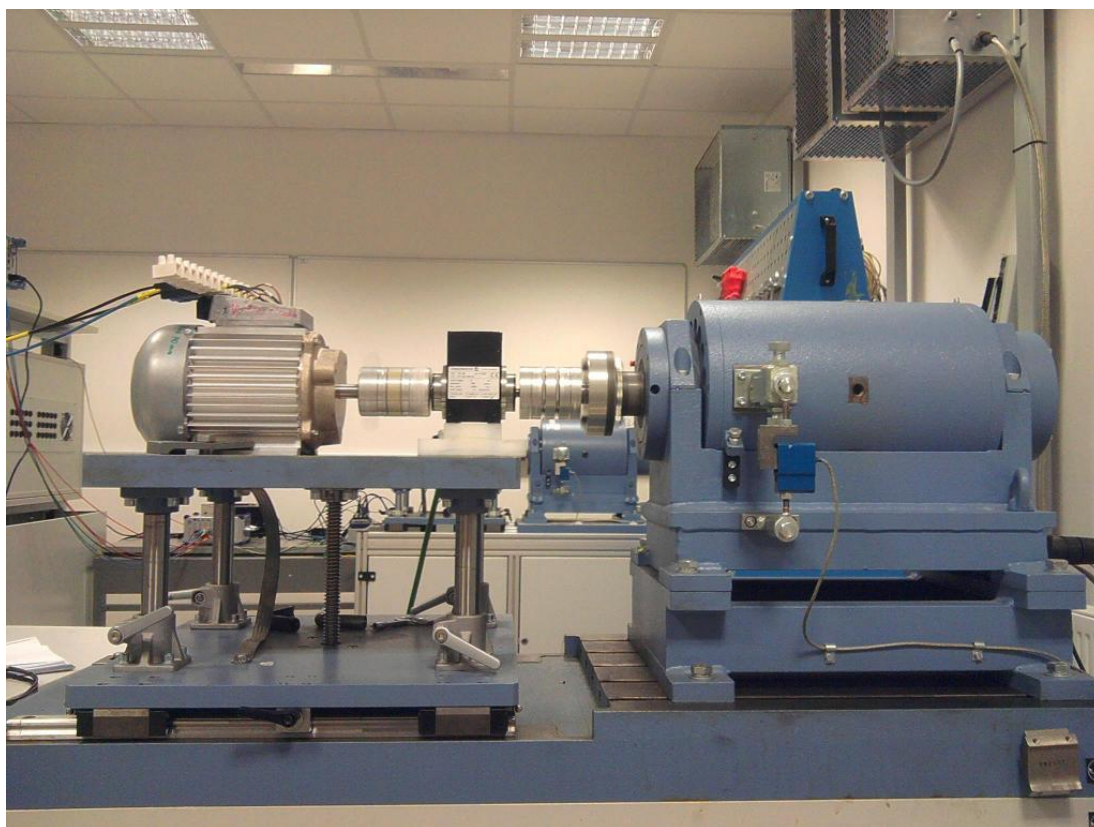
Obr. 7-10 Závislost jednotlivých ztrát při zatížení na momentu $\Delta P = f(M)$ prodlouženého motoru



Obr. 7-11 Závislost účinnosti na momentu $\eta = f(M)$ prodlouženého motoru



Obr. 7-12 Závislost účinníku na momentu $\cos \varphi = f(M)$ prodlouženého motoru



Obr. 7-13 Měřicí pracoviště při měření prodlouženého motoru

7.3 Měření motoru s kvalitnějšími statorovými plechy

Jak je již nazvaná samotná kapitola, jedná se o „základní“ motor s kvalitnějšími statorovými plechy M270-35A (plechy od [18]), než jak bylo u posledních dvou měření. Statorové plechy mají menší ztrátový činitel, než plechy v rotoru (M700-50A).

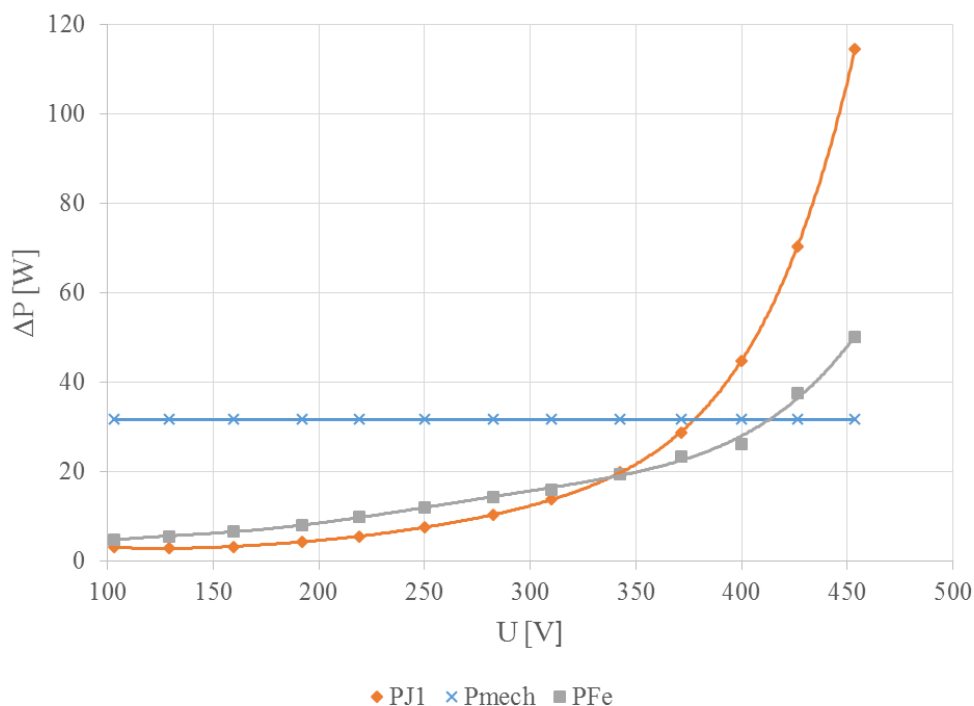
Tab. 7-11 Přepočítané hodnoty odporů vinutí z naměřených u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy

R ₁	R ₂	R ₃	
[Ω]	[Ω]	[Ω]	
11,175	11,175	11,180	za studena
13,305	13,305	13,240	při jmenovitém stavu
13,070	13,060	13,025	po zatížení
12,910	12,905	12,890	před zkouškou naprázdno
12,310	12,315	12,295	po zkoušce naprázdno

7.3.1 Měření naprázdno

Tab. 7-12 Naměřené a vypočtené hodnoty při měření naprázdno u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy

U ₁	U ₂	U ₃	U _{avr}	I ₁	I ₂	I ₃	I _{avrg}		P ₀	ΔP _{J1}	ΔP _k	ΔP _{mech}	ΔP _{Fe}
[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]		[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
454,5	453,9	452,6	453,7	1,74	1,78	1,76	1,76		196,3	114,46	81,84	31,75	50,1
427,1	426,6	425,5	426,4	1,36	1,40	1,38	1,38		139,7	70,33	69,37	31,75	37,6
400,5	400,2	398,8	399,8	1,08	1,11	1,11	1,10		102,7	44,85	57,85	31,75	26,1
371,6	371,6	370,4	371,2	0,87	0,89	0,89	0,88		84,0	28,80	55,20	31,75	23,5
342,8	342,9	341,8	342,5	0,72	0,74	0,74	0,73		71,1	19,80	51,30	31,75	19,5
310,2	310,0	309,1	309,8	0,61	0,61	0,62	0,61		61,5	13,75	47,78	31,75	16,0
283,1	283,0	282,1	282,7	0,53	0,53	0,54	0,53		56,6	10,43	46,17	31,75	14,4
250,5	250,6	249,8	250,3	0,45	0,45	0,46	0,45		51,3	7,58	43,73	31,75	12,0
219,5	219,6	218,8	219,3	0,38	0,39	0,39	0,39		47,2	5,61	41,60	31,75	9,8
192,3	192,5	191,8	192,2	0,34	0,34	0,35	0,34		44,2	4,33	39,91	31,75	8,2
159,7	159,8	159,1	159,5	0,29	0,30	0,30	0,30		41,6	3,29	38,33	31,75	6,6
129,5	129,7	129,0	129,4	0,27	0,28	0,28	0,28		40,2	2,87	37,32	31,75	5,6
103,3	103,4	102,8	103,1	0,29	0,29	0,30	0,29		39,7	3,13	36,54	31,75	4,8



Obr. 7-14 Ztráty v závislosti na napětí $\Delta P = f(U)$ u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy

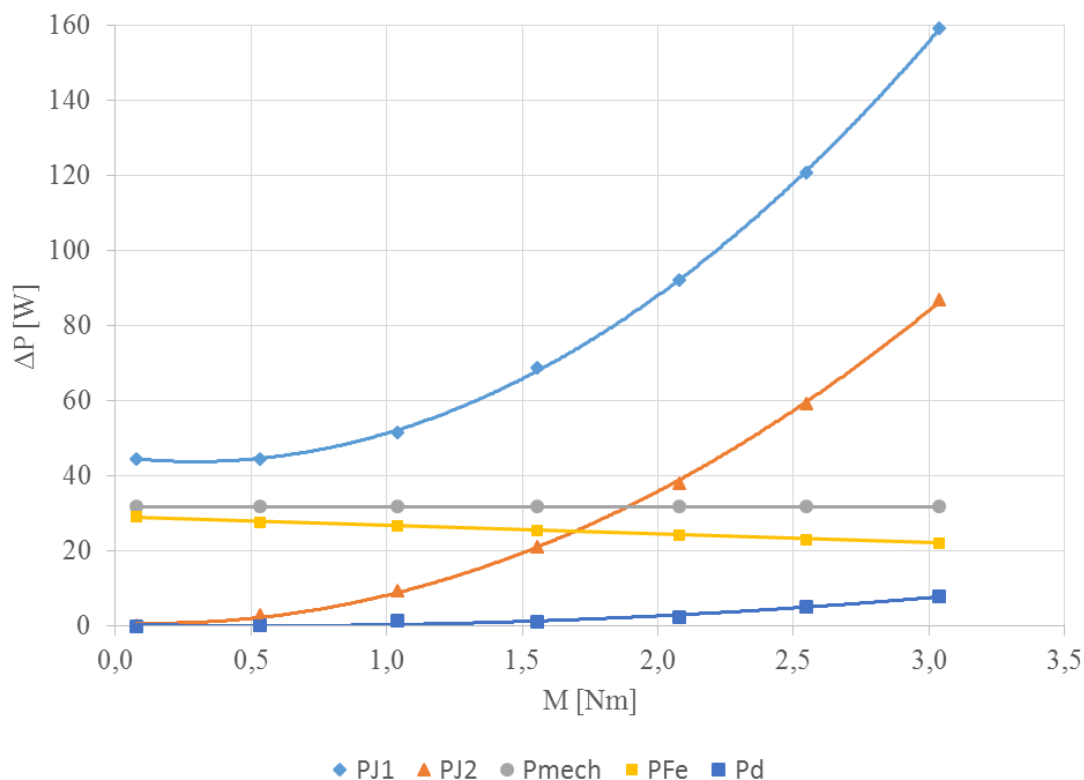
7.3.2 Měření při zatížení

Tab. 7-13 Naměřené hodnoty při zatěžovací zkoušce u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy

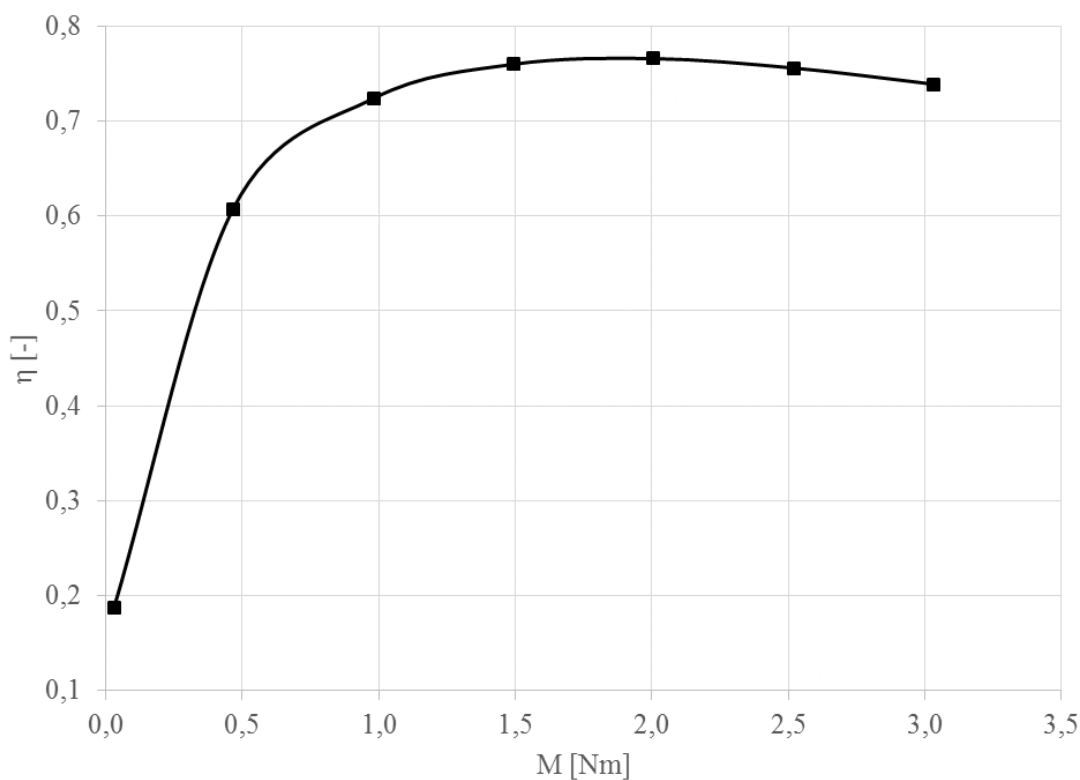
M	n	U ₁	U ₂	U ₃	U _{avr}	I ₁	I ₂	I ₃	I _{avrg}	cosφ	P ₁
[Nm]	[ot/min]	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]	[-]	[W]
3,038	2739	400,14	401,28	401,67	401,03	2,00	2,04	2,00	2,02	0,842	1179,3
2,548	2788	399,28	400,30	400,77	400,12	1,75	1,78	1,74	1,76	0,808	984,1
2,077	2834	400,06	400,82	401,30	400,73	1,53	1,56	1,52	1,54	0,753	804,9
1,554	2879	399,77	400,52	401,08	400,46	1,33	1,37	1,32	1,34	0,663	616,6
1,038	2921	399,64	400,51	400,96	400,37	1,18	1,22	1,18	1,20	0,528	438,4
0,535	2957	399,69	400,48	401,06	400,41	1,10	1,14	1,10	1,11	0,353	272,7
0,078	2988	399,62	400,41	400,96	400,33	1,07	1,11	1,08	1,09	0,172	130,0

Tab. 7-14 Vypočítané hodnoty z měření při zatížení u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy

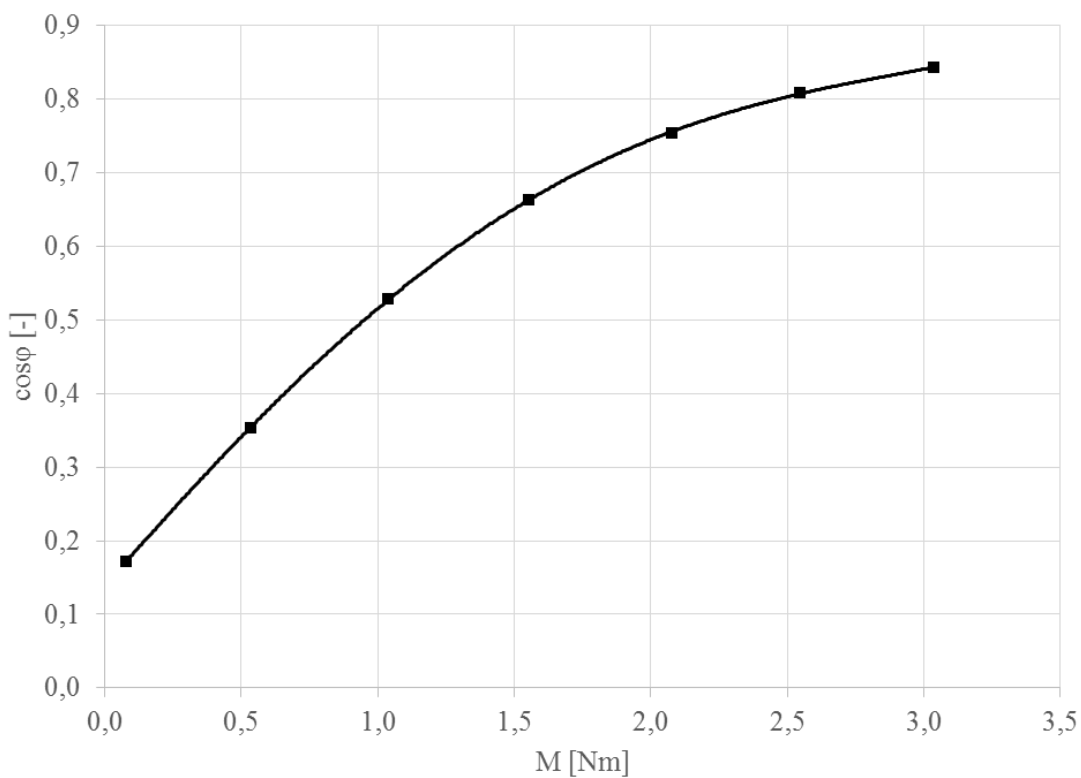
P ₂	ΔP _{J1}	ΔP _{mech}	ΔP _{Fe}	ΔP _{J2}	ΔP _d	ΔP _{cel}	η
[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[-]
871,38	159,12	31,752	22,20	86,82	8,03	307,92	0,74
743,91	120,78	31,752	23,10	59,38	5,18	240,19	0,76
616,40	92,09	31,752	24,30	38,10	2,26	188,50	0,77
468,51	68,71	31,752	25,50	21,07	1,05	148,09	0,76
317,51	51,58	31,752	26,70	9,48	1,38	120,89	0,72
165,67	44,64	31,752	27,60	2,87	0,17	107,03	0,61
24,41	44,58	31,752	29,00	0,23	0,03	105,59	0,19



Obr. 7-15 Závislost jednotlivých ztrát při zatížení na momentu $\Delta P = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy



Obr. 7-16 Závislost účinnosti na momentu $\eta = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími statorovými plechy



Obr. 7-17 Závislost účinníku na momentu $\cos \varphi = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími satorovými plechy



Obr. 7-18 Měřicí pracoviště při měření základního motoru s kvalitnějšími satorovými plechy

7.4 Měření motoru s kvalitnějšími plechy ve statoru i rotoru

Tento motor má plechy statoru i rotoru z plechů M270-35A a statorové vinutí je navinuto z drátu o šířce 0,6 mm. Tyto plechy jsou vyrobeny elektrokorozivním obráběním (mají menší ztráty jak plechy vyražené), metodu lze považovat za výhodnější, ale nákladnější. Oproti ostatním motorům má nejvyšší plnění drážky a to díky nejširšímu statorovému vinutí. Motor by měl mít nejlepší parametry mezi naměřenými motory v menších ztrátách i ve větší účinnosti.

