

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

AUTOMATIZOVANÉ MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU POMOCÍ LABVIEW

DIPLOMOVÁ PRÁCE

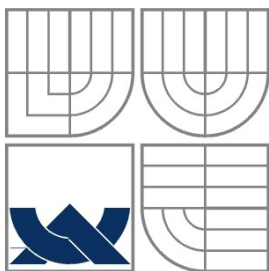
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

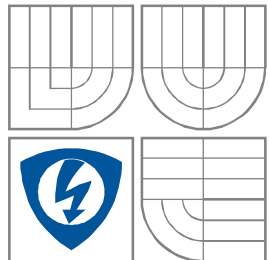
Bc. Lukáš Halfar

BRNO 2016



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

AUTOMATIZOVANÉ MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU POMOCÍ LABVIEW

AUTOMATIC MEASUREMENT OF INDUCTION MACHINE USING LABVIEW

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

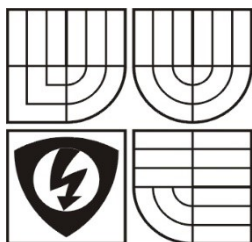
Bc. Lukáš Halfar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Bulín

BRNO, 2016



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. Lukáš Halfar

Ročník: 2

ID: 146826

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Automatizované měření asynchronního motoru pomocí LabVIEW

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se a sepište základní přehled využití automatizovaných měření pro zkoušky elektrických strojů.
2. Vytvořte prostřednictvím LabVIEW program pro automatizované měření.
3. Sestavte pracoviště pro automatizované měření a proveďte zkoušky na zadaném elektrickém stroji.
4. Proveďte elektromagnetický výpočet na zadaném stroji a výsledky srovnajte s měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PYRHÖNEN, JUHA. *Design of Rotating Electrical Machines (second edition)*; John Wiley & Sons, Ltd 2014
- [2] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice.*

Termín zadání: 21. 9. 2015

Termín odevzdání: 24. 5. 2016

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Bulín

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 této diplomové práci, která nese název *Automatizované měření asynchronního motoru pomocí LabVIEW*, je vytvořen automatizovaný měřicí systém pro provádění zkoušek asynchronních strojů. Měřicí algoritmus tohoto systému je naprogramován ve vývojovém prostředí LabVIEW. V rámci této práce je provedeno měření pomocí vytvořeného měřicího pracoviště za účelem ověření funkčnosti programu a provedení zkoušek, na základě kterých je proveden rozbor ztrát asynchronního motoru Atas Elektromotory Náchod a.s. T22VT512. Práce se dále zabývá elektromagnetickým výpočtem měřeného motoru T22VT512 pomocí analytického výpočtu v programu RMxpert a simulace pomocí metody konečných prvků v programu Maxwell 2D.

Abstract

The main purpose of the thesis *Automatic measurement of induction machine using LabVIEW* was to develop an automated measuring system, which is used to perform tests of induction motors. The algorithm of the system is programmed in LabVIEW. In the practical part of this thesis, a measurement of the motor Atas Elektromotory Náchod a.s. T22VT512 is carried out, in order to verify functions of the algorithm, and to perform tests of the motor to analyse losses. Another part of the work is dedicated to the electromagnetic calculation of the motor T22VT512. For this purpose, two softwares with different principles of calculation have been used. Firstly, the calculation is solved by an analytical based software called RMxpert. Secondly, the software Maxwell 2D is used to make the calculation of electric and magnetic fields by the finite element method.

Klíčová slova

Asynchronní motor; automatizovaný měřicí systém; analýza ztrát; Ansys Maxwell; DAQ; dodatečné ztráty; LabVIEW; mechanické ztráty; RMxpert; účinnost; ztráty v elektrickém stroji; ztráty ve vinutí; ztráty v železe.

Keywords

Additional losses; automated measurement system; analysis of losses; Ansys Maxwell; DAQ; efficiency; induction motor; LabVIEW; losses in electrical machines; core losses; resistive losses, mechanical losses; RMxpert; Maxwell 2D.

Bibliografická citace

HALFAR, L. *Automatizované měření asynchronního motoru pomocí LabVIEW*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 76 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Bulín.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Automatizované měření asynchronního motoru pomocí LabVIEW 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.