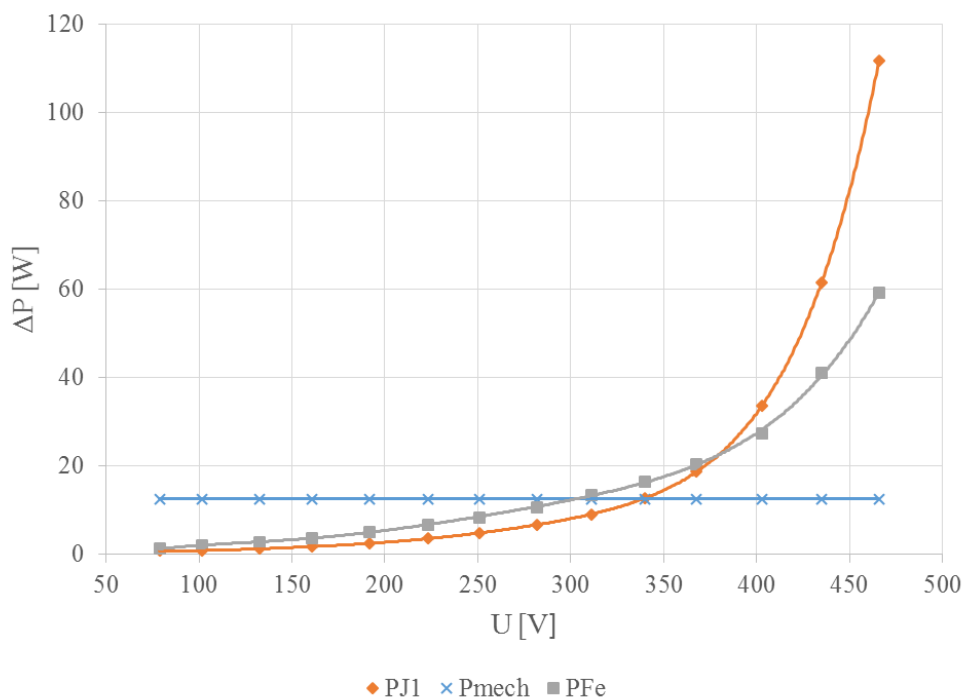
Tab. 7-15 Přepočítané hodnoty odporů vinutí z naměřených u motoru s kvalitnějšími plechy

R ₁	R ₂	R ₃	
[Ω]	[Ω]	[Ω]	
9,045	9,185	9,050	za studena
10,250	10,385	10,210	při jmenovitém stavu
10,160	10,310	10,175	po zatížení
9,990	10,095	9,935	před zkouškou naprázdno
9,660	9,780	9,625	po zkoušce naprázdno

7.4.1 Měření naprázdno

Tab. 7-16 Naměřené a vypočítané hodnoty měření naprázdno u motoru s kvalitnějšími plechy

U ₁	U ₂	U ₃	U _{avr}	I ₁	I ₂	I ₃	I _{avrg}		P ₀	ΔP _{J1}	ΔP _k	ΔP _{mech}	ΔP _{Fe}
[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]		[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
466,3	466,5	465,0	465,9	1,93	1,99	1,96	1,96		183,5	111,79	71,69	12,55	59,1
435,1	435,4	434,0	434,8	1,42	1,48	1,46	1,45		115,0	61,49	53,51	12,55	41,0
403,3	403,3	402,3	402,9	1,05	1,09	1,08	1,07		73,6	33,56	40,01	12,55	27,5
367,7	367,8	367,0	367,5	0,79	0,81	0,80	0,80		51,7	18,69	33,01	12,55	20,5
339,9	339,8	339,2	339,6	0,65	0,67	0,66	0,66		41,7	12,71	28,97	12,55	16,4
311,6	311,6	311,0	311,4	0,55	0,56	0,56	0,56		35,2	9,10	26,05	12,55	13,5
282,1	282,1	281,5	281,9	0,47	0,48	0,48	0,48		29,8	6,64	23,20	12,55	10,6
251,2	251,2	250,7	251,0	0,41	0,41	0,41	0,41		25,8	4,82	20,94	12,55	8,4
223,5	223,5	222,9	223,3	0,35	0,35	0,35	0,35		22,8	3,58	19,26	12,55	6,7
191,9	191,9	191,4	191,8	0,29	0,30	0,29	0,29		20,2	2,51	17,68	12,55	5,1
160,8	160,8	160,2	160,6	0,24	0,24	0,25	0,24		18,0	1,72	16,31	12,55	3,8
132,8	132,8	132,2	132,6	0,20	0,21	0,21	0,20		16,5	1,21	15,32	12,55	2,8
101,8	101,8	101,2	101,6	0,17	0,17	0,18	0,17		15,4	0,86	14,55	12,55	2,0
79,1	78,8	78,3	78,8	0,16	0,16	0,17	0,16		14,6	0,79	13,82	12,55	1,3



Obr. 7-19 Vypočítané ztráty v závislosti na napětí $\Delta P = f(U)$ u motoru s kvalitnějšími plechy

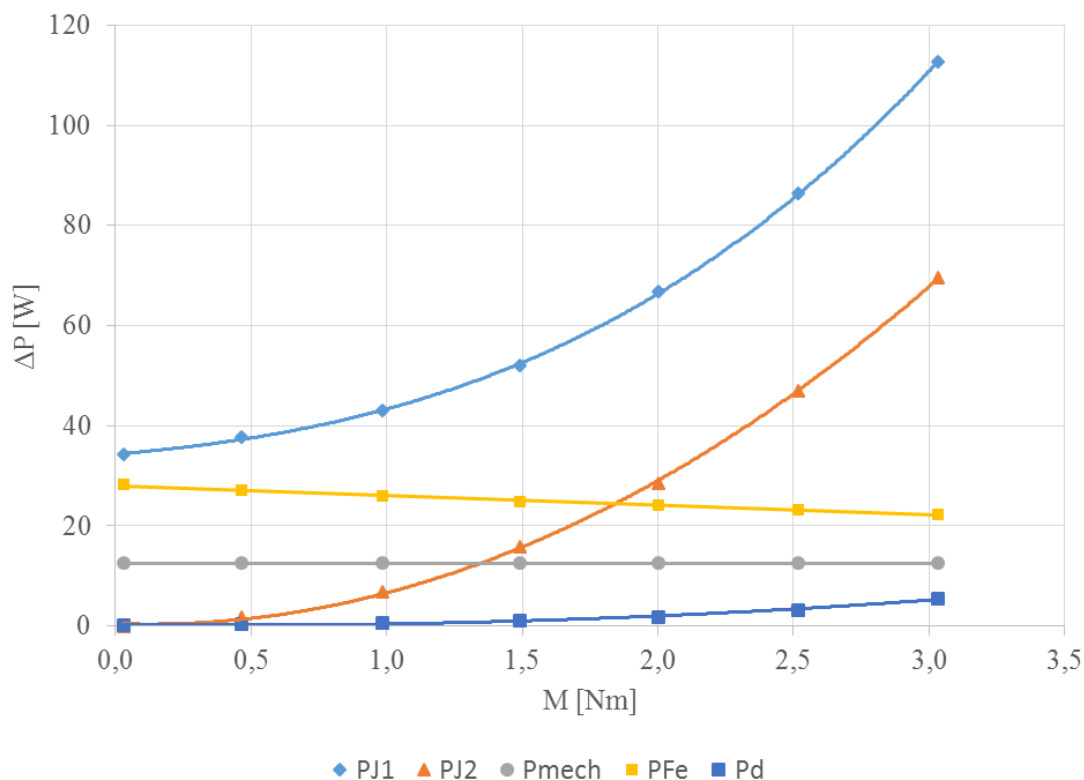
7.4.2 Měření při zatížení

Tab. 7-17 Naměřené hodnoty zkoušky při zatížení u motoru s kvalitnějšími plechy

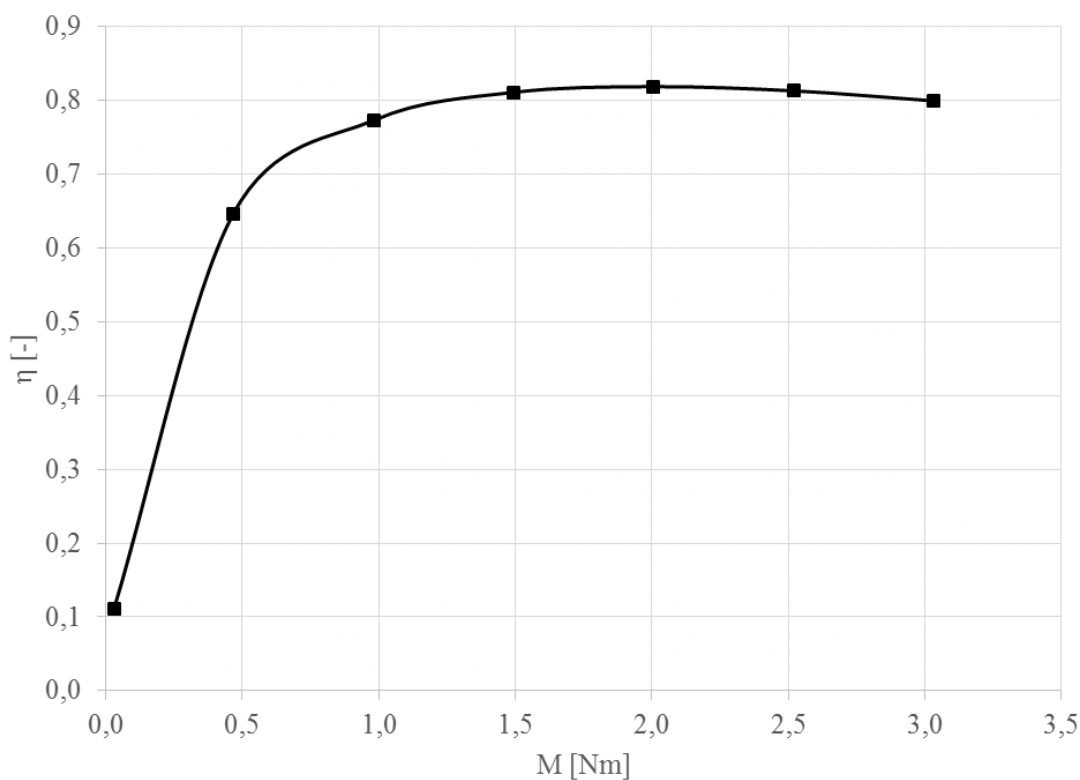
M	n	U ₁	U ₂	U ₃	U _{avr}	I ₁	I ₂	I ₃	I _{avrg}	cosφ	P ₁
[Nm]	[ot/min]	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]	[-]	[W]
3,032	2785	406,50	406,86	405,23	406,20	1,91	1,97	1,93	1,94	0,812	1107,0
2,519	2826	406,62	407,05	405,47	406,38	1,67	1,74	1,69	1,70	0,768	917,6
2,004	2867	407,47	407,71	406,41	407,20	1,47	1,53	1,48	1,49	0,699	735,5
1,493	2902	406,61	406,86	405,70	406,39	1,29	1,35	1,31	1,32	0,603	559,9
0,984	2936	407,11	407,41	406,17	406,90	1,17	1,23	1,20	1,20	0,463	391,5
0,466	2968	407,25	407,61	406,39	407,08	1,11	1,16	1,13	1,13	0,281	224,4
0,030	2995	407,28	407,52	406,36	407,05	1,10	1,14	1,13	1,12	0,107	84,5

Tab. 7-18 Vypočítané hodnoty z měření při zatížení u motoru s kvalitnějšími plechy

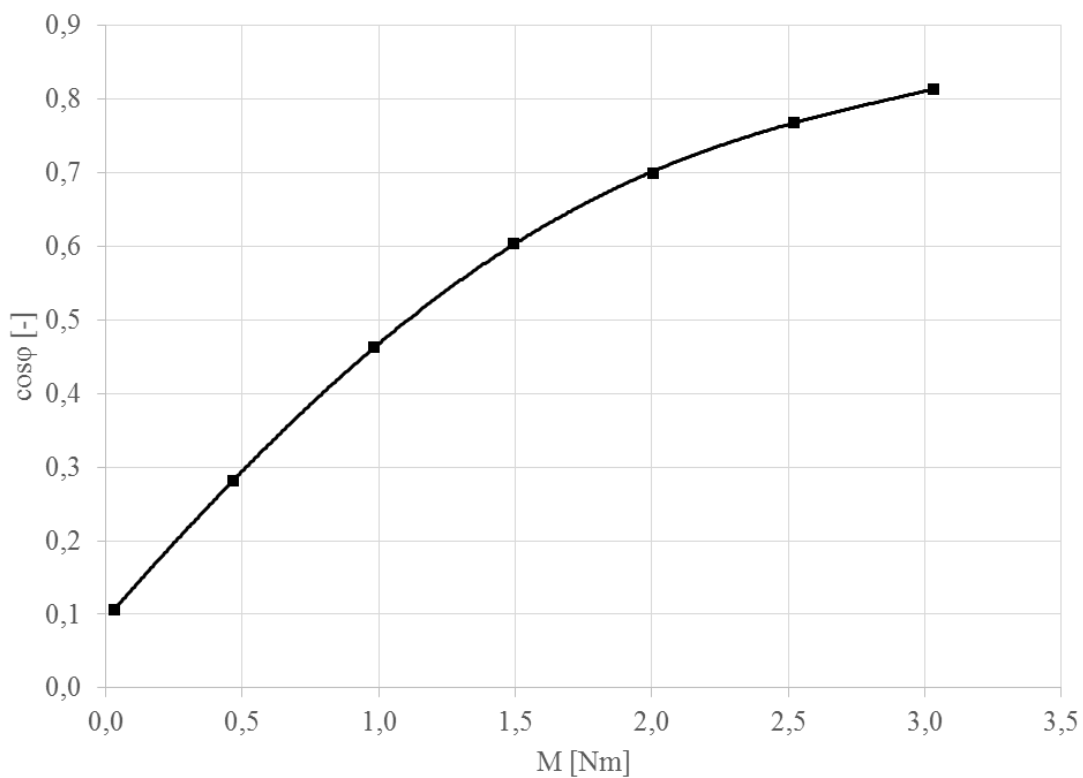
P ₂	ΔP _{J1}	ΔP _{mech}	ΔP _{Fe}	ΔP _{J2}	ΔP _d	ΔP _{cel}	η
[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[-]
884,27	112,60	12,553	22,35	69,66	5,56	222,73	0,80
745,47	86,41	12,553	23,13	46,87	3,20	172,16	0,81
601,66	66,79	12,553	24,10	28,58	1,80	133,83	0,82
453,72	51,96	12,553	24,80	15,78	1,10	106,19	0,81
302,54	42,99	12,553	25,90	6,88	0,62	88,94	0,77
144,84	37,80	12,553	27,10	1,70	0,45	79,60	0,65
9,41	34,23	12,553	28,20	0,04	0,09	75,11	0,11



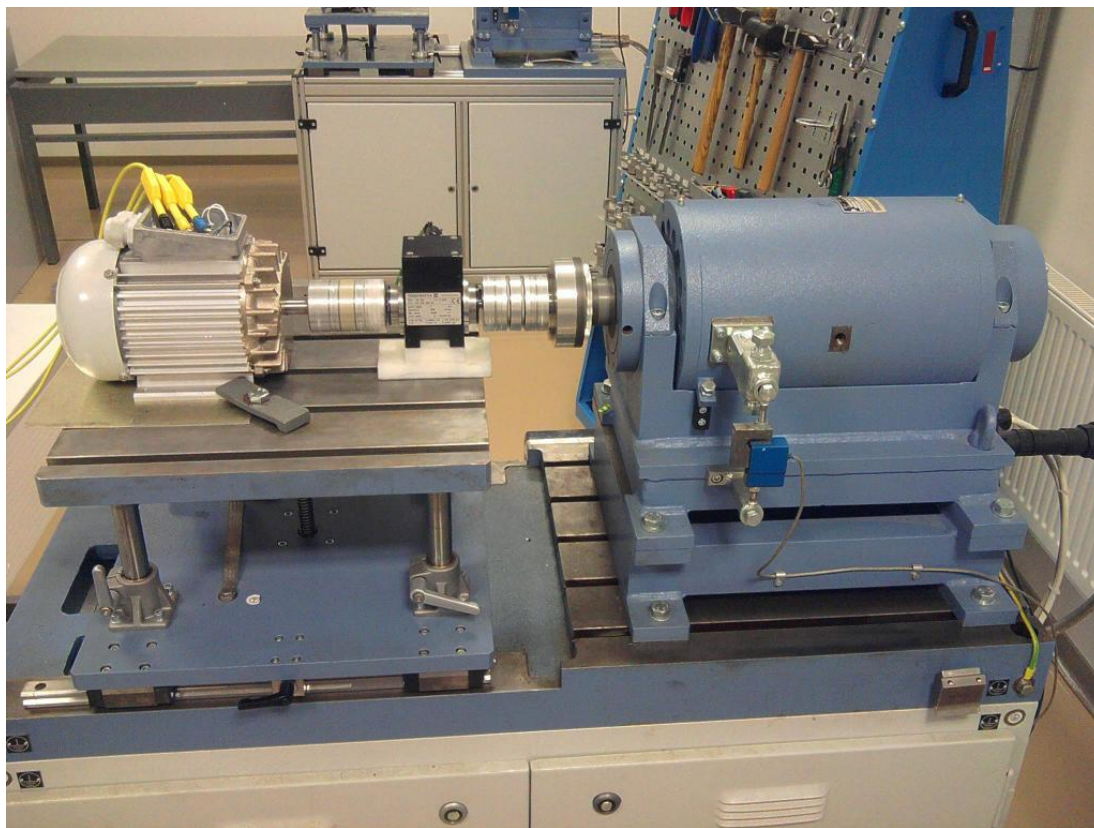
Obr. 7-20 Závislost jednotlivých ztrát při zatížení na momentu $\Delta P = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími plechy



Obr. 7-21 Závislost účinnosti na momentu $\eta = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími plechy



Obr. 7-22 Závislost účinníku na momentu $\cos \varphi = f(M)$ u motoru s kvalitnějšími plechy



Obr. 7-23 Měřicí pracoviště motoru s kvalitnějšími plechy

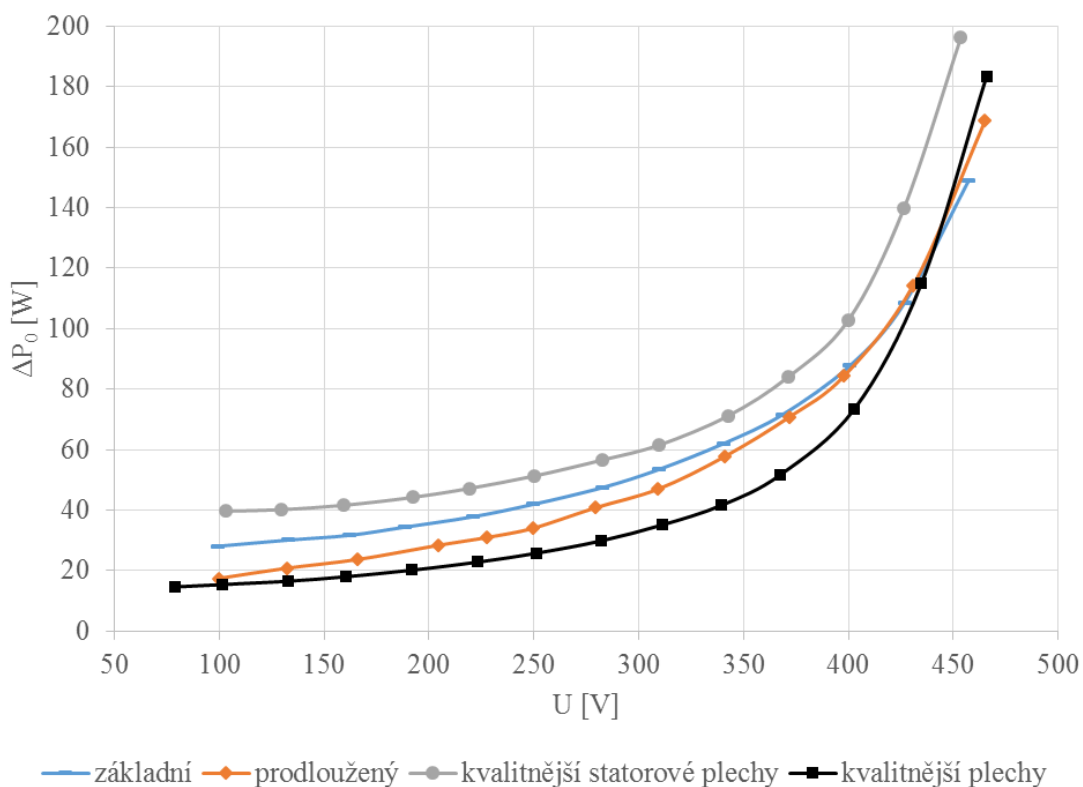
7.5 Měření nakrátko všech motorů

Jak již bylo uvedeno, měření nakrátko probíhalo, když byl rotor zabrzděn přes hřídel dynamometrem. Zvyšováním napětí z nuly byl nastavován jmenovitý proud, tohoto proudu bylo dosaženo při velice nízkém napětí cca 100 V. Ze zapojeného analyzátoru byla odečtena hodnota momentu, pomocí něhož a nastaveného napětí byl vypočten záběrný moment stroje. Měření probíhalo velmi rychle, aby se motor zbytečně nenamáhal.

Tab. 7-19 Naměřené a vypočítané hodnoty všech motorů při měření nakrátko

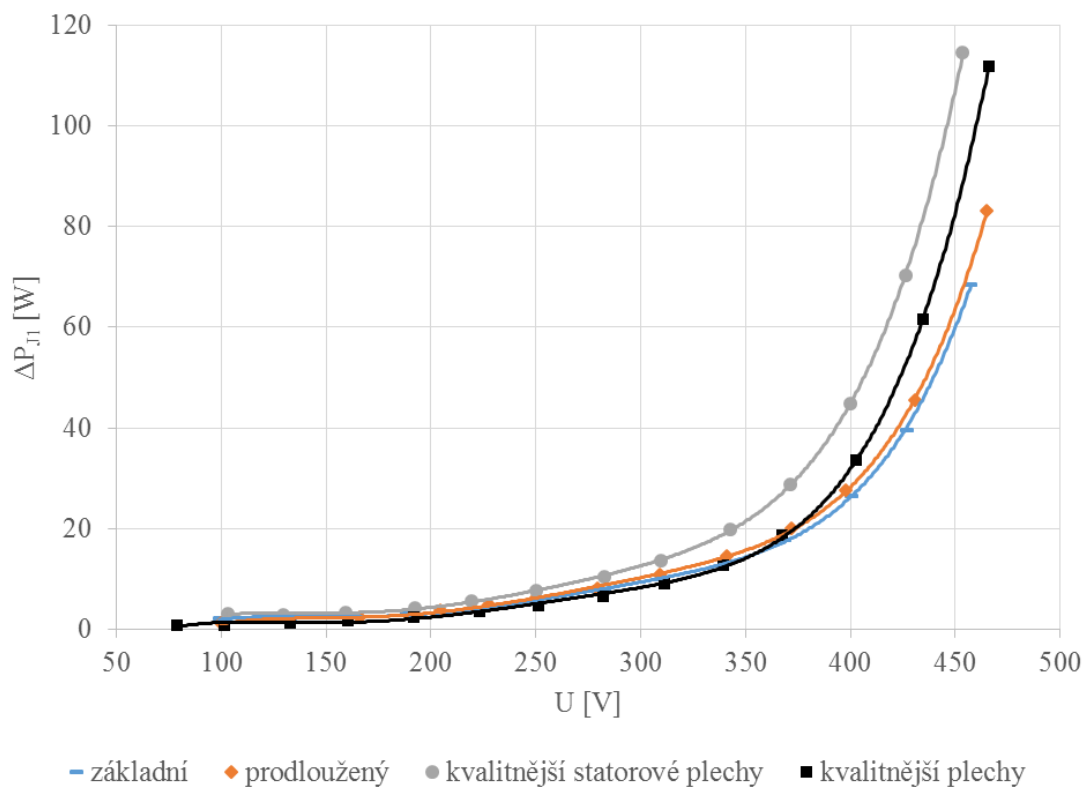
motor	U ₁	U ₂	U ₃	U _{avr}	I ₁	I ₂	I ₃	I _{avrg}	P _{nakr}	cosφ _k	M _{nam}	M _{zab}
	[V]	[V]	[V]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]	[W]	[-]	[Nm]	[Nm]
základní	103,2	103,3	103,7	103,4	1,62	1,60	1,63	1,62	188,10	0,650	0,231	3,456
prodloužený	90,9	90,8	90,3	90,7	1,54	1,60	1,57	1,57	166,62	0,676	0,259	5,041
kvalit. S plechy	98,5	97,8	98,5	98,2	1,59	1,61	1,60	1,60	184,99	0,680	0,268	4,442
kvalitnější plechy	85,7	85,5	85,0	85,4	1,46	1,47	1,47	1,47	134,77	0,621	0,194	4,256

7.6 Porovnání výsledků ze zkoušky naprázdno

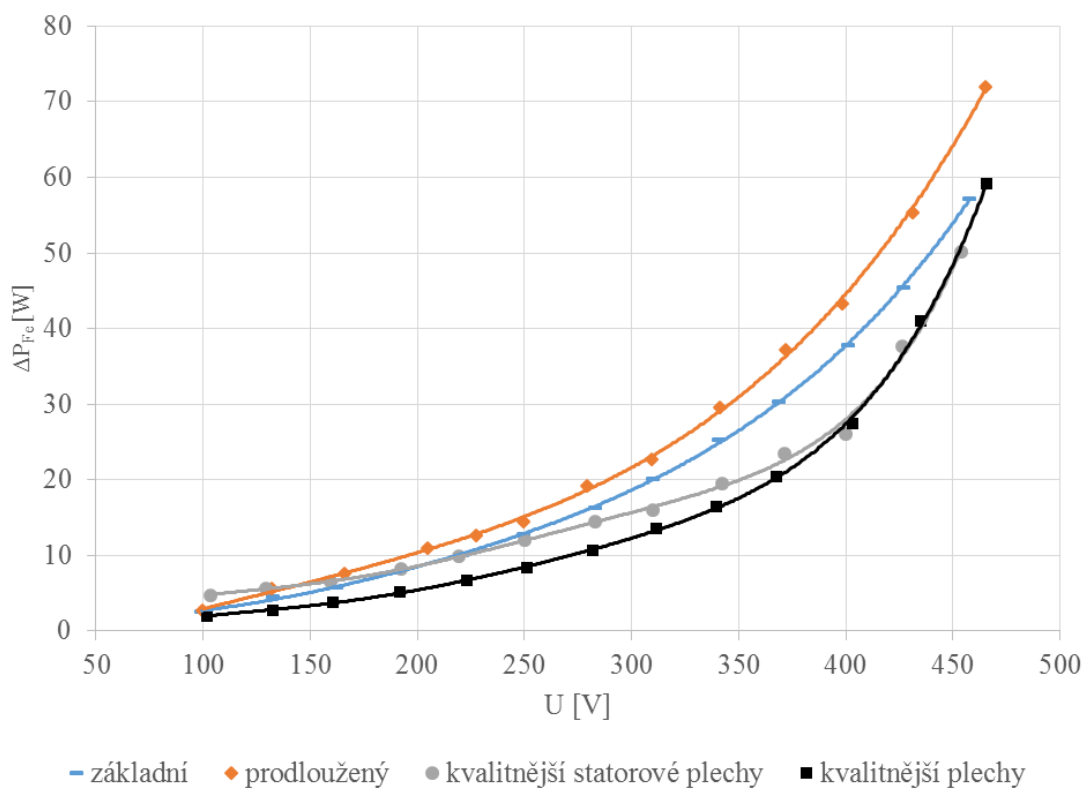


Obr. 7-24 Porovnání ztrát naprázdno všech motorů $\Delta P_0 = f(U)$

Motor s kvalitnějšími plechy (menší magnetické ztráty) má nejmenší hodnoty ztrát naprázdno (Obr. 7-24). Ztráty ve vinutí satoru vyšly nejvýrazněji u motoru s průřezem vinutí 0,53 mm, avšak ve spojení s lepšími satorovými plechy nebylo složení příznivé (Obr. 7-25). Největší ztráty v železe vykazoval motor prodloužený z důvodu nárůstu počtu plechů v obvodu ze 120 na 140 (Obr. 7-26).

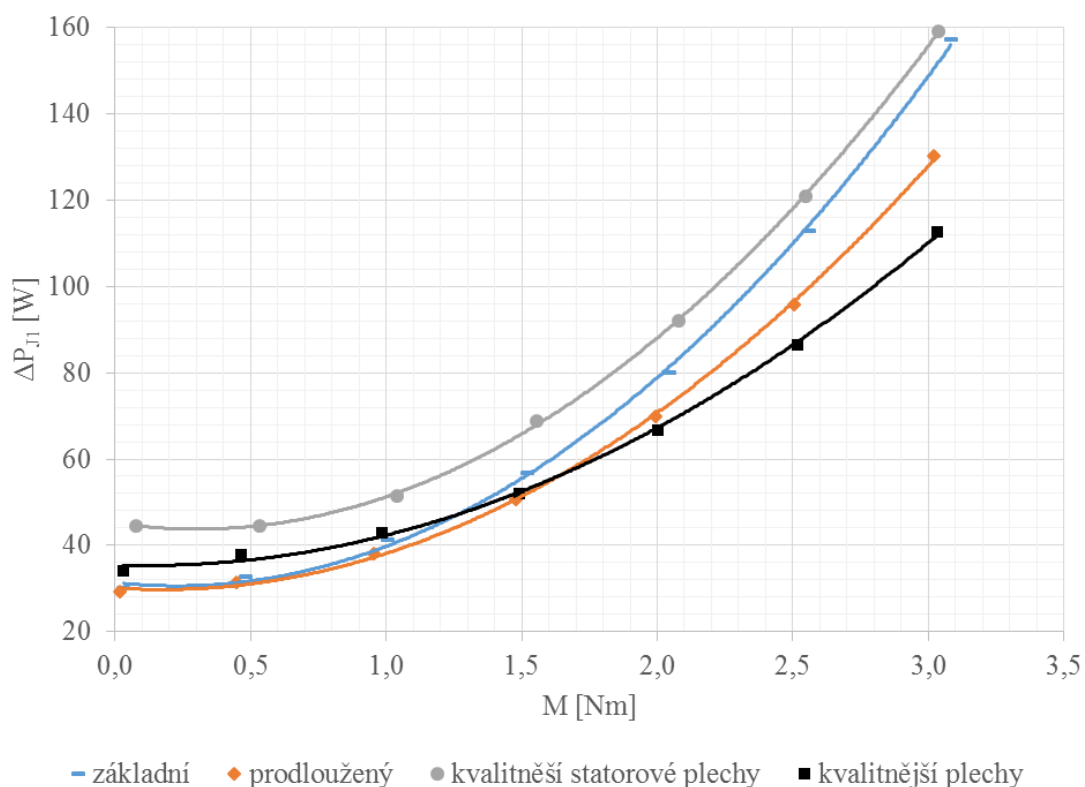


Obr. 7-25 Porovnání Joulových ztrát naprázdno všech motorů $\Delta P_{J1} = f(U)$

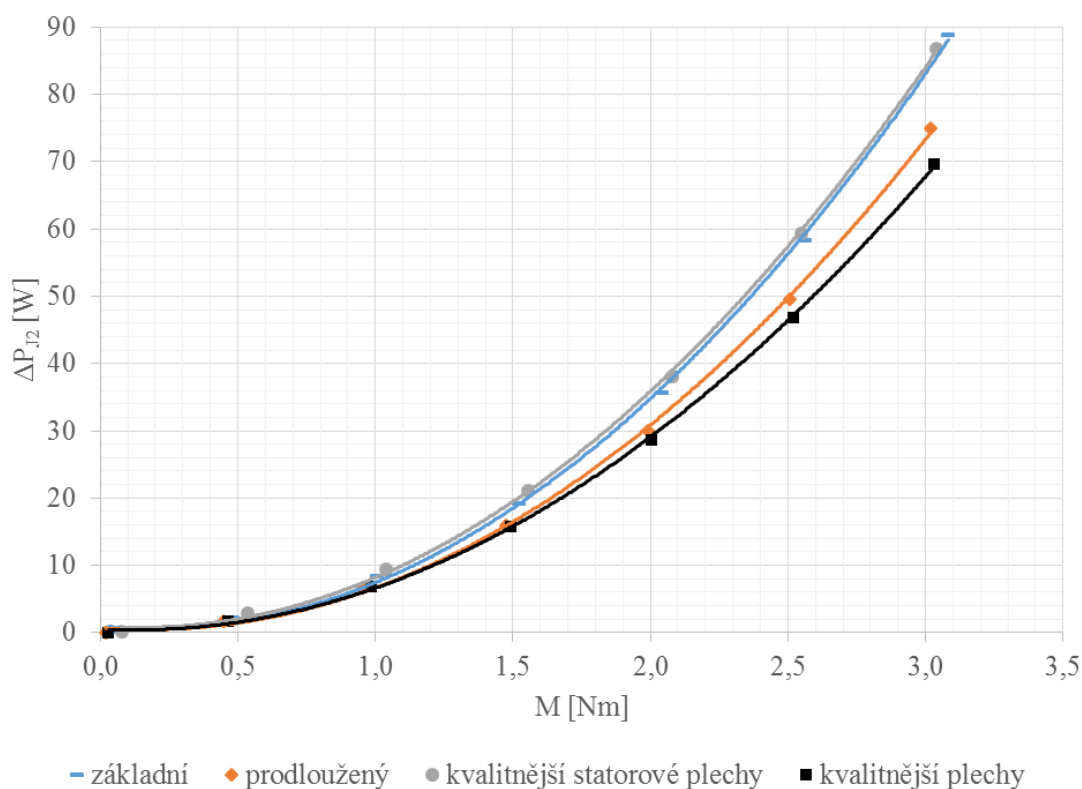


Obr. 7-26 Porovnání ztrát v železe naprázdno všech motorů $P_{Fe} = f(U)$

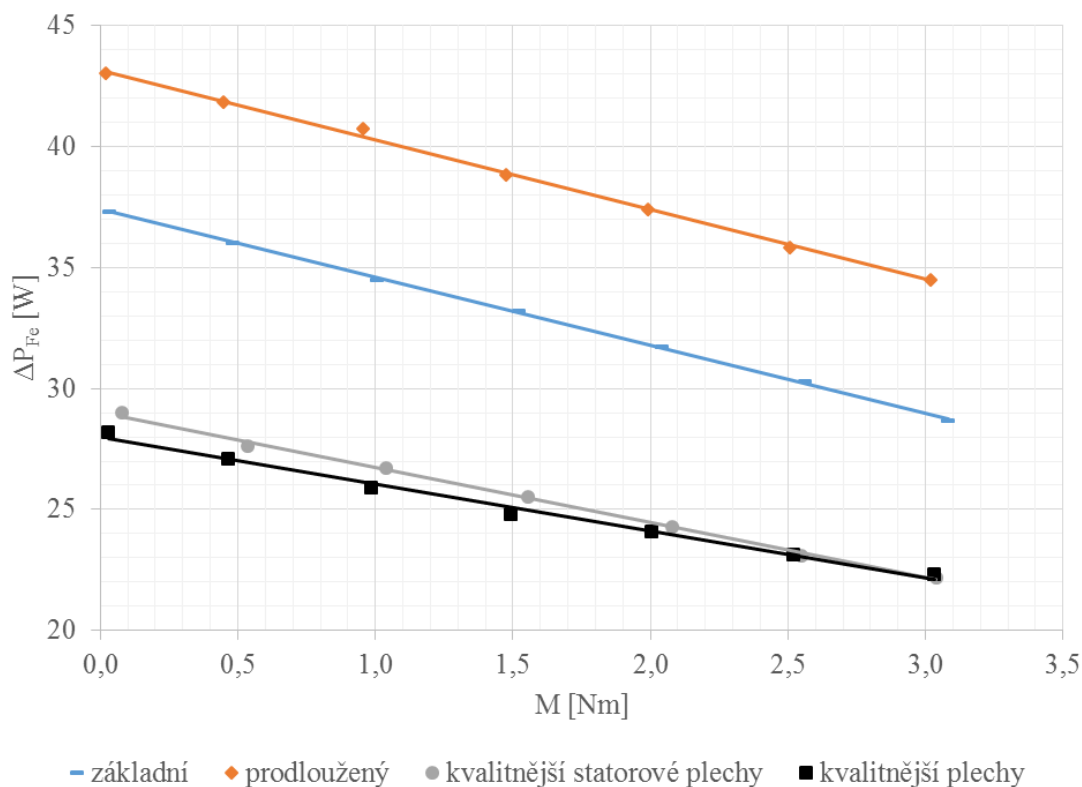
7.7 Porovnání výsledků ze zkoušky při zatížení



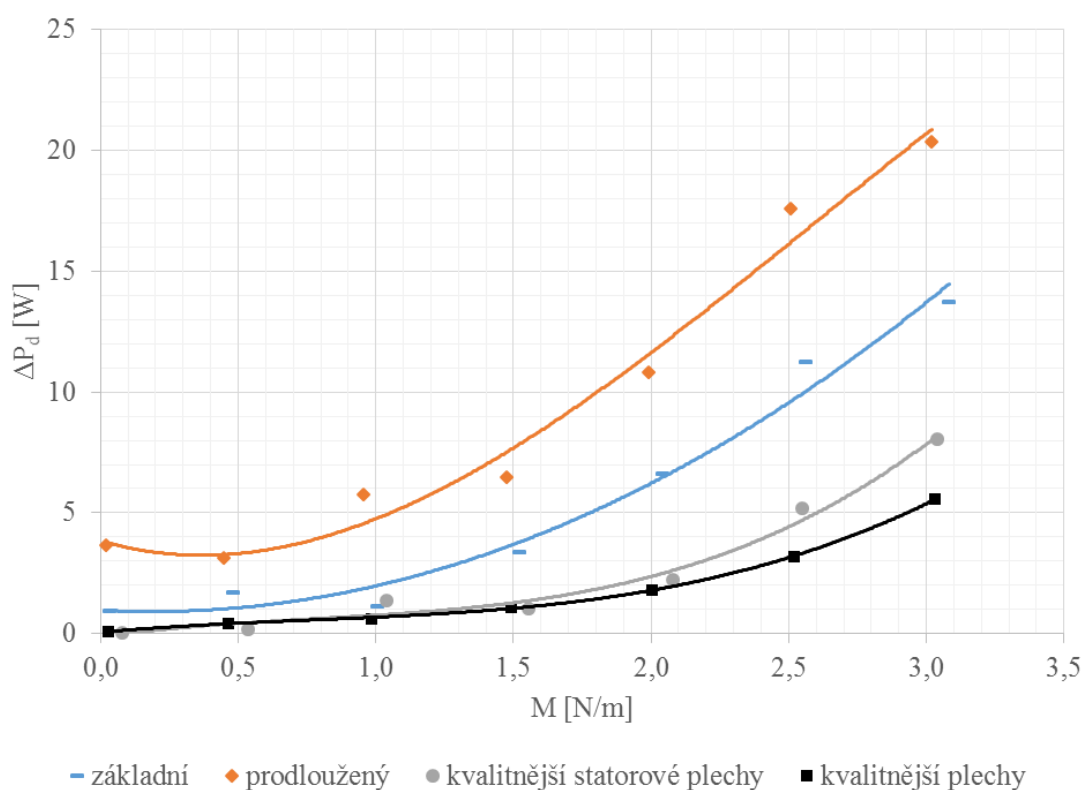
Obr. 7-27 Porovnání Joulových satorových ztrát všech motorů $\Delta P_{j1} = f(M)$ při zatížení