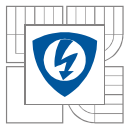
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského 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. Tomáši Bulínovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne Podpis autora

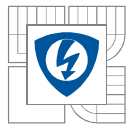


Obsah

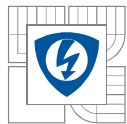
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
ÚVOD.....	13
1 TEORETICKÝ ROZBOR.....	14
1.1 VYUŽITÍ AUTOMATIZOVANÝCH MĚŘENÍ.....	14
1.1.1 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ LABVIEW	20
1.2 ZTRÁTY V ELEKTRICKÉM STROJI	25
1.2.1 ZTRÁTY VE VINUTÍ.....	25
1.2.2 ZTRÁTY V ŽELEZE.....	26
1.2.3 MECHANICKÉ ZTRÁTY	30
1.2.4 DODATEČNÉ ZTRÁTY	30
1.3 ZKOUŠKY ASYNCHRONNÍHO STROJE	33
1.3.1 VŠEOBECNÉ POŽADAVKY.....	33
1.3.2 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ ZTRÁT	34
1.4 MĚŘENÍ ČINNÉHO VÝKONU	38
2 MĚŘICÍ PROGRAM	40
2.1 FRONT PANEL.....	40
2.2 BLOCK DIAGRAM.....	43
3 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	51
3.1 ANALÝZA ZTRÁT	53
3.1.1 MĚŘENÍ ODPORU STATOROVÉHO VINUTÍ	53
3.1.2 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA	53
3.1.3 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO	54
3.1.4 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA	56
3.1.5 ZKOUŠKA NAKRÁTKO	59
3.2 SROVNÁNÍ S YOKOGAWA 1600WT	60
4 ELEKTROMAGNETICKÝ VÝPOČET MOTORU ATAS T22VT512	62
4.1 RMXPR T	62
4.2 MAXWELL 2D.....	67
ZÁVĚR	73
LITERATURA	75

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Blokové schéma automatizovaného měření</i>	14
<i>Obrázek 2: Ukázka měřicího systému s využitím LabVIEW – blokový diagram [2]</i>	16
<i>Obrázek 3: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – určení odporu vinutí [2]</i>	17
<i>Obrázek 4: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – zkouška nakrátko [2]</i>	18
<i>Obrázek 5: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – zkouška naprázdno [2]</i>	18
<i>Obrázek 6: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – vyhodnocení náhradního zapojení [2]</i>	18
<i>Obrázek 7: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – vlastnosti náhradního zapojení [2]</i>	19
<i>Obrázek 8: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – reálná zatěžovací charakteristika [2]</i>	19
<i>Obrázek 9: Názorná ukázka Front Panelu</i>	21
<i>Obrázek 10: Názorná ukázka Block Diagramu</i>	21
<i>Obrázek 11: Struktura While</i>	22
<i>Obrázek 12: Ukázka case struktury - přepínání funkcí sčítání a odčítání</i>	22
<i>Obrázek 13: Struktura Event</i>	23
<i>Obrázek 14: Ukázka struktury Flat Sequence s postupným rozsvěčováním kontrollek</i>	23
<i>Obrázek 15: DAQ Assistant</i>	23
<i>Obrázek 16: DAQ systém</i>	24
<i>Obrázek 17: Rozdělení ztrát v typickém 4 kW dvoupólovém asynchronním motoru [11]</i>	25
<i>Obrázek 18: Měrné ztráty v železe v závislosti na magnetické indukci při $f=50$ Hz [11]</i>	27
<i>Obrázek 19: Hysterezní ztráty. (a) celková hysterezní smyčka, (b) akumulovaná energie v magnetickém obvodu, (c) odevzdaná energie zpět do zdroje [11]</i>	27
<i>Obrázek 20: Vznik vířivého proudu uvnitř elektricky vodivého materiálu [14]</i>	28
<i>Obrázek 21: Vířivé proudy v jednom plátu transformátorového plechu [11]</i>	29
<i>Obrázek 22: Rozdělení ztrát naprázdno [10]</i>	35
<i>Obrázek 23: Určení mechanických ztrát z měření naprázdno [16]</i>	35
<i>Obrázek 24: Aaronovo zapojení wattmetrů [18]</i>	38
<i>Obrázek 25: Aaronovo zapojení wattmetrů: fázorový diagram</i>	39
<i>Obrázek 26: Front Panel vytvořeného měřicího programu</i>	40
<i>Obrázek 27: Dialogové okno při nedefinovaném souboru</i>	41
<i>Obrázek 28: Karta zatěžovací zkoušky</i>	42
<i>Obrázek 29: Karta zkoušky naprázdno</i>	42
<i>Obrázek 30: Karta zkoušky naprázdno</i>	42
<i>Obrázek 31: Karta oteplovací zkoušky</i>	42