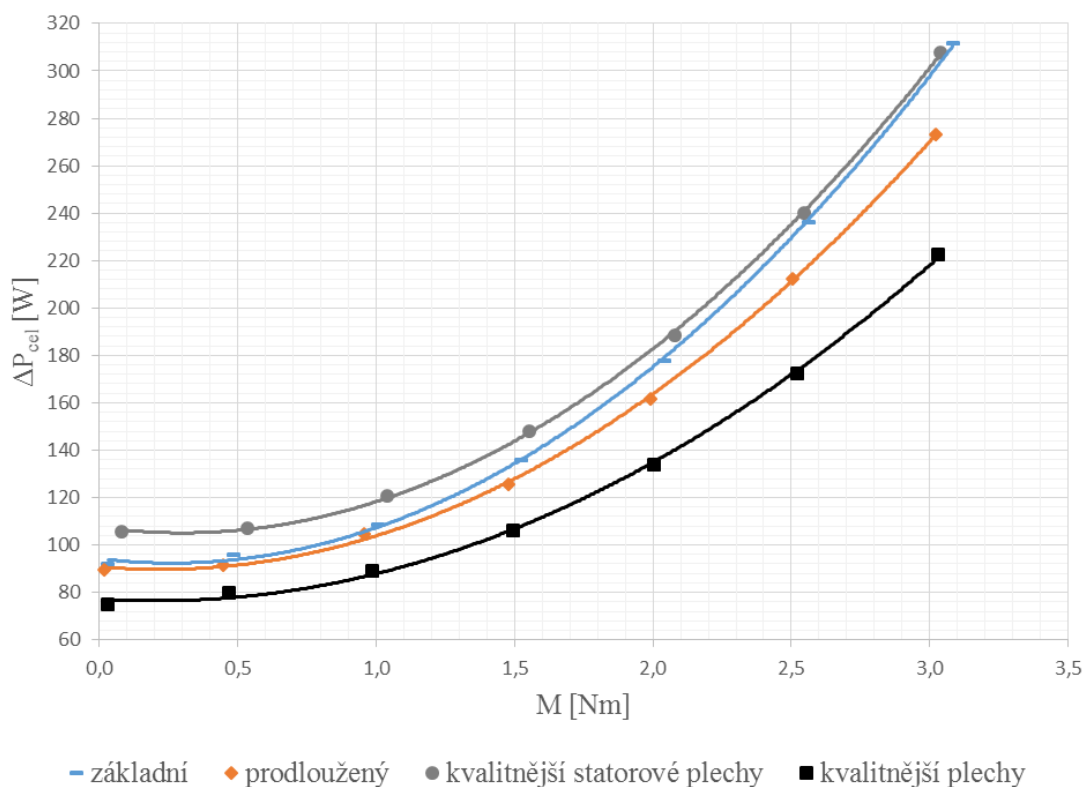
Obr. 7-28 Porovnání Joulových rotorových ztrát všech motorů $\Delta P_{j2} = f(M)$ při zatížení



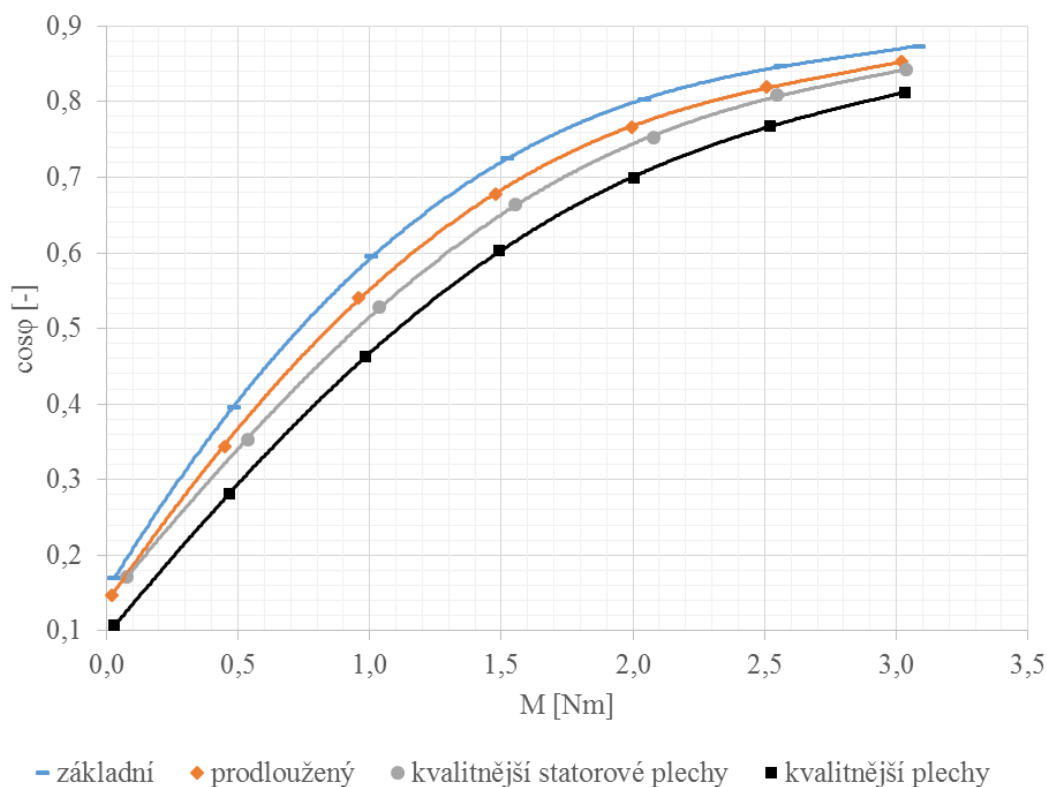
Obr. 7-29 Porovnání ztrát v železe všech motorů $P_{Fe} = f(M)$ při zatížení



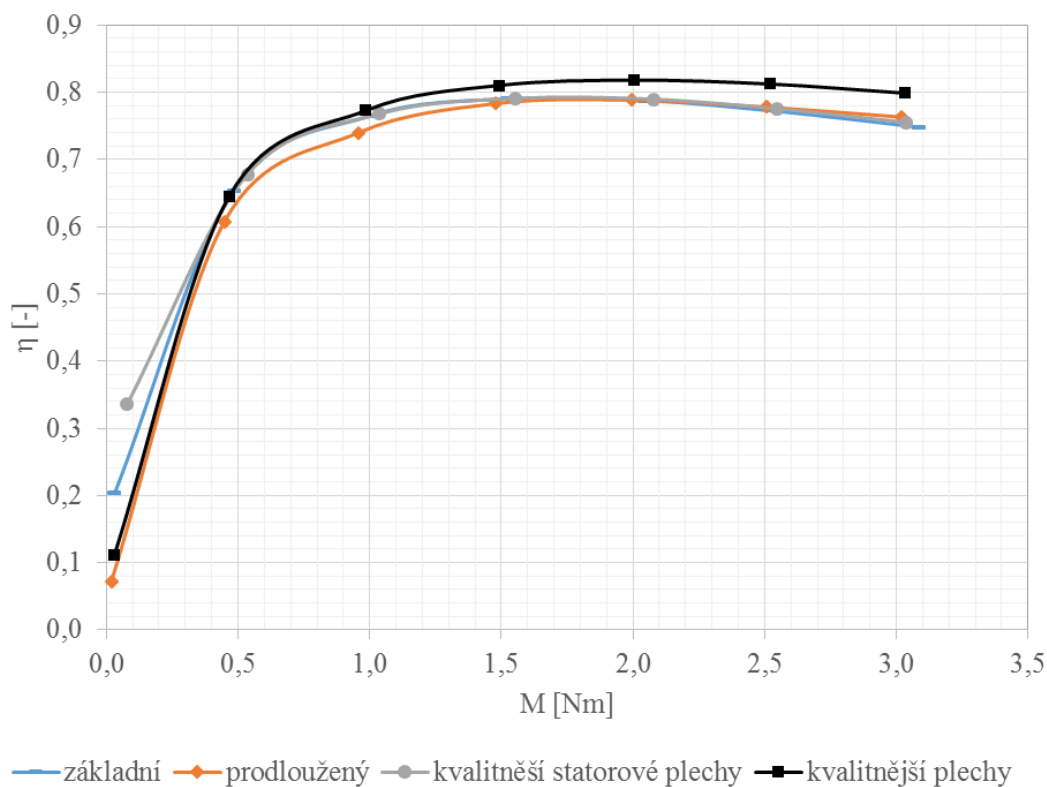
Obr. 7-30 Porovnání dodatečných ztrát všech motorů $\Delta P_d = f(M)$ při zatížení



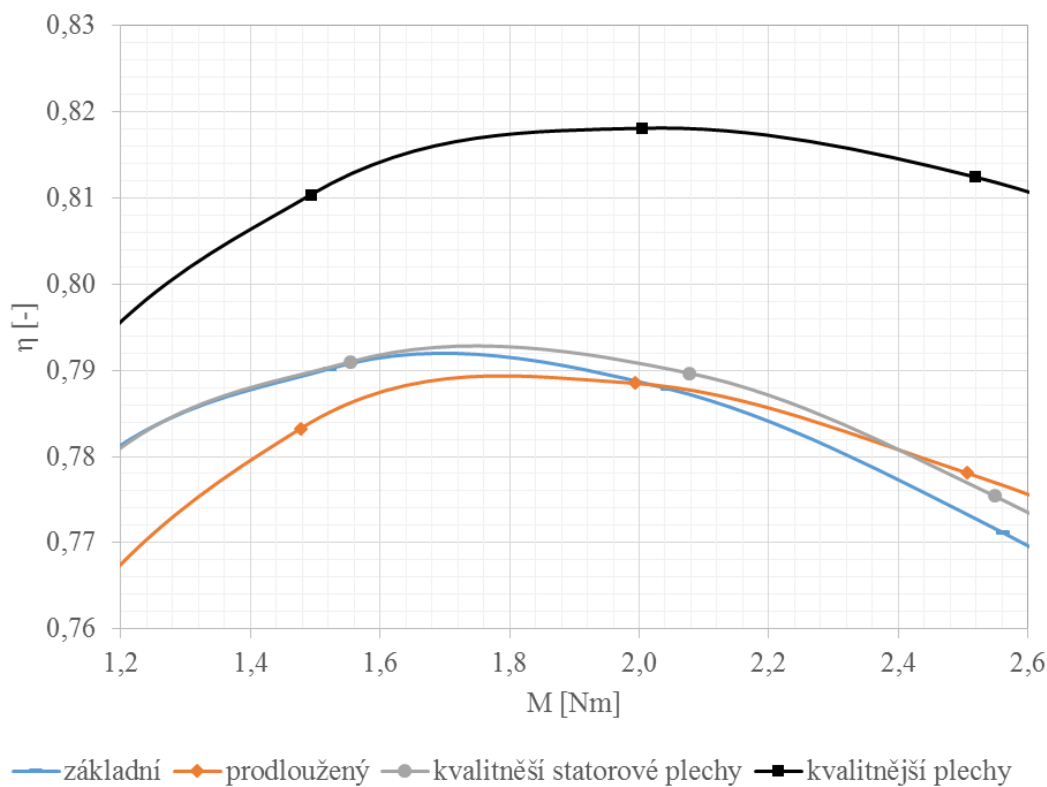
Obr. 7-31 Závislost celkových ztrát $\Delta P_{cel} = f(M)$ při zatížení



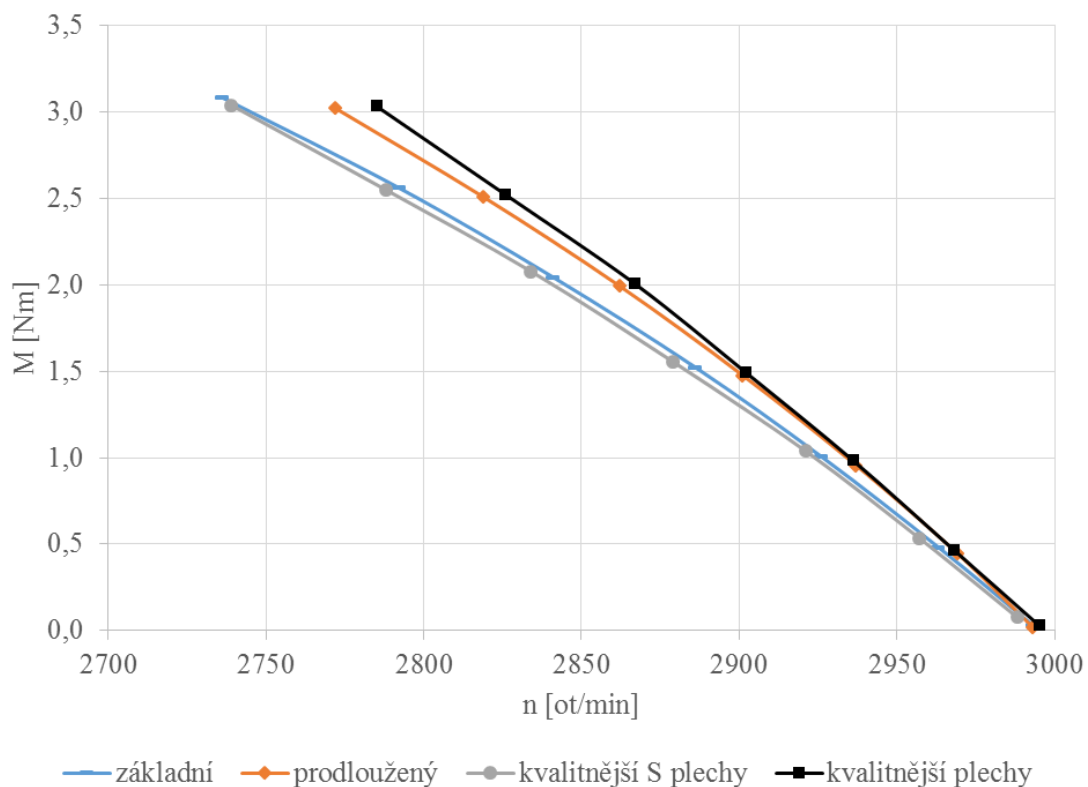
Obr. 7-32 Porovnání účinníku všech motorů $\cos\varphi = f(M)$ při zatížení



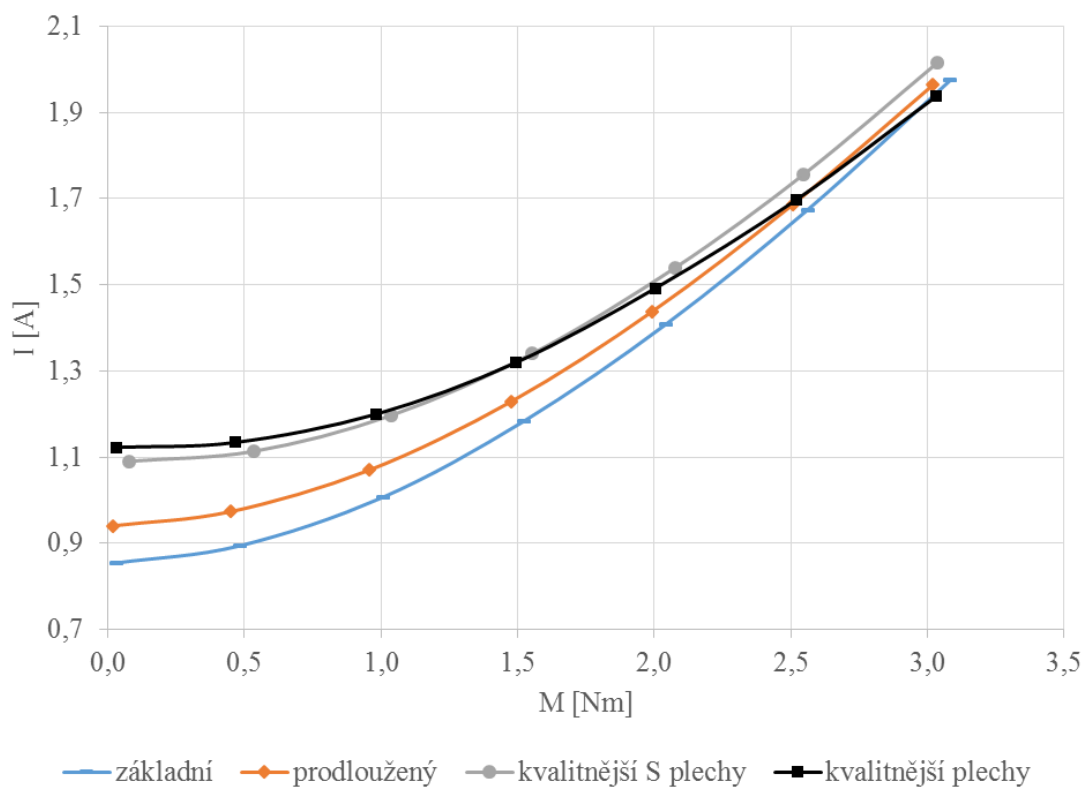
Obr. 7-33 Porovnání účinnosti všech motorů $\eta = f(M)$ při zatížení



Obr. 7-34 Detail účinností okolo jmenovitého momentu (2,02 Nm) všech motorů $\eta = f(M)$ při zatížení



Obr. 7-35 Momentová charakteristika všech motorů $M = f(n)$



Obr. 7-36 Proudová charakteristika všech motorů $I = f(M)$ při zatížení

Z naměřených a vypočtených hodnot vyplývá, že u všech měřených motorů vznikají největší ztráty ve satorovém vinutí a to celých 50 % z celkových ztrát. Následují ztráty v rotorovém vinutí a ostatní už jsou různé podle sestavení motoru (prodloužený magnetický obvod, širší vinutí, kvalitnější plechy), jak je vidět v Tab. 7-20. Satorové ztráty vinutí v % vychází u všech motorů skoro identické, nejmenší vycházejí u motoru s prodlouženým magnetickým obvodem. Prodloužený motor má větší magnetické ztráty než ostatní motory, je to dáno nižším počtem závitů (vyšším sycením).

Tab. 7-20 Procentuální podíl jednotlivých ztrát ze ztrát celkových u všech motorů ve jmenovitém bodě

motor	ΔP_{J1}	ΔP_{mech}	ΔP_{Fe}	ΔP_{J2}	ΔP_d
	[%]				
základní	50	8	9	29	4
prodloužený	48	5	13	27	7
kvalitnější S plechy	52	10	7	28	3
kvalitnější plechy	51	6	10	31	2

Na Obr. 7-29 je patrné, že použitím kvalitnějších plechů, i když jen ve satoru, se ztráty v železe snížily o 28,3 % vůči motoru se základními plechy. Tato změna se odrazila v účinnosti o nárůst maximálně 0,5 %.