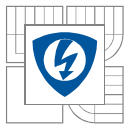
<i>Obrázek 32: Blokový diagram měřicího programu</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 33: Blokový diagram měřicího programu: levá polovina</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 34: Blokový diagram měřicího programu: pravá polovina</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 35: SubVI pro simulaci signálů</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 36: SubVI pro měření příkonu</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 37: SubVI pro sledování ustálení signálů - AND člen</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 38: SubVI pro sledování ustálení signálu</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 39: Vysvětlení principu sledování ustálení signálu</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 40: Úprava datových formátů</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 41: Case struktury pro ukládání bodů charakteristik</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 42: Závislost subdiagramů Case struktur při zápisu bodů charakteristik</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 43: Mazání posledního řádku měřené charakteristiky</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 44: Určení počtu změřených bodů charakteristik</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 45: Case struktura k aktivaci automatického ukládání</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 46: SubVI pro měření času intervalu automatického ukládání</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 47: Case struktura pro měření času oteplovací zkoušky</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 48: Ukládání průběhů napětí a proudu pomocí Event struktury</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 49: Schéma zapojení měřicího pracoviště</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 50: Měřicí pracoviště</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 51: Rozmístění měřených bodů při oteplovací zkoušce</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 52: Oteplovací charakteristika motoru EMP Slavkov TM2 100 4L</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 53: Určení mechanických ztrát motoru T22VT512</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 54: Rozdělení ztrát naprázdno motoru T22VT512</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 55: Ztráty motoru T22VT512 v závislosti na zatížení</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 56: Procentuální rozdělení ztrát při jmenovitém zatěžovacím momentu</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 57: Závislost účinnosti a účinníku na zatížení motoru T22VT512</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 58: Závislost otáček a odebíraného proudu na zatížení motoru T22VT512</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 59: Závislost proudu na napětí nakrátko motoru T22VT512</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 60: Závislost relativních chyb na odebíraném proudu při napětí $U = 400\text{ V}$</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 61: Relativní chyby naměřených a vypočítaných veličin v měření naprázdno při jmenovitém napětí $U = 400\text{ V}$</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 62: Relativní chyby naměřených a vypočítaných veličin při jmenovitém zatížení</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 63: RMxpert: Zadané parametry v šabloně Machine</i>	<i>62</i>



<i>Obrázek 64: RMxpřt: Rozložení statorového vinutí</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 65: RMxpřt: Nastavení parametrů výpočtu</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 66: RMxpřt: Definování vlastností plechů M700-50A. a) Hlavní okno b) $B=(H)$ křivka c) $B=f(P)$ křivka.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 67: Srovnání RMxpřt s měřením: závislost účinnosti na výkonu.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 68: Srovnání RMxpřt s měřením: závislost odebíraného proudu na výkonu.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 69: Srovnání RMxpřt s měřením: momentová charakteristika</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 70: Nastavená mesh - celkový pohled a detail v okolí vzduchové mezery.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 71: Maxwell 2D: Průběhy statorových proudů</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 72: Maxwell 2D: Rozložení magnetické indukce</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 73: Maxwell 2D: Rozložení magnetické indukce - detail</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 74: Maxwell 2D: Rozložení měrných ztrát v železe</i>	<i>72</i>

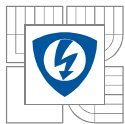
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Empiricky zjištěné konstanty pro výpočet ventilačních ztrát [1]</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 2: Dodatečné ztráty v procentech příkonu motoru [11]</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 3: Základní metody zkoušek účinnosti [16].....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 4: Jmenovité parametry motoru T22VT512</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 5: Základní parametry měřicí karty NI 9239 [19]</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 6: Základní parametry proudového čidla LEM IT 60-S [20].....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 7: Naměřené hodnoty odporů.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 8: Naměřené a vypočítané hodnoty z měření naprázdno motoru T22VT512.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 9: Naměřené a vypočítané hodnoty zatěžovací zkoušky motoru T22VT512</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 10: Naměřené a vypočtené hodnoty zkoušky nakrátko motoru T22VT512</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 11: Srovnání RMxpřt s měřením: stav naprázdno</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 12: Srovnání RMxpřt s měřením: jmenovité zatížení</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 13: Srovnání Maxwell 2D s měřením: jmenovité zatížení.....</i>	<i>69</i>

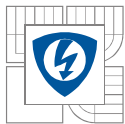


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	Magnetická indukce	T
B_m	Amplituda magnetické indukce	T
$\cos\varphi$	Účinník	-
D_r	Průměr rotoru	m
f	Frekvence napájecího napětí	Hz
f_p	Frekvence pulsací magnetického pole ve vzduchové mezeře	Hz
i	Okamžitá hodnota proudu	A
I_{avg}	Průměrná hodnota fázových proudů	A
I_B	Proud kartáčem	A
I_f	Efektivní hodnota fázového proudu	A
I_z	Rozběhový proud	A
k_R	Koeficient vlivu skin efektu	-
l_{AV}	Střední délka vodiče jednoho závitu vinutí	m
l_r	Délka rotoru	m
m	Počet fází	-
M	Moment	Nm
m_{Cu}	Hmotnost vodičů	Kg
N	Počet závitů	-
p	Okamžitá hodnota výkonu	W
P. B.	Power Balance	%
P_0	Činný příkon naprázdno	W
P_1	Příkon	W
P_2	Výkon	W
P_δ	Výkon přenášený přes vzduchovou mezeru	W
Q	Počet drážek	-
Q_0	Jalový příkon naprázdno	VAr
R	Elektrický odpor	Ω
R_v	Odpor vinutí jedné fáze	Ω
S_0	Zdánlivý příkon naprázdno	VA
S_c	Průřez vodiče	m ²
S_g	Plocha vzduchové mezery	m ²
t	Teplota	°C
u	Okamžitá hodnota napětí	V
U_{avg}	Průměrná hodnota sdružených napětí	V
U_e	Indukované napětí	V
U_f	Efektivní hodnota fázového napětí	V
U_k	Úbytek napětí na kartáčích	V
V	Objem	m ³



v_r	Povrchová rychlost rotoru	m/s
W_H	Hysterezní ztrátová energie	J
ΔP	Celkové ztráty	W
ΔP_j	Ztráty v odporu vinutí (Jouleovy ztráty)	W
ΔP_B	Ztráty na kartáčích	W
ΔP_e	Vířivé ztráty	W
ΔP_{e2rot}	Povrchové ztráty v rotoru	W
ΔP_{e2stat}	Povrchové ztráty ve statoru	W
ΔP_{e3rot}	Pulsní ztráty v rotoru	W
ΔP_{e3stat}	Pulsní ztráty ve statoru	W
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe	W
ΔP_h	Hysterezní ztráty	W
ΔP_k	Konstantní ztráty	W
ΔP_{LL}	Dodatečné ztráty při zatížení	W
ΔP_m	Mechanické ztráty	W
$\Delta P_{m,b}$	Ztráty v ložiscích	W
$\Delta P_{m,w}$	Ventilační ztráty rotoru	W
ΔP_r	Ztráty ve vinutí rotoru	W
ΔP_s	Ztráty ve vinutí statoru	W
ΔP_{pw1}	Ventilační ztráty ve vzduchové mezeře	W
ΔP_{pw2}	Ventilační ztráty na koncích rotoru	W
$\Delta \vartheta$	Oteplení	°C
η	Účinnost	-, %
ρ	Měrný elektrický odpor	Ω/m
ρ_m	Hustota materiálu	Kg/m^2
τ_d	Drážková rozteč	m
τ_p	Pólová rozteč	m
Φ	Magnetický tok	Wb
φ	Fázový posun	°
Ω	Úhlová rychlost hřídele	rad/s
ω	Úhlová rychlost	rad/s
σ	Měrná elektrická vodivost	S/m