O velikosti dodatečných ztrát (Obr. 7-30) rozhoduje více faktorů, jak již bylo nastíněno v teoretické části, takže je těžké určit přesné příčiny jejich nezanedbatelného nárůstu u prodlouženého motoru, když při jmenovitém momentu dosáhly velikosti 10,81 W. U tohoto motoru byla nejspíše nejvíce patrná deformace intenzity magnetického pole.

Křivka účinnosti (Obr. 7-33) při jmenovitém momentu vyšla nejvyšší u motoru s kvalitnějšími plechy 82 %, následuje motor s kvalitnějšími satorovými plechy 79 %, přičemž zbylé dva motory měly v ten samý moment (Obr. 7-34) stejnou účinnost 78,8 %. Očekávalo se, že základní motor bez různých úprav bude zaostávat za ostatními, ale to nastalo až za jmenovitým momentem (2,02 Nm).

Největší účinník má základní motor. Účinník je ukazatel stanovený poměrem činného a zdánlivého výkonu vyjadřujícího jakou část zdánlivého výkonu lze přeměnit na činný výkon.

V Tab. 7-21 jsou vyjádřeny hodnoty z měření při jmenovitých momentech strojů. Účinnost je zde vypočítána za předpokladu totožných mechanických ztrát ve všech motorech (12,533 W), tudíž rozdíly v mechanických ztrátách byly přičteny k výkonu a až poté byla vyčíslena účinnost.

Tab. 7-21 Porovnání motorů při jmenovitém momentu

Motor	M	I	P ₂	ΔP_{J1}	ΔP_{mech}	ΔP_{Fe}	ΔP_{J2}	ΔP_d	η
	[Nm]	[A]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[-]
základní	2,043	1,41	618,75	79,98	23,470	31,7	35,70	6,64	0,787
prodloužený	1,993	1,44	598,56	69,76	13,531	37,4	29,81	10,33	0,788
kvalit. S plechy	2,077	1,54	635,62	90,67	31,752	24,3	38,10	2,26	0,789
kvalitnější plechy	2,004	1,49	601,66	66,79	12,533	24,1	28,58	1,80	0,818

8 SIMULACE MOTORŮ V PROSTŘEDÍ ANSOFT MAXWELL

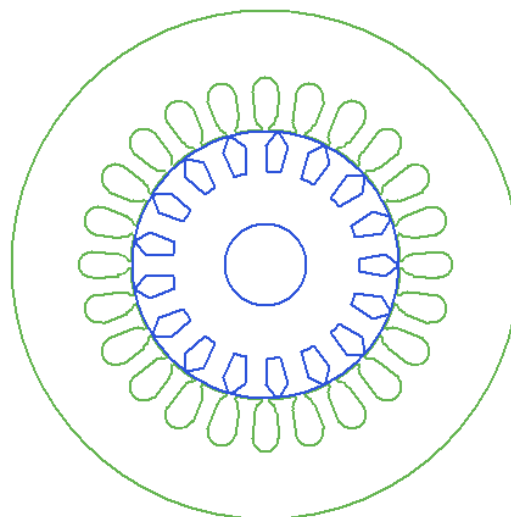
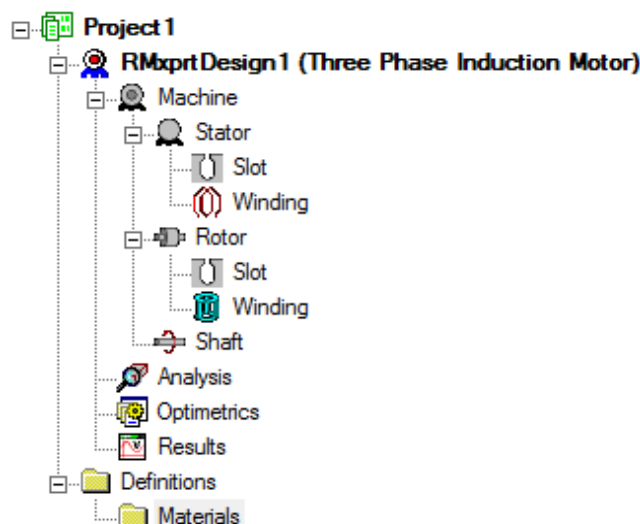
Aby bylo možné porovnat naměřená a vypočítaná data, byly motory od výrobce Atas Náchod a.s. namodelovány v prostředí Maxwell, aby co nejvěrohodněji odpovídaly reálnému sestavení.

8.1.1 Maxwell

Maxwell je software využívající metodu konečných prvků k analýze elektromechanických, elektromagnetických a přechodových dějů v motorech, pohonech, transformátorech a cívkách. Pomocí vlastních algoritmů řeší problémy v 2D a 3D elektromagnetických polích v určitém prostoru s vhodnými okrajovými podmínkami.

8.1.2 Vytvoření modelu

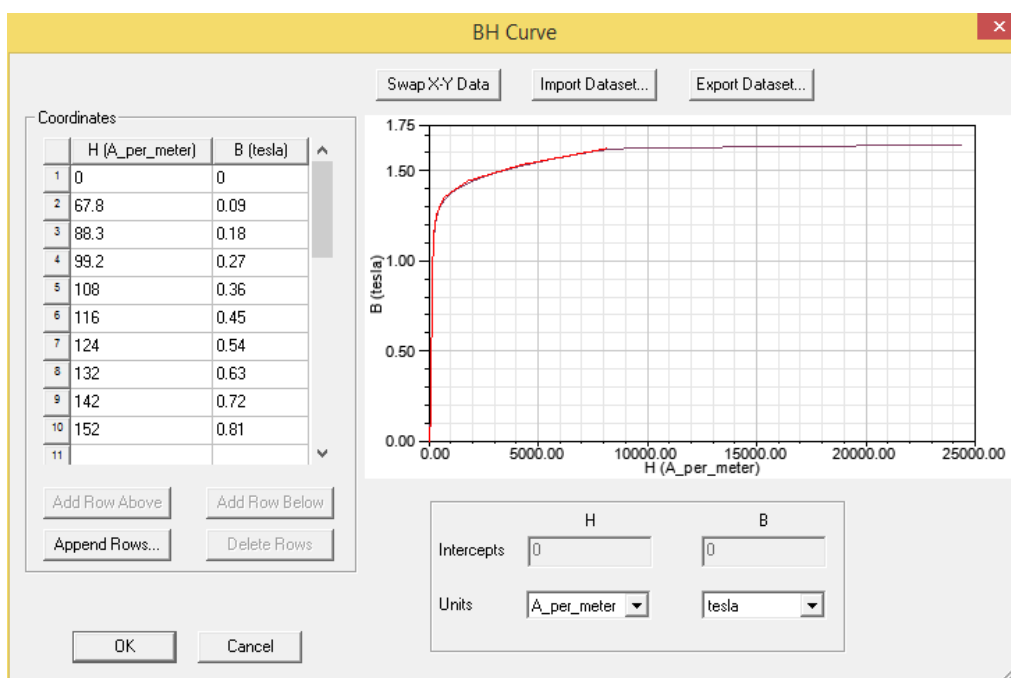
V Maxwellu bylo vybráno prostředí RMXprt Design, ve kterém byl nejdříve nakreslen motor podle výrobních dokumentací. Z nabídky byl vybrán 3f asynchronní motor a následně byly vyplněny parametry statoru, statorové drážky a vinutí, rotoru, rotorové drážky a klece (Obr. 8-1).



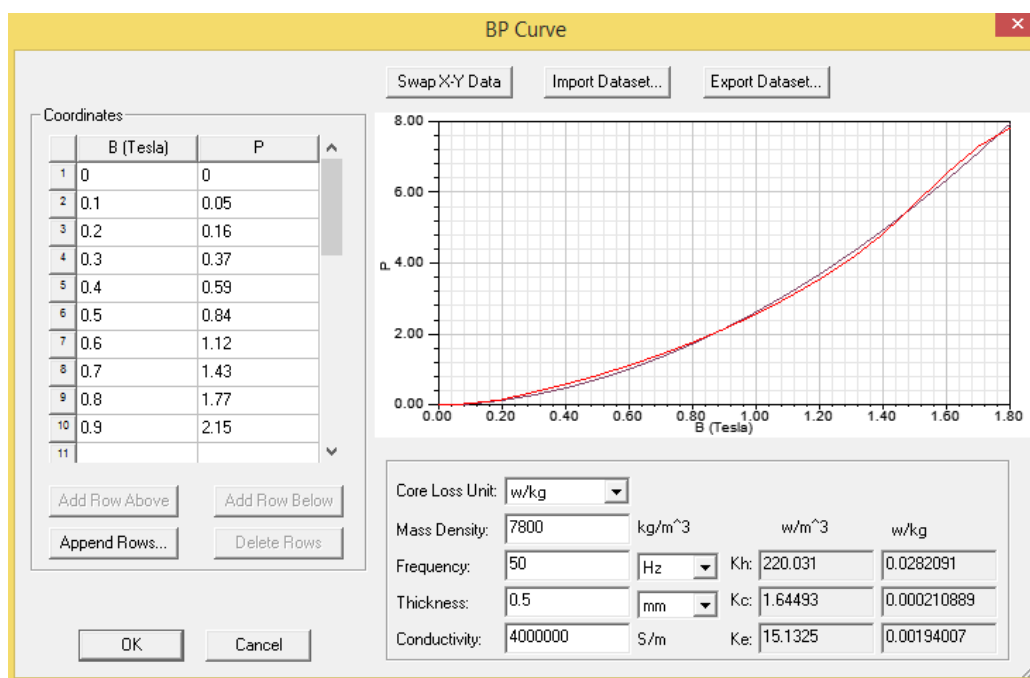
Obr. 8-1 Strom v prostředí RMXprt Designu a nakreslený model motoru

Dalším důležitým aspektem k získání věrohodného modelu jsou použité materiály v simulaci. Materiál statorových a rotorových plechů byl dle katalogu výrobce M700-50A z neorientovaných plechů, nebo z elektrokorozivně obráběných plechů M270-35A [18]. V katalogu od firmy Surahammars Bruk byly uvedeny hodnoty, podle kterých se do materiálové knihovny naimportovala prvotní magnetizační křivka (BH) a měrné ztráty v závislosti na magnetické indukci (BP), jak je vidět na Obr. 8-2 a Obr. 8-3. Nadefinováním BP si software dopočítal koeficienty K_h , K_c a K_e , které jsou důležité pro výpočet ztrát (BH a BP křivky simulovaných materiálů jsou uvedeny v příloze).

Materiál hřídele (ocel), statorového vinutí (měď) a rotorové klece (hliník) byly vybrány ze seznamu předdefinovaných materiálů, které Maxwell obsahuje v základu. U hliníkového materiálu byla přepočítána konduktivita na provozní teplotu motoru. Před samotným spuštěním analýzy bylo nutné zadat jmenovité hodnoty motoru a přibližné třecí a ventilační ztráty. Následně bylo provedeno spuštění analýzy RMXprt u nastavení $U = 400 \text{ V}$, $P_2 = 600 \text{ W}$, $n_n = 2830 \text{ ot/min}$, $t = 75 \text{ °C}$, $f = 50 \text{ Hz}$ a zapojení do hvězdy Wye.



Obr. 8-2 BH křivka plechů M700-50A

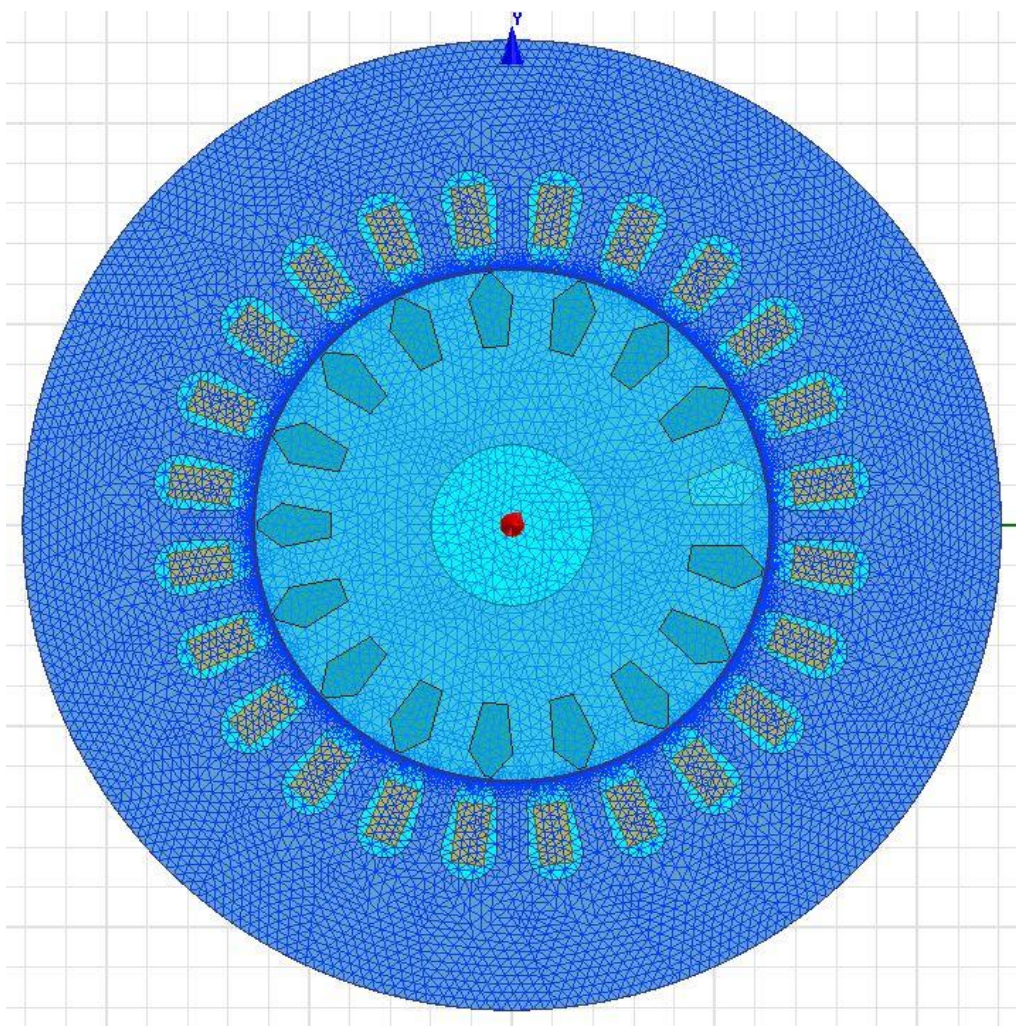


Obr. 8-3 BP křivka plechů M700-50A

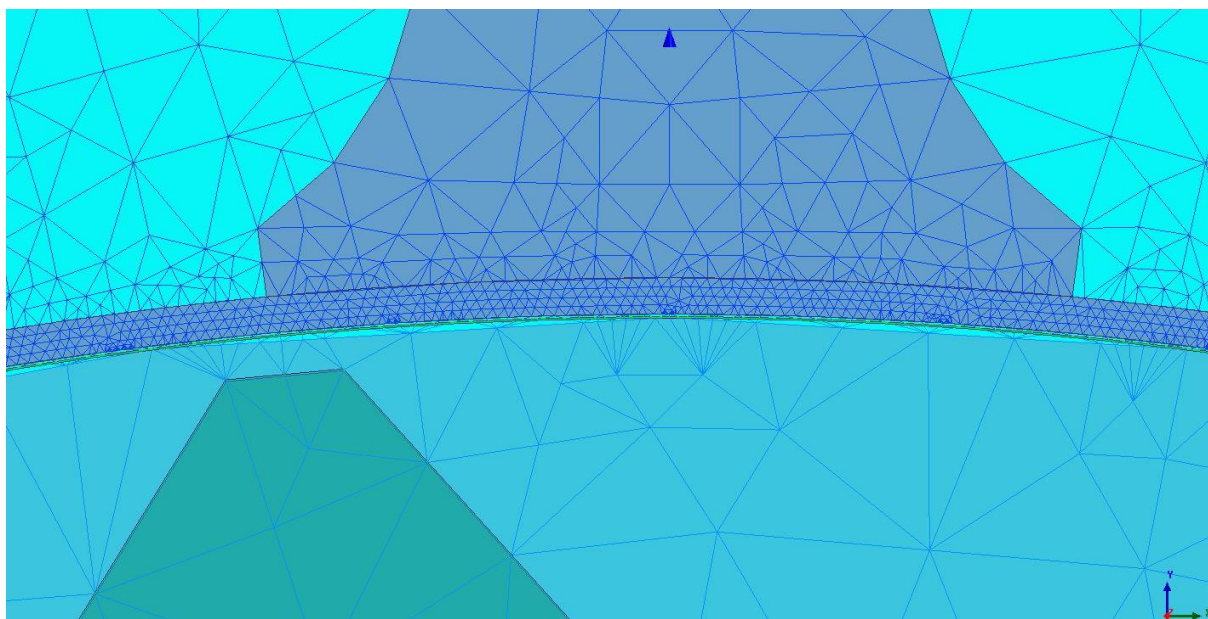
Po analýze bylo možné zobrazit závislosti momentu, proudu, účinníku, výkonu a účinnosti na otáčkách. Tím proběhlo ověření reálného a správně nakonfigurovaného modelu motoru v prostředí RMxprt, který provádí jen rychlé analytické výpočty.

Následně byl model převeden do Maxwell 2D Designu, ve kterém byla upravena síť prvků ve vzduchové mezeře, protože předdefinovaná nebyla dostatečně hustá. Poté byla zadána a vygenerována síť mesh motoru, kde každá část motoru měla jinou hustotu této meshe. Nej hustší byla ve vzduchové mezeře, protože právě tam dochází k přeměně elektrické energie na

mechanickou. Čím více elementů sítě, tím je přesnější a delší výpočet simulace. V daném motoru bylo vypočítáno 57 475 elementů (Obr. 8-4).



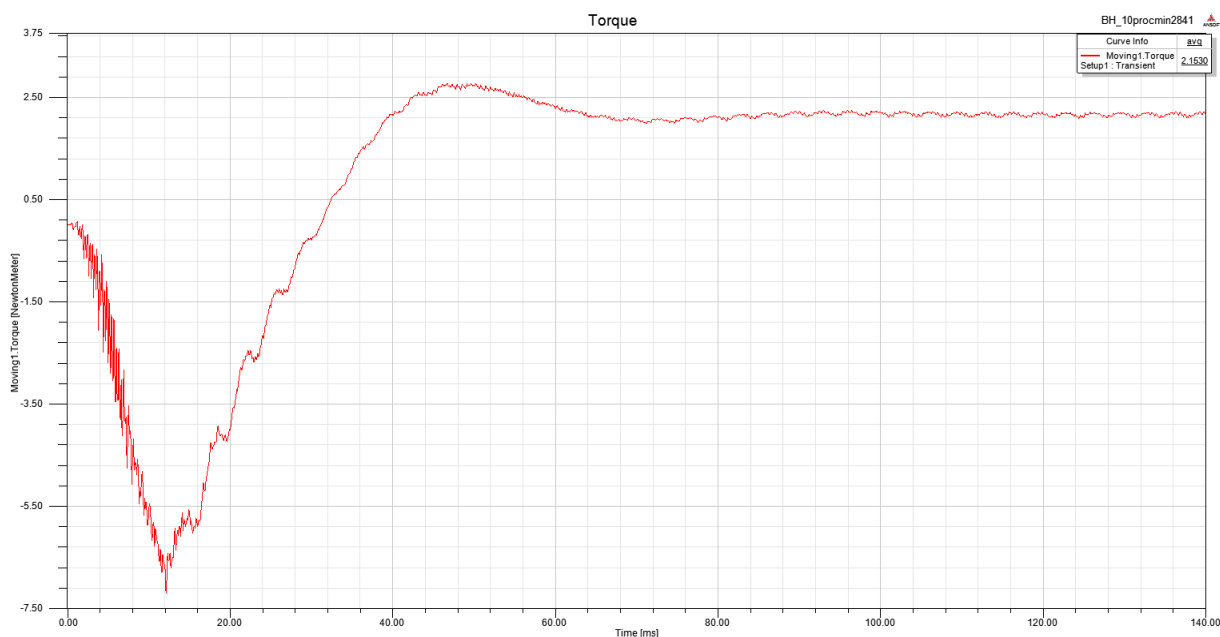
Obr. 8-4 Nastavená mesh asynchronního motoru



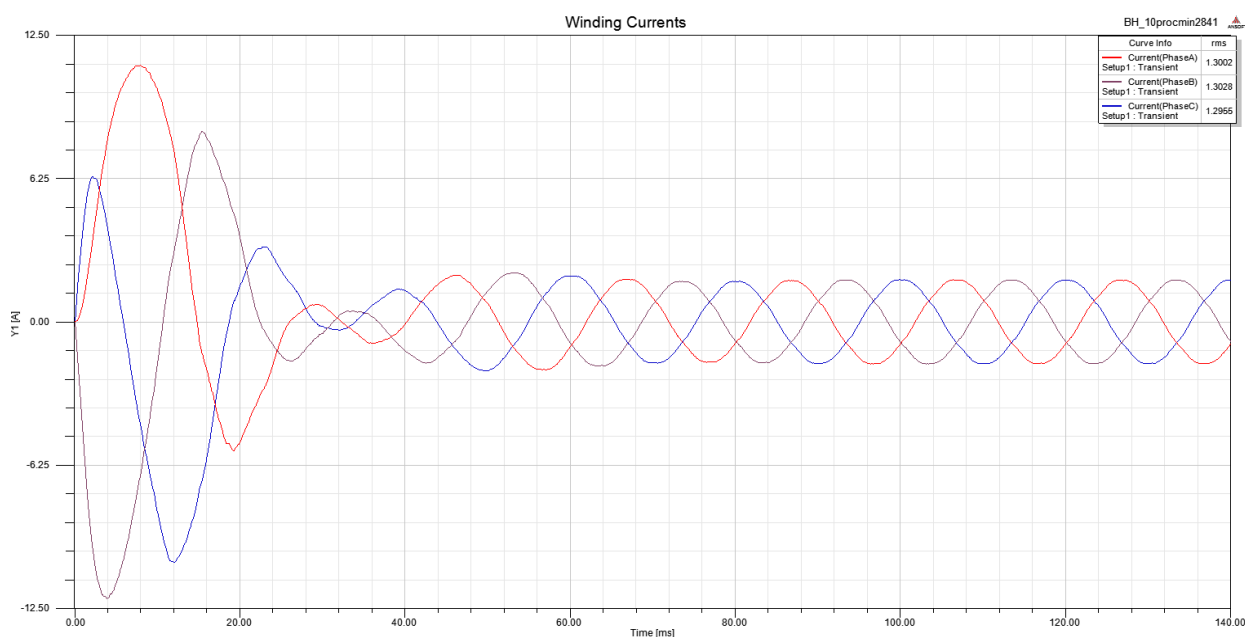
Obr. 8-5 Detail meshe přes vzduchovou mezeru

Pro výpočet byly také zadány na pevně otáčky (charakteristiky jsou vynášeny v závislosti na otáčkách) a délka simulace 140 ms, aby mohlo dojít k ustálenému stavu a odečtené hodnoty byly v ustáleném rozmezí jedné periody (v závislostech je hodnota brána v rozsahu $120 \div 140$ ms). Při tomto nastavení trvala simulace pět hodin.

Na Obr. 8-6 a Obr. 8-7 je zobrazena závislost momentu a proudu získaná ze simulace základního motoru při otáčkách $n = 2841$ z prostředí Maxwell 2D Design.



Obr. 8-6 Průběh momentu $M = f(t)$ pro $n = 2841$ základního motoru



Obr. 8-7 Průběh proudů $I_{ef} = f(t)$ pro $n = 2841$ základního motoru

8.2 Simulování základního motoru

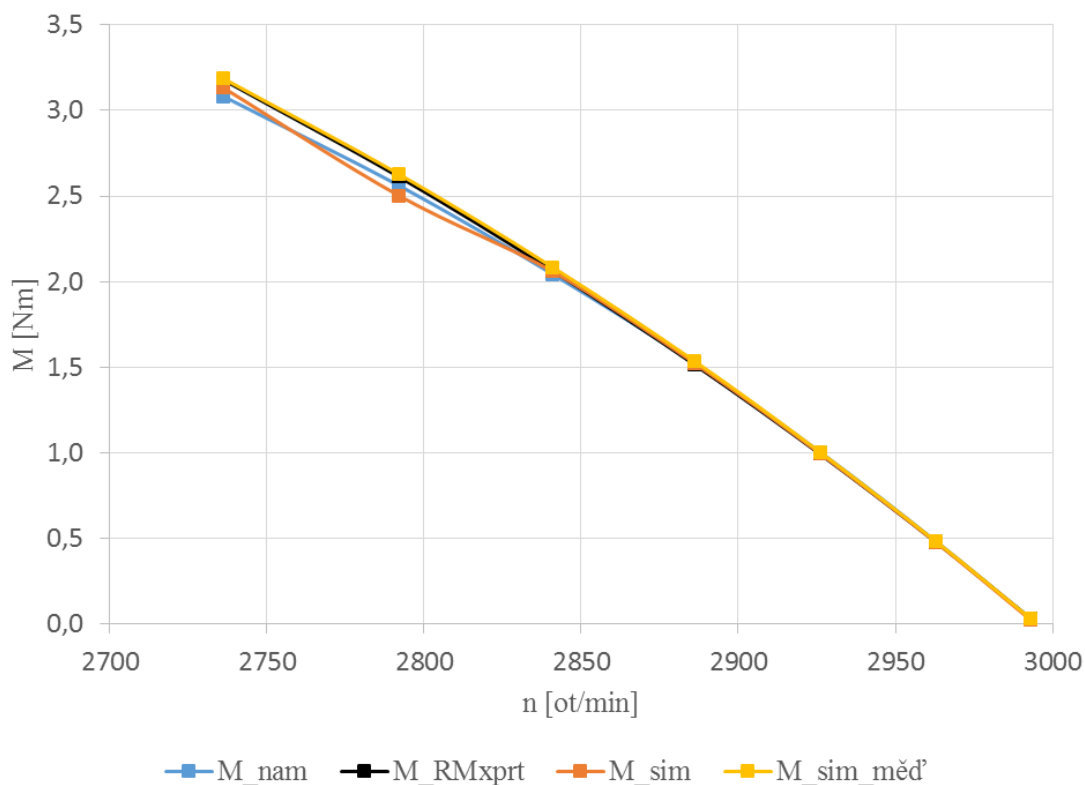
Základní motor byl v prostředí RMXprt namodelován podle reálných parametrů a posléze převeden do Maxwell 2D Design a simulován. Z Obr. 8-8 je vidět, že změřený moment, analyzovaný moment v RMXprt a simulovaný moment v 2D Designu je totožný, což vypovídá o dobrém nastavení simulace. To ovšem neplatí u proudu (Obr. 8-9), kdy v 2D Designu došlo k odloučení proudové křivky od naměřených hodnot a nastavených hodnot v RMXprt. To mohlo být nejspíše způsobeno rozdílem reálných plechů od naimportovaných z knihoven (možnou deformací plechů viz kapitola 2.1.1.1). Motor má tedy větší magnetickou vodivost a odebírá menší magnetizační proud. Tato výchylka s proudem následuje u všech simulací viz Tab. 8-1.

Přesná hodnota simulovaného momentu na hřídeli byla získána odečtením mechanických ztrát od nasimulovaného vnitřního momentu.

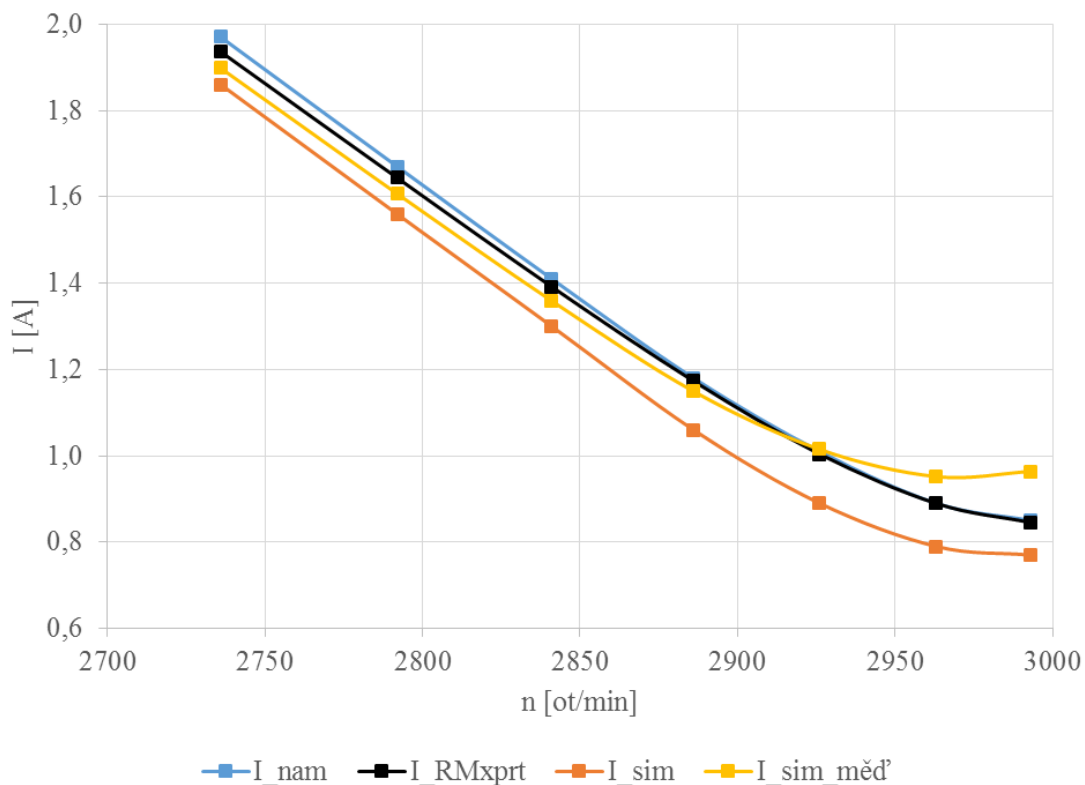
Tab. 8-1 Porovnání naměřených a simulovaných hodnot základního motoru

M [Nm]		I_{avg} [A]		ΔP_{J1} [W]		ΔP_{J2} [W]	
nam	sim	nam	sim	nam	sim	nam	sim
3,083	3,158	1,970	1,86	157,1	147,2	88,8	60,9
2,561	2,520	1,670	1,56	112,9	103,8	58,4	40,9
2,043	2,074	1,410	1,31	80,0	74,4	35,7	27,8
1,523	1,532	1,180	1,08	56,7	50,6	19,2	16,0
1,006	1,003	1,010	0,89	41,4	34,2	8,4	7,3
0,483	0,481	0,890	0,79	32,7	26,9	2,2	2,8
0,031	0,035	0,850	0,78	30,0	25,7	0,1	1,0
P_2 [W]		P_1 [W]		η [-]		$\cos\phi$ [-]	
nam	sim	nam	sim	nam	sim	nam	sim
883,3	904,8	1195,1	1178,5	0,739	0,767	0,873	0,914
748,8	736,5	985,1	962,0	0,760	0,765	0,847	0,890
607,8	617,1	785,3	771,6	0,774	0,799	0,802	0,850
460,3	463,1	596,3	565,7	0,772	0,818	0,724	0,756
308,3	307,4	417,0	384,4	0,739	0,799	0,596	0,623
149,9	149,4	245,9	211,5	0,609	0,706	0,395	0,386
9,7	10,9	101,5	69,5	0,096	0,157	0,171	0,129

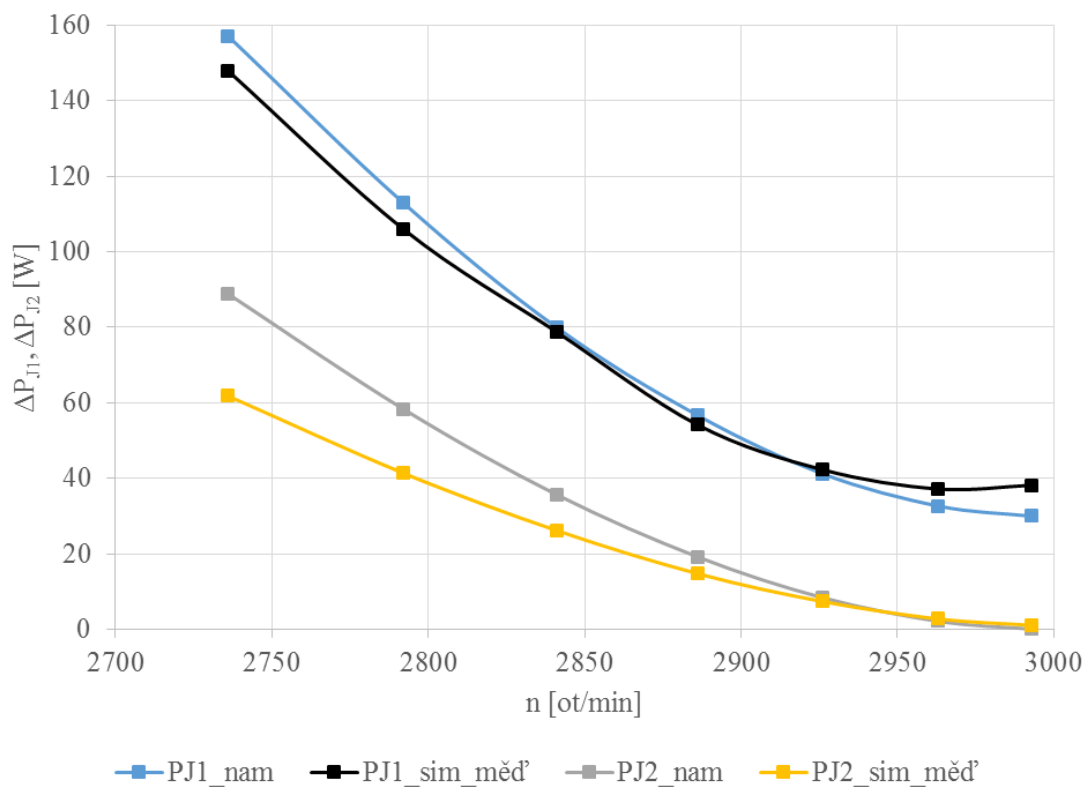
Motor byl simulován i při stavu, kdy měl namísto rotorové klece hliníkové klec měděnou. To mělo za následek hlavně pokles ztrát ve vinutí rotoru, ztrát v železe a zvýšení účinnosti viz Tab. 8-2.



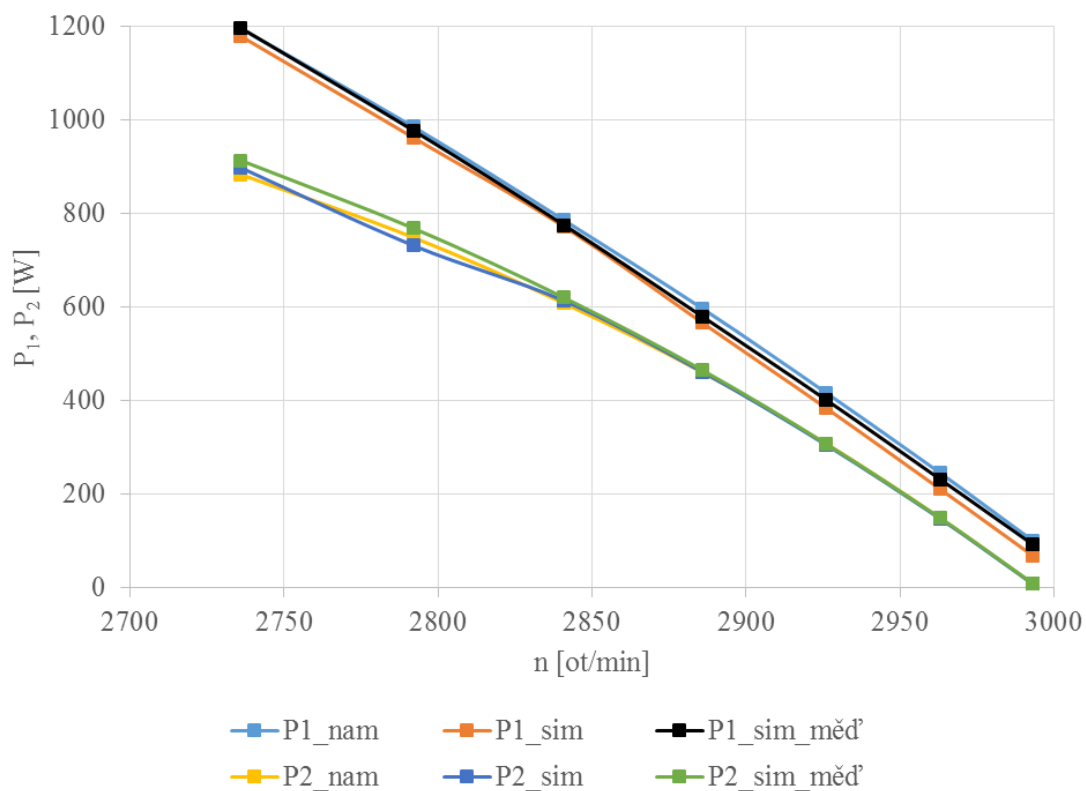
Obr. 8-8 Porovnání momentu měřeného a simulovaného $M = f(n)$ základního motoru



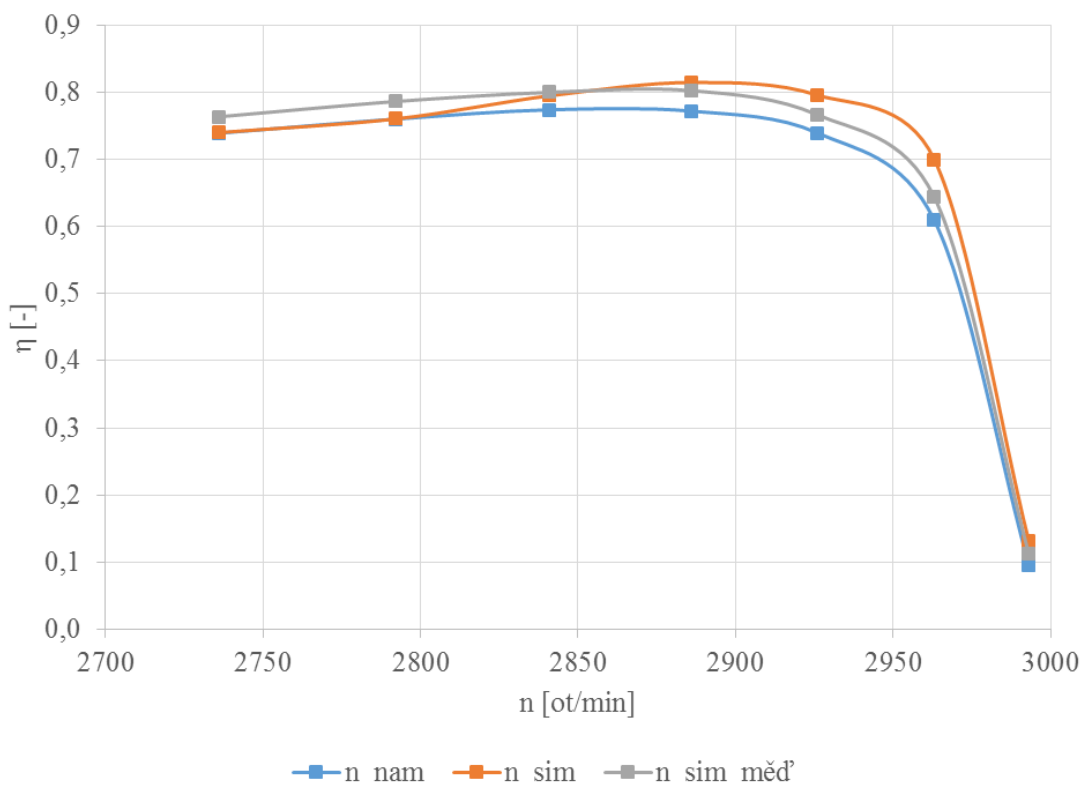
Obr. 8-9 Porovnání proudu měřeného a simulovaného $I = f(n)$ základního motoru



Obr. 8-10 Joulové ztráty ve statoru i rotoru při různých simulacích základního motoru



Obr. 8-11 Porovnání výkonu a příkonu při různých simulacích základního motoru



Obr. 8-12 Porovnání účinností měřeného a simulovaného motoru $\eta = f(n)$

V Tab. 8-2 jsou uvedeny naměřené hodnoty základního motoru, porovnané se simulací základního motoru s měděnou klecí, a to při jmenovitých otáčkách stroje. Nejvíce byl znát pokles ztrát ve vinutí rotoru následující ztrátami v železe. V případě měděné klece stoupla účinnost o 2,5 %.