ÚVOD

Automatizované měření v dnešní době zaujímá široké uplatnění jak v průmyslu, tak ve vědních oborech. Při zkoumání vlastností měřených objektů může využitím automatizovaného měření dojít k úspoře času vlivem zautomatizování typických úkonů při provádění měření.

V této práci je představen automatizovaný měřicí systém pro provádění zkoušek asynchronních strojů za účelem analýzy ztrát a získání charakteristik popisující vlastnosti asynchronního stroje. Algoritmus měřicího systému je v této práci vytvořen pomocí vývojového prostředí LabVIEW. LabVIEW představuje velice silný nástroj pro jakoukoliv řídicí, testovací a měřicí aplikaci. Programování je v LabVIEW prováděno pomocí tzv. grafického jazyka, což je hlavní výhodou programování v tomto vývojovém prostředí. Grafický jazyk umožňuje rychlé a efektivní vytvoření algoritmů spolu s nadefinováním uživatelského prostředí, které je možné maximálně přizpůsobit konkrétní aplikaci. Pro získávání dat jsou použita DAQ zařízení, která v dnešní představují zásuvné karty komunikujících s počítačem pomocí systémových konektorů.

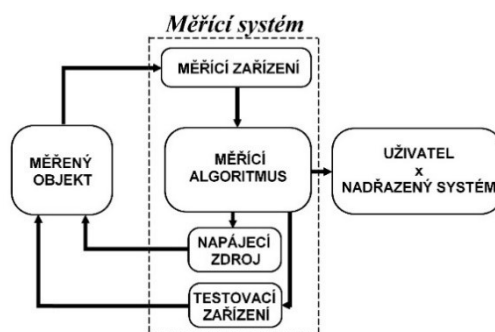
Důvodem uzpůsobení navrhnutého měřicího systému pro měření asynchronních motorů je hojné využití tohoto typu motoru. Asynchronní motory patří mezi nejrozšířenější elektrické stroje díky spolehlivé a jednoduché konstrukci, z čehož plynou i poměrně nízké náklady na výrobu asynchronních motorů. Z elektrického hlediska přispívá jeho velkému využití rozvoj frekvenčních měničů, oproti dobám minulým. Z důvodu velkého využití těchto motorů, jsou výrobci asynchronních strojů vlivem směrnic Evropské unie nuceni zvyšovat jejich účinnost. Vytvořený měřicí systém je v této práci uzpůsoben právě pro vykonávání zkoušek asynchronního stroje za účelem analýzy ztrát, které přímo ovlivňují účinnost stroje.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

V této úvodní kapitole je nejprve pojednáno o možnostech využití automatizovaných měření pro zkoušky asynchronních strojů. Jelikož cílem této práce je vytvoření programu pro měření ztrát na asynchronním stroji, je v této kapitole popsáno použité vývojové programovací prostředí LabVIEW. Dále je proveden teoretický rozbor ztrát v elektrickém stroji, provádění zkoušek asynchronních strojů a způsobu měření činného příkonu použitého ve vytvořeném programu.

1.1 Využití automatizovaných měření

Automatizované měření představuje v ideálním případě proces, při kterém je využit měřicí systém, který dokáže sám na základě získaných dat (naměřené veličiny) vyhodnotit chování měřeného objektu. U takového systému již není uživatelsky nutné výstupní data dále zpracovávat, jelikož mají přímo vypovídající schopnost o chování a vlastnostech měřeného objektu.



Obrázek 1: Blokové schéma automatizovaného měření

Při návrhu systému pro automatizované měření je nutné zvážit, zda systém bude sloužit pouze pro testovací měření, nebo jako měřicí systém pro dlouhodobé vykonávání zkoušek a měření. Na základě této prvotní rozvahy je možné zvolit vhodné vývojové prostředí pro naprogramování algoritmu měřicího systému. S volbou vývojového prostředí je úzce spjat programovací jazyk, který může být buď klasický skriptovací jazyk nebo grafický jazyk. Jako vývojové prostředí můžeme zvolit například Octave, NI LabView, NI LabWindows CVI, Matlab, Visual Studio apod. Pro rychlá testovací měření je zbytečné vytvářet systém s uživatelským rozhraním, nicméně je nutné si uvědomit, že možnost vytvořit program s uživatelským rozhraním může zvýšit přehlednost, a tím mnohdy ušetřit mnoho času při odlaďování systému. [1]

Návrh systému pro automatizované měření je velice individuální záležitost s ohledem na druh měřeného objektu a jeho zkoumaných vlastností. V rámci této práce, která se zabývá automatizovaným měřením asynchronního motoru pomocí LabVIEW, je v následujícím textu pojednáno o možnostech a využití automatizovaných měřicích systémů elektrických strojů se zaměřením na asynchronní motor.

Vytvoření automatizovaného měřicího systému asynchronního motoru je v praxi vhodné především pro tyto rozdílné účely:

- Určení ztrát asynchronního stroje a jeho účinnosti
- Určení parametrů náhradního zapojení asynchronního stroje
- Diagnostika poruch asynchronního stroje

S rostoucími požadavky na zvýšení účinnosti všech elektrických strojů, je při návrhu a optimalizace asynchronního stroje velice důležité umět s co největší přesností určit rozložení jednotlivých ztrát v asynchronním stroji. I přes možnosti využití simulačních programů pracujících na principu metody konečných prvků, je během procesu navrhování stroje velice důležité provést měření ztrát a účinnosti na fyzickém stroji. Při návrhu stroje za pomoci výpočetních a simulačních programů je velmi obtížné zahrnout všechny faktory ovlivňující výsledné ztráty stroje a tím i jeho účinnost. Názornými automatizovanými měřicími systémy pro měření ztrát a účinnosti s využitím LabVIEW se zabývá například literatura [2], [3].

Automatizované měření asynchronního motoru v dnešní době zaujímá také důležitou roli v oblasti regulovaných pohonů s asynchronními stroji. Většina moderních pohonů s asynchronním motorem využívá vektorové řízení, které je principiálně založeno na regulaci magnetického toku v motoru. Pro tento způsob řízení je nutné znát vektory magnetických toků v rotoru nebo statoru. Je zřejmé, že tyto toky nelze přímo identifikovat a jsou v těchto moderních pohonech získávány pomocí rekonstrukce na základě znalostí parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru. Při použití různých motorů pro konkrétní měnič je výhodné, aby použitý měnič dokázal identifikovat parametry sám, bez nutnosti určování parametrů externími měřicími zařízeními. V odborné literatuře, zabývající se metodami automatické identifikace parametrů, se můžeme setkat s pojmem “auto-commissioning“, což v překladu v oblasti řízení asynchronních strojů znamená automatické uvedení pohonu do provozu. [4], [5]

Určováním parametrů je možné provést klasickou metodou, která zahrnuje měření statorového odporu (např. pomocí stejnosměrného napětí), zkouškou naprázdno a nakrátko. Tyto klasické metody mají při aplikaci do automatického měření parametrů asynchronního stroje jisté nevýhody. Při zkoušce nakrátko musí být motor externě mechanicky zabrzděn, a naopak při zkoušce naprázdno musí být hřídel rotoru bez zátěže. Ve většině případů, kdy je motor již mechanicky připojen k zátěži, není možné v rámci pohonu určit parametry pomocí těchto klasických metod. Klasická metoda má také jisté nevýhody v přesnosti určení parametrů. Například při určování odporu rotorového vinutí klasická metoda zanedbává vliv skinefektu v rotorových tyčích. Při zkoušce nakrátko se rovná skluzová frekvence frekvenci napájecího napětí. Proud v rotoru má tedy frekvenci napájecího napětí, což nikdy při normálním provozu nenastává. S rostoucí frekvencí se vlivem skinefektu snižuje efektivní průřez vodiče, a díky tomu úměrně roste odpor rotorových tyčí. Další nevýhodou je zanedbání vlivu ztrát naprázdno při určování magnetizační indukčnosti ze zkoušky naprázdno, což může způsobit až 5% chybu hodnoty magnetizační indukčnosti. Tyto chyby způsobují nelinearitu náhradního obvodu, která má nežádoucí vliv na přesnost regulace pohonu. O nevýhodách použití klasické metody v automatizovaném měření parametrů je pojednáno v [4]. Názorné ukázky možných metod automatizovaného měření parametrů pro aplikaci v komerčně vyráběných měničích jsou v literaturách [4] a [5]. Metody se snaží také na základě předpokladů ve výpočtu parametrů maximálně odstranit nelinearity, které mohou při automatickém měření vznikat, například nelinearita vlivem deadtime offsetu měniče apod. Tyto metody je nutné chápat jako naprogramovaný algoritmus v řídicím procesoru frekvenčního měniče.