Tab. 8-2 Porovnání měřeného základního motoru se simulací základního motoru s měděnou klecí

Stav	M	I	P ₂	P ₁	ΔP _{J1}	ΔP _{Fe}	ΔP _{J2}	ΔP _d	ΔP _{cel}	η	cosφ
	[Nm]	[A]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[-]	[-]
Naměřený	2,043	1,41	607,8	785,30	79,98	31,70	35,70	6,64	177,49	0,774	0,802
simulace měď	2,083	1,35	619,9	775,00	78,80	23,98	26,20	2,65	155,10	0,799	0,820
rozdíl [%]	1,92	-4,25	1,95	-1,31	-1,48	-24,35	-26,61	-60,09	-12,61	2,50	2,20

8.3 Simulování motoru s kvalitnějšími plechy

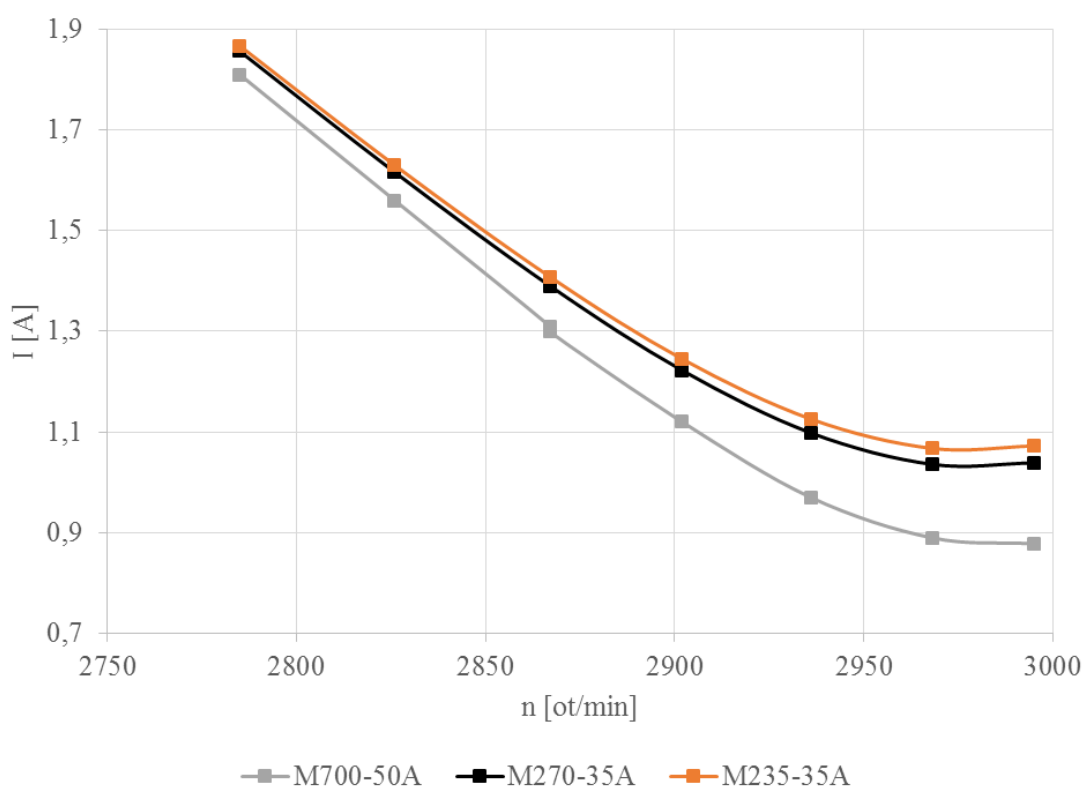
Použitím kvalitnějších plechů v magnetickém obvodu, lze dosáhnout menších magnetických ztrát, které jsou uvedeny v Tab. 8-3. Z tabulky je patrné, že kvalita plechů roste (nejméně kvalitní jsou M700-50A a nejkvalitnější M235-35A). Kvalitnější plechy (M235-35A) měly ztráty v železe menší o 62,56 % ve jmenovitých otáčkách, než plechy s větším ztrátovým činitelem (M700-50A). Účinnost rostla s kvalitou plechů až o 1,7 %.

Byla vyzkoušena i simulace, kdy byly jen v rotoru kvalitnější plechy, ale ani to nepřispělo k vylepšení parametrů motoru. Z toho vyplývá, že je dostačující využít kvalitnějších plechů ve statoru. Hledí se zejména na cenu kvalitnějších plechů, která není zanedbatelná, a proto se na rotorových plechách vyplatí z dlouhodobého hlediska šetřit.

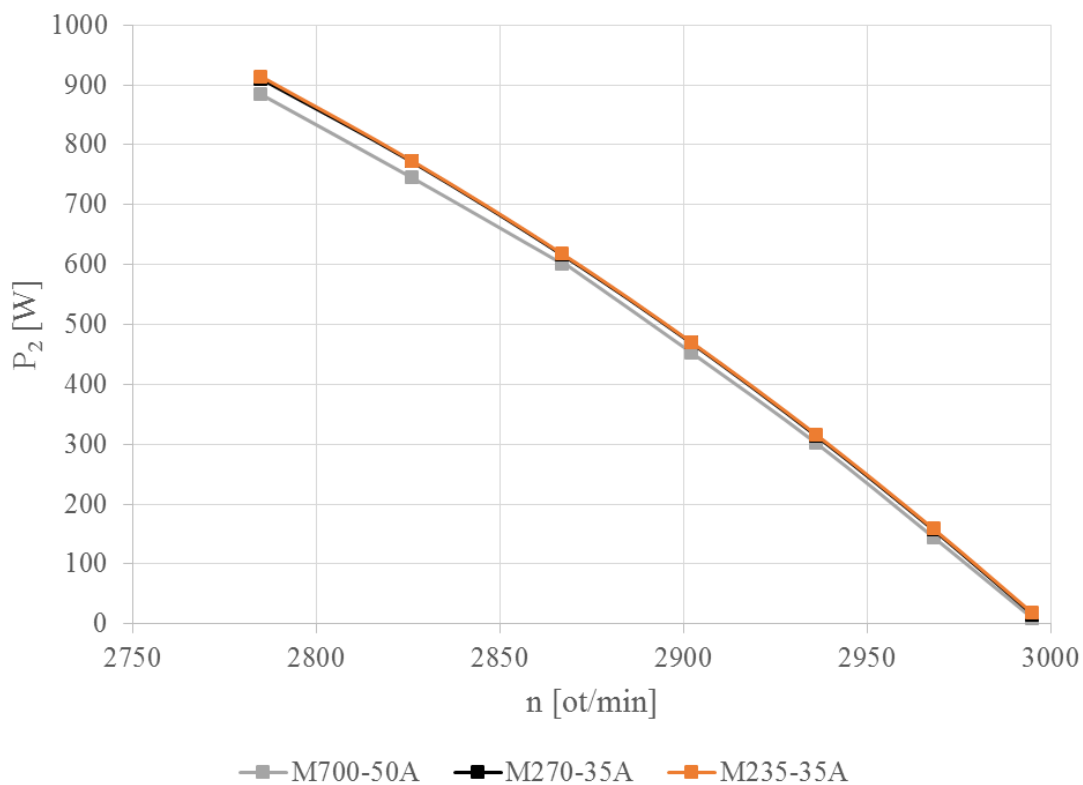
Pro různé typy plechů byl simulován motor typově stejný jako motor s kvalitnějšími statorovými plechy (průměr vinutí 0,53 mm, 92 z, délka 60 mm).

Tab. 8-3 Porovnání ztrát a účinnosti při simulování jmenovitých hodnot motoru

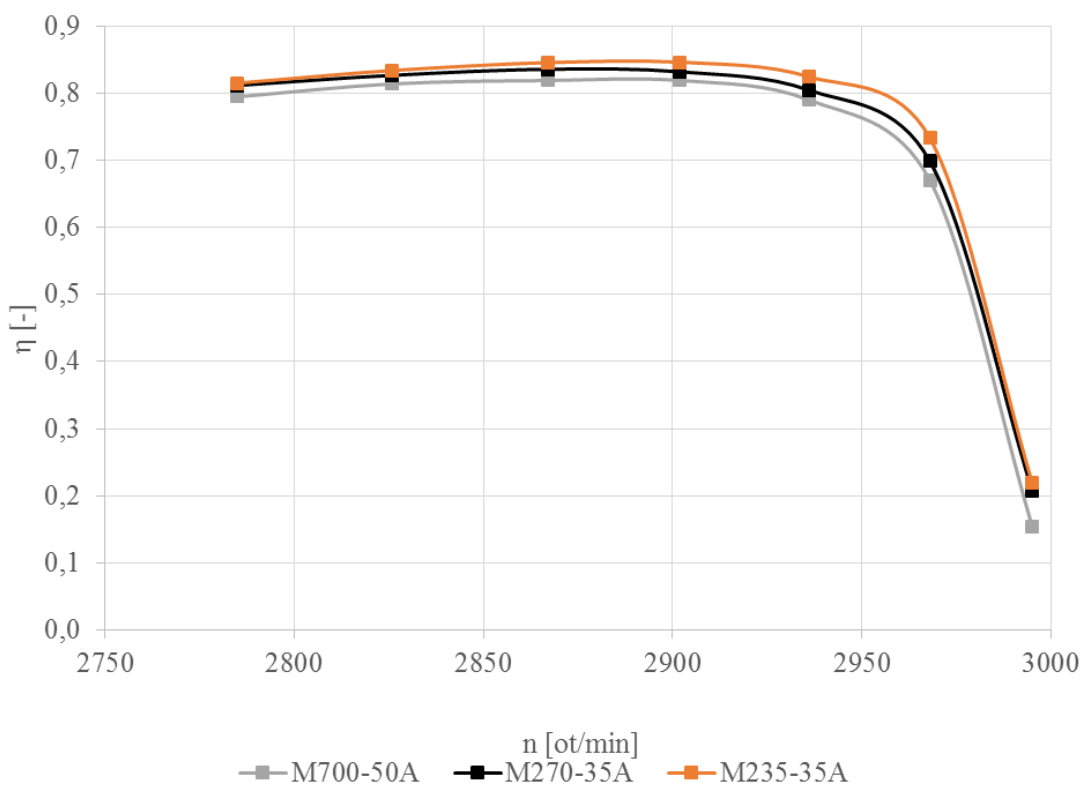
plechy	P_2	I	ΔP_{J2}	ΔP_{Fe}	η
	[W]	[A]	[W]	[W]	[-]
M700-50A	604,52	1,30	20,00	23,40	0,828
M270-35A	616,26	1,39	21,10	10,38	0,835
M235-35A	617,80	1,41	20,40	8,76	0,845



Obr. 8-13 Závislost simulovaného proudu $I = f(n)$ pro různé materiály plechů



Obr. 8-14 Závislost simulovaného výkonu $P_2 = f(n)$ pro různé materiály plechů



Obr. 8-15 Závislost simulované účinnosti $\eta = f(n)$ pro různé materiály plechů

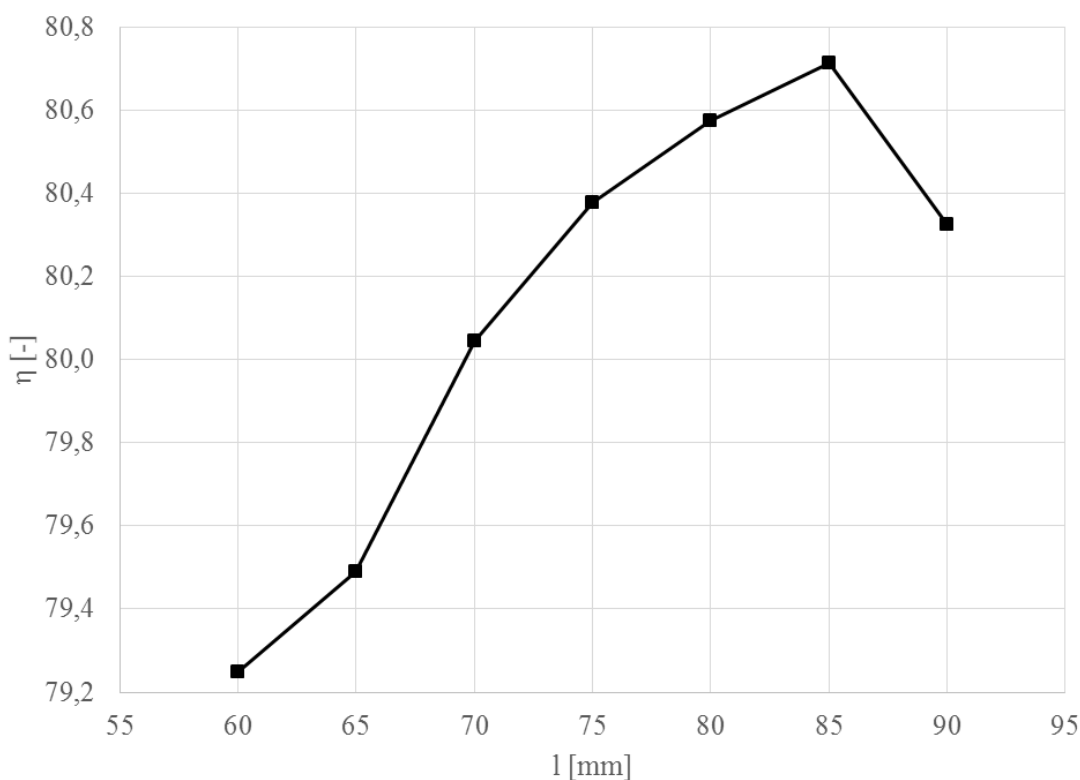
8.4 Simulování prodloužení magnetického obvodu

Jednou z možností snížení ztrát je prodloužení magnetického obvodu motoru a s tím i spojené přepočítání počtu závitů (viz kapitola 5.2) pro zachování parametrů stroje. Pomocí RMxpertu byla provedena analýza a výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 8-4. Z tabulky je patrné, že nekonečné prodlužování motoru neznamena konstantní růst účinnosti. Magnetický obvod základního motoru byl prodloužen o 10 mm (z 60 mm na 70 mm) a je vidět, že kdyby se prodloužil na 85 mm, tak by dosáhl své nejvyšší účinnosti. S dalším nárůstem magnetického obvodu již účinnost klesala.

S nárůstem délky motoru docházelo ke zvýšení ztrát ve vinutí rotoru, protože byla prodloužena hliníková klec. Ke snížení ztrát ve vinutí statoru docházelo vlivem menšího počtu závitů (menší odpor).

Tab. 8-4 Účinnost v závislosti na délce motoru

l	závity	η	P ₂
[mm]	[-]	[%]	[W]
60	92	79,2489	606,8
65	90	79,4890	607,0
70	88	80,0453	607,2
75	86	80,3770	608,1
80	84	80,5736	610,2
85	82	80,7131	613,8
90	81	80,3248	605,5



Obr. 8-16 Závislost délky motoru na účinnosti $\eta = f(l)$

8.5 Simulování plnění drážky

Program Maxwell jako takový neumí pracovat s činitelem plnění drážky. A tak byly analýzy provedeny následovně.

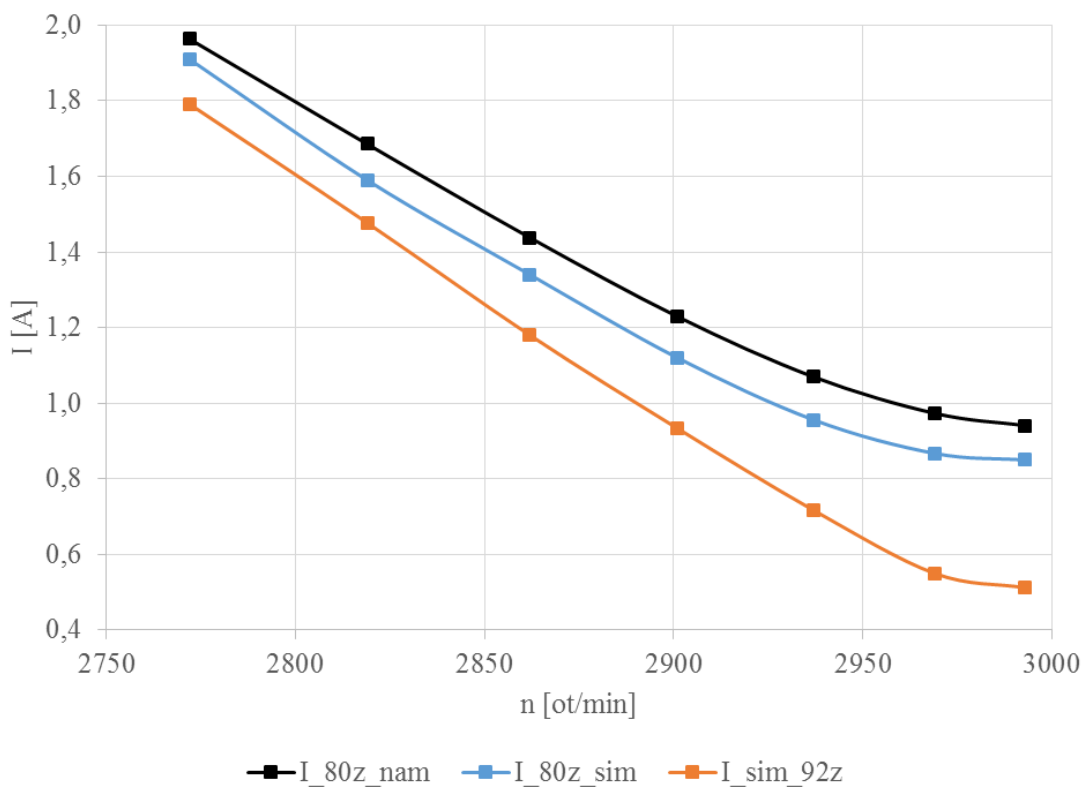
U simulování prodlouženého motoru byla vyzkoušena metoda rozdílného plnění drážky. V základním měření měl motor 80 závitů, ale stejně velkou statorovou drážku jako ostatní motory, kde bylo závitů 92. Proto byla na daném motoru vyzkoušena simulace při 80 z a 92 z.