Použití automatizovaného měření může být také vhodné v oblasti diagnostikování poruch asynchronních motorů. Diagnostika asynchronních motorů je obor, který je rozvíjený na základě požadavků na bezpečný a bezporuchový provoz asynchronních motorů. Jedná se tedy o včasné odhalení poruch asynchronních motorů, dříve než dojde k nečekaným selháním pohonných

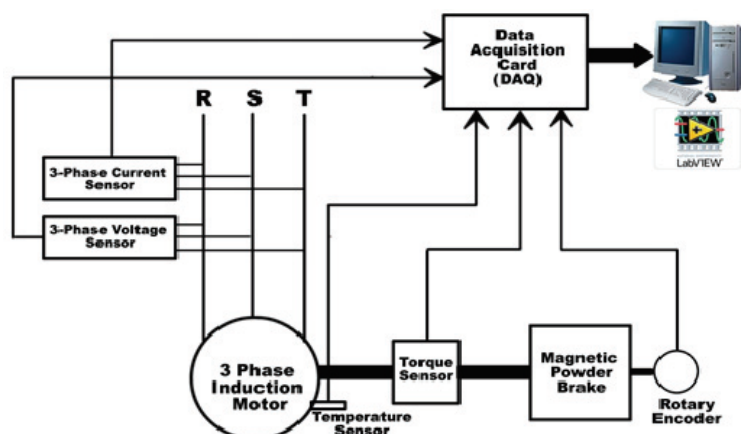
jednotek. Diagnostika poruch asynchronního motoru může být prováděna různými metodami a kombinacemi mezi nimi. V praxi se nejčastěji můžeme setkat s diagnostikou založenou na analýze vibrací motoru, dále s metodami založenými na jiném fyzikálním principu: měření statorových proudů, teplot a rozptylových magnetických toků. S ohledem na snadnou použitelnost a cenovou nenáročnost elektronických prvků, se v dnešní době klade důraz na vyhodnocování poruch z měřených elektrických veličin. V těchto aplikacích je také důležité včasné odhalení poruch na základě charakteristických jevů předpovídající konkrétní poruchu. Pro včasné odhalení poruch hraje důležitou roli citlivost, robustnost a způsob použití diagnostických algoritmů. [6]

Jako automatizované měření poruch asynchronních motorů lze považovat tzv. diagnostiku on-line, kde jsou data o stavu diagnostikovaného motoru snímána kontinuálně nebo periodicky v krátkých časových intervalech. Dochází k okamžitému zpracování a vyhodnocování dat. Tato diagnostika pracuje zcela bez zásahu obsluhy. Obsluha dostává pouze finální informace o výsledné diagnóze. [6]

Diagnostikou online se zabývá například literatura [7], která popisuje měřicí systém pro online diagnózu poruch asynchronního stroje pomocí frekvenčního spektra měřeného statorového proudu. Poruchy jsou diagnostikovány na základě charakteristických frekvenčních spekter jednotlivých poruch. Programová část měřicího systému je vytvořena v prostředí LabVIEW.