Plnění drážky mělo vliv na ztráty statorového vinutí, protože jsou závislé na odporu vinutí a procházejícím proudu. Tím, že bylo v drážce více materiálu mědi, stoupl odpor vinutí a poklesnul procházející proud. Při provedení prodlouženého motoru vyšla větší účinnost při vsypání 92 závitů do drážky (Tab. 8-5).

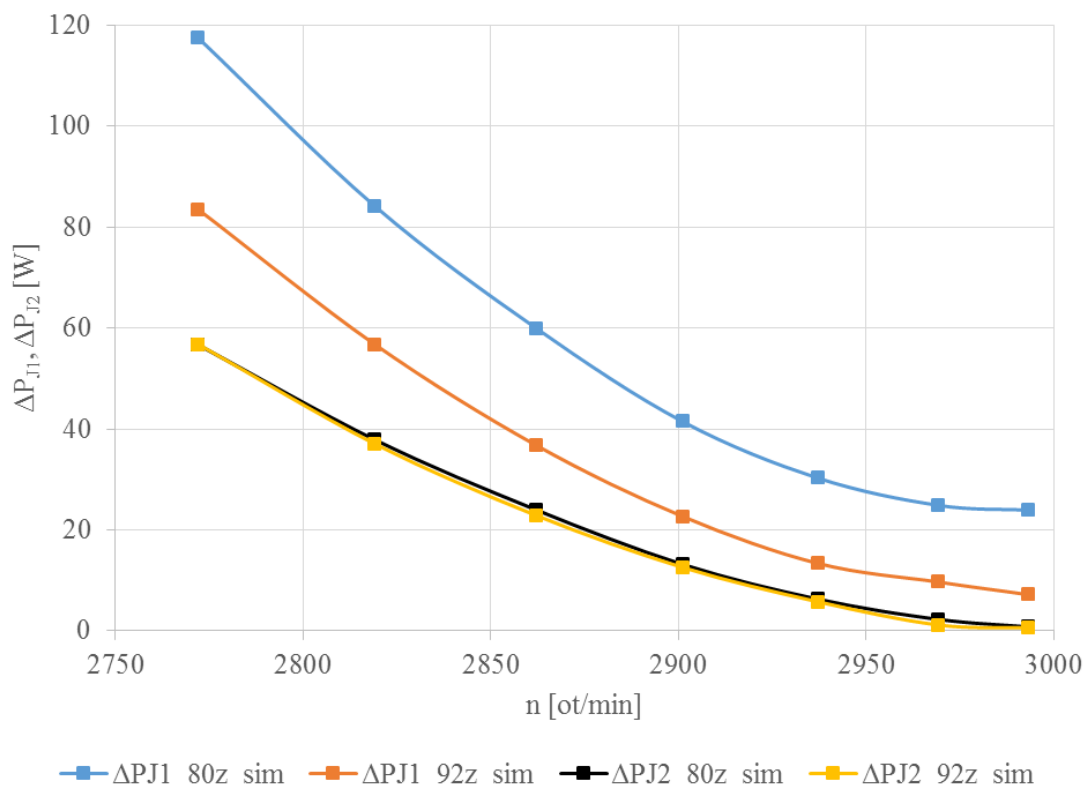
Protože je základní a prodloužený motor ze stejných plechů, je zde uvedena tabulka porovnávající hodnoty při jmenovitých otáčkách a hodnoty při jmenovitých otáčkách s kvalitnějšími plechy M235-35A.

Tab. 8-5 Porovnání základního a prodlouženého motoru při simulování při jmenovitých otáčkách

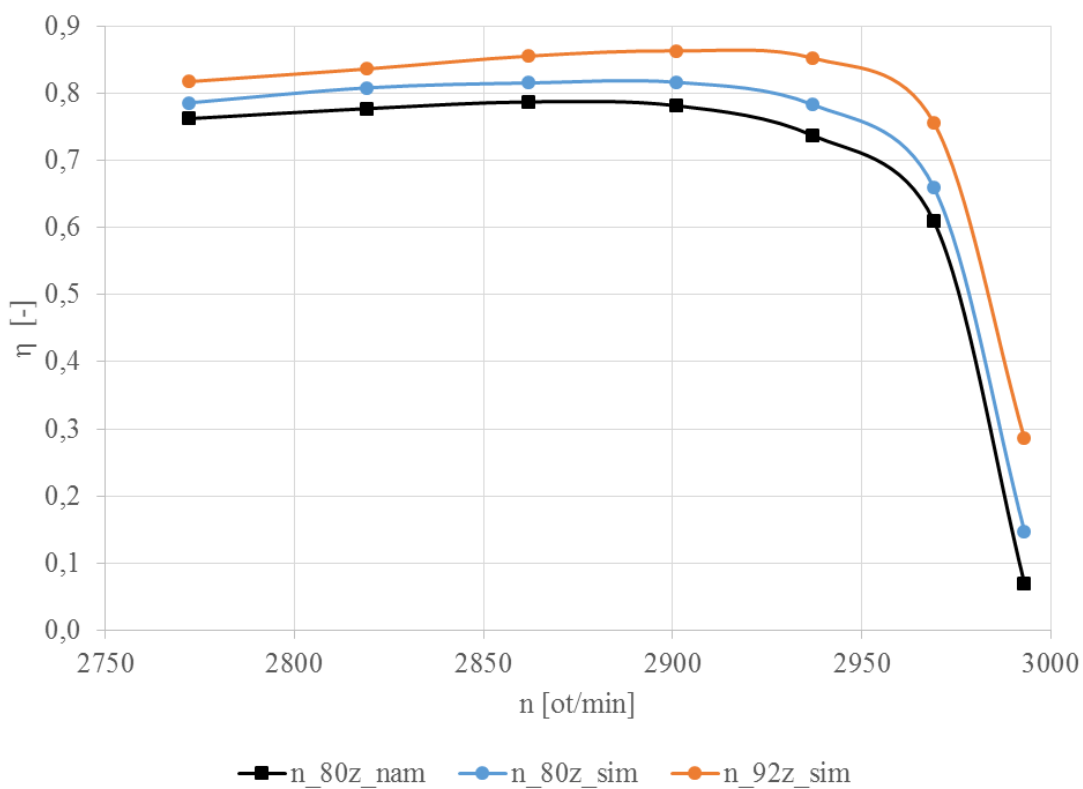
motor	M	I_{avg}	P_2	P_1	ΔP_{J1}	ΔP_{Fe}	ΔP_{J2}	η	$\cos\varphi$
	[Nm]	[A]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[-]	[-]
prodloužený 80 z nam	1,963	1,40	597,3	758,8	69,76	37,4	29,98	0,787	0,765
prodloužený 80 z sim	2,160	1,34	617,6	757,2	60,90	29,7	24,0	0,815	0,770
prodloužený 92 z sim	2,057	1,19	616,5	720,6	36,80	27,7	22,9	0,855	0,878
prodloužený 80 z sim (M235-35A)	2,075	1,28	621,8	738,1	54,90	10,13	22,7	0,842	0,832



Obr. 8-17 Porovnání proudů $I = f(n)$



Obr. 8-18 Porovnání simulovaných ztrát ve vinutí statoru a rotoru ΔP_{J1} , $\Delta P_{J2} = f(n)$



Obr. 8-19 Porovnání účinnosti $\eta = f(M)$ při různém plnění drážky

9 ZÁVĚR

Náplní této diplomové práce bylo prostudování normy pro určování účinnosti asynchronních motorů, a s tím spojené detailní seznámení s určováním jednotlivých ztrát v asynchronním motoru. Dále bylo potřeba získat přehled o možnostech zvyšování účinnosti asynchronních motorů bez nutnosti upravovat využívané nástroje při výrobě. V praktické části byly provedeny měření na asynchronních motorech s různými úpravami. Získané informace a hodnoty byly implementovány do simulačního programu Ansoft Maxwell, ve kterém byly simulovány stejné jako měřené motory (s různými úpravami) a výsledné hodnoty byly následně porovnány.

Podle Evropských norem jsou určeny minimální účinnosti dvoupólových třífázových asynchronních motorů ve škále $0,75 \div 375$ kW. Určování ztrát motoru z měření bylo provedeno podle normy ČSN EN 60034-2-1.

V páté kapitole jsou nastíněny teoretické směry zvyšování účinnosti asynchronních motorů v třídách IE. Navrhované metody byly založeny na modifikaci motoru bez nutnosti nakupování nových a drahých zařízení pro inovaci výroby. Zvolené úpravy byly následující: prodloužení magnetického obvodu, použití kvalitnější plechů s menším ztrátovým činitelem, použití mědi namísto hliníku v rotorové kleci a zvýšení plnění statorové drážky. Díky uvedeným vylepšením nastává zvýšení účinnosti standartních motorů v třídách IE z nižších do vyšších tříd.

Samotné měření proběhlo na dvoupólových asynchronních motorech od společnosti Atas Náchod. Motory byly měřeny ve třech stavech (naprázdno, nakrátko a při zatížení), aby bylo možno dopočítat hodnoty jednotlivých ztrát motoru. Měřením naprázdno byl měřen příkon, který pokrýval pouze vlastní ztráty motoru. Z tohoto měření byly tedy zjištěny ztráty ve vinutí statoru naprázdno, v železe naprázdno a mechanické ztráty. Měřením při zatížení byly vyjádřeny ztráty ve statorovém vinutí, v rotorovém vinutí, v železe, dodatečné a ztráty mechanické byly zjištěny již z měření naprázdno. Z měření nakrátko byl dopočítán záběrný moment motorů.

Při měření motorů naprázdno měl nejmenší ΔP_0 motor s kvalitnějšími plechy a průměrem vodiče 0,6 mm. Největší ΔP_{Fe} měl motor prodloužený kvůli menšímu počtu závitů ve statorové drážce (vyšší sycení). Ze zatěžovacího měření všech motorů vyšlo, že statorové vinutí způsobuje 50 % všech ztrát. Následují ztráty v rotorovém vinutí cca 30 % a další ztráty jsou dány rozlišením sestavením motorů. Dodatečné ztráty při zatížení byly maximálně 7 % z celkových ztrát při jmenovitém momentu motoru. Nejúčinnější motor (82 %) byl s kvalitními plechy a vyšším průměrem vodiče oproti ostatním motorům.

První testovanou metodou pro snížení ztrát byla změna materiálu klece z hliníku na měď. Tím bylo dosaženo menších ztrát ΔP_{J2} a zvýšení účinnosti o 2,5 % od základního typu motoru. Tato metoda je stále ve vývoji a naráží na problémy při výrobě. Hlavní nedostatek metody je vyšší teplota tavení mědi než hliníku (cca 400 °C). V teoretické části bylo pojednáno o svařených měděných plátech v hliníkové kleci, aby nedocházelo k velkému rozdílu v momentové a proudové charakteristice. Bohužel výroba naráží na mnoho nedostatků hlavně při svařování mědi.

Zvýšení účinnosti lze dosáhnout také použitím kvalitnějších plechů v magnetickém obvodu. Při simulacích byly využity plechy s nadefinovanými BH a BP křivkami od společnosti Tata Steel [18]. Při zvolení plechů s menším ztrátovým činitelem (M235-35A) oproti základním plechům (M700-50) vzrostla účinnost motoru o 2,7 %. S kvalitou plechu roste i jejich cena, proto bylo simulováno složení motoru jen s kvalitnějšími plechy v rotoru a následně v rotoru i ve statoru. Použití kvalitnějších plechů jen v rotoru nemělo velký vliv na vylepšení parametrů stroje. Z hlediska úspor je výhodné použití kvalitnějších plechů jenom ve statoru.

Dalším způsobem na snížení ztrát bylo prodloužení magnetického obvodu. K zachování parametrů motoru bylo potřeba přepočítat počet závitů. Tato metoda ve jmenovitém momentu motoru snížila celkové ztráty a účinnost stoupla o 2 %. Při analýze v RMxpřtu vyšla nejvyšší účinnost 80,71 % při délce magnetického obvodu 85 mm. Účinnost od této délky klesala s poklesem i nárůstem délky motoru.

Poslední metoda zahrnovala možnost plnění drážky statoru. Ve vinutí statoru vznikl největší podíl ztrát v motoru. Snížit ztráty je možné zvýšením činitele plnění drážky k_{dr} , který není v současné době plnohodnotně využit (nedostatky automatizovaného navíjení). Měřené motory měli činitel plnění drážky roven pouze 0,3. Tento činitel lze zvýšit použitím většího průměru vodiče vinutí. V porovnání měřených motorů měl základní motor vinutí o průměru 0,53 mm a motor s kvalitnějšími plechy 0,6 mm i díky tomu vzrostla jeho účinnost.

Nejvyšší přírůstek účinnosti ze simulací vyšel pro vyšší plnění drážky (2,78 %), poté následovalo použití kvalitnějších plechů (2,7 %). Na třetím místě byla měděná klec (2,5 %) a nejmenší přírůstek dosáhla metoda prodloužení magnetického obvodu (2 %).

LITERATURA

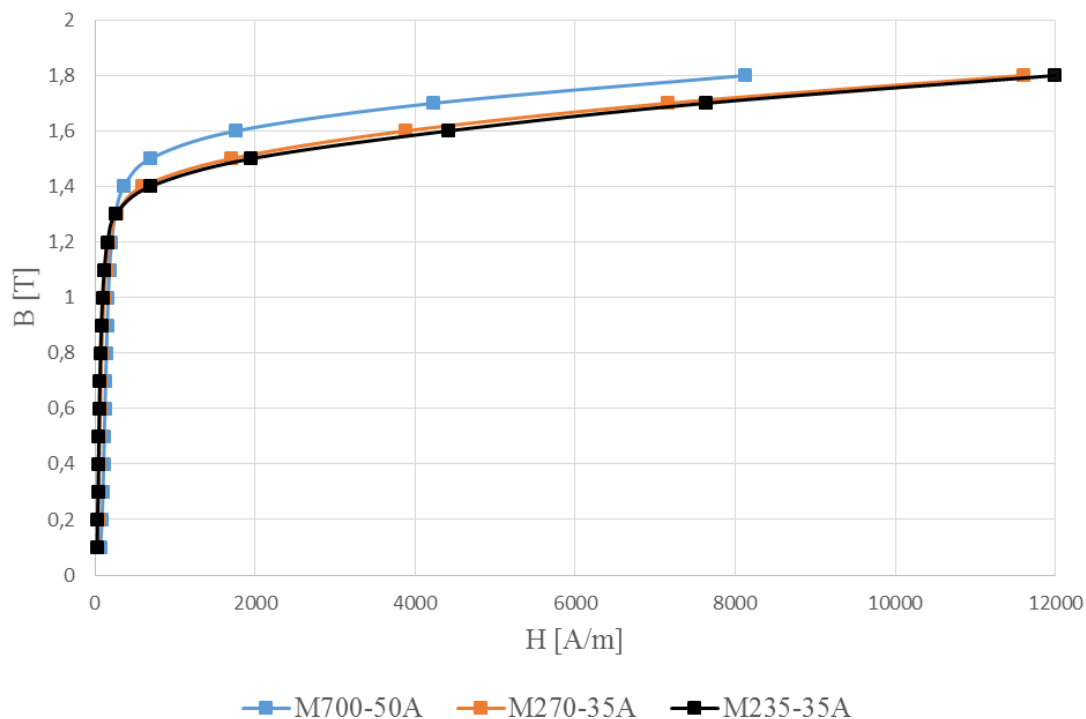
- [1] ALBERTI, Luigi, Nicola BIANCHI, Aldo BOGLIETTI a Andrea CAVAGNINO. *Core axial lengthening as effective solution to improve the induction motor efficiency classes* [online]. Italy, 2013, 6.6. 2013 [cit. 2013-12-12]. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6525320>
- [2] IEEE, IAS IEEE Industry Applications Society. *Conference record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference: Converting theory to practice : 39th IAS Annual Meeting : 3-7 October, 2004, seattle* [online]. Piscataway, N.J.: IEEE, 2004 [cit. 2013-12-12]. ISBN 07-803-8486-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1348825>
- [3] *PowerAfrica 2007 conference and exposition: July 16-20, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa* [online]. Piscataway, N.J.: IEEE, 2007 [cit. 2013-12-12]. ISBN 978-142-4414-789. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4498051>
- [4] *A Study of the Engineering Calculations for Iron Losses in 3-phase AC Motor Models* [online]. 2007 [cit. 2013-12-16]. ISSN 1553-572X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4460039>
- [5] ČSN EN 60034-2-1 (350000). *Točivé elektrické stroje - Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [6] NAVRÁTILOVÁ, Eva. *Asynchronní motor* [online]. 2009 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/esp/asynch_motor.pdf
- [7] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s.
- [8] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [9] TROJOVSKÝ, František. *Návrh asynchronního motoru s rotorem nakrátko: učební pomůcka pro 4. roč. průmyslových škol elektrotechnických*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962, 59 s.
- [10] HELLER, Bedřich a Václav HAMATA. *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961, 202 s.
- [11] PIKOUS, Jan. *Záběrný moment asynchronního motoru*. Plzeň, 2013. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10501/BP_Jan_Pikous.pdf?sequence=1. Bakalářská. Západočeská univerzita v Plzni.
- [12] *Classification of Electric Motors - Part Two. Electrical knowhow* [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.electrical-knowhow.com/2012/05/classification-of-electric-motors-part.html>
- [13] *Asynchronní stroje* [online]. [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/AM.pdf>



-
- [14] Andriollo, M.; De Bortoli, M.; Tortella, A., "Procedures for the additional losses assessment and analysis in high-efficiency induction machines," *Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 International Conference on*, vol., no., pp.389,394, 14-16 June 2011. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6036342&isnumber=6036258>
- [15] KOCMAN, Stanislav a Ctirad KOUDELKA. *Asynchronní stroje* [online]. 2004. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/Asynchronni%20stroje-FAST.pdf>
- [16] BOLDEA, I a S NASAR. *The induction machine handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-493-0004-5.
- [17] Gmyrek, Z.; Cavagnino, A.; Ferraris, L., "Estimation of magnetic properties and damaged area width due to punching process: Modeling and experimental research," *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*, vol., no., pp.1301,1308, 2-5 Sept.2012. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6350045&isnumber=6349821>
- [18] TATA STEEL. *Non oriented electrical steel* [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: http://www.sura.se/Sura/hp_main.nsf/startupFrameset?ReadForm

PŘÍLOHY

BH křivky materiálů definované v simulacích



BP ztrátové křivky materiálů definované v simulacích