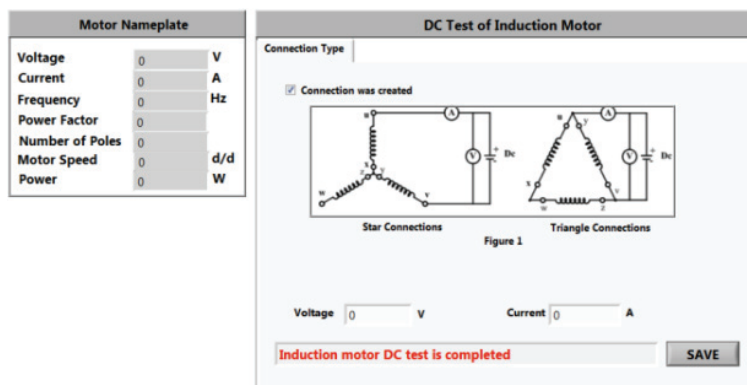
Jeden z dalších způsobů diagnózy poruch asynchronního stroje je Parkova transformace, kdy je třífázový systém napětí a proudů statoru převeden na systém ortogonální, který vytváří za ideálních podmínek kruhovitý tvar. V kruhovém obrazci se každá porucha motoru projeví v podobě nesymetrie. Názorná ukázka tohoto diagnostikujícího systému je vysvětlena v literatuře [8]. V [8] je využito vývojového prostředí LabVIEW k vytvoření programu pro diagnózu i k simulaci asynchronního stroje a jeho poruch.

Pro názornou ukázkou je vhodné uvést příklad jednoho ze systémů s využitím programovacího prostředí LabVIEW. V literatuře [2] je představen automatizovaný laboratorní měřicí systém, který slouží především k určení parametrů náhradního zapojení asynchronního stroje a zatěžovací charakteristiky. Blokové schéma tohoto měřicího systému je zobrazeno na Obrázku 2.



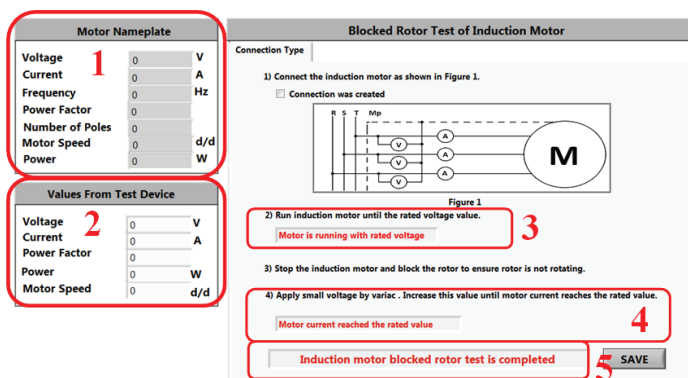
Obrázek 2: Ukázka měřicího systému s využitím LabVIEW – blokový diagram [2]

Pro získávání signálů napětí a proudu je systém vybaven napěťovými transformátory a proudovými čidly. Převod napětí a proudu na signály s nižší hodnotou amplitudy je nutný z důvodu využití DAQ karet, které mají omezený napěťový rozsah. Výstupní informace měřeného motoru – moment a otáčky, jsou získány pomocí dynamometru a inkrementálního enkodéru. Informace o teplotě jsou získány pomocí teplotního čidla. Všechny měřené informace jsou v podobě analogových napěťových signálů převedeny pomocí DAQ karet na digitální signál se vzorkovací frekvencí 6 kHz. Digitální signály jsou následně načteny do počítače s měřicím algoritmem vytvořeném ve vývojovém prostředí LabVIEW. Program tohoto systému je uzpůsoben k provádění zkoušek za účelem měření odporu statorového vinutí, měření naprázdno, měření nakrátko, výpočtu parametrů náhradního zapojení a měření zatěžovací charakteristiky. Naměřená data program sám zpracuje a uživatel má tak přístup k již výsledným hodnotám a charakteristikám definující vlastnosti měřeného stroje. Před prováděním zkoušek pomocí tohoto programu je nutno zadat nejprve štitkové parametry stroje. K měření odporu statorového vinutí je uzpůsobeno uživatelské prostředí na Obrázku 3.



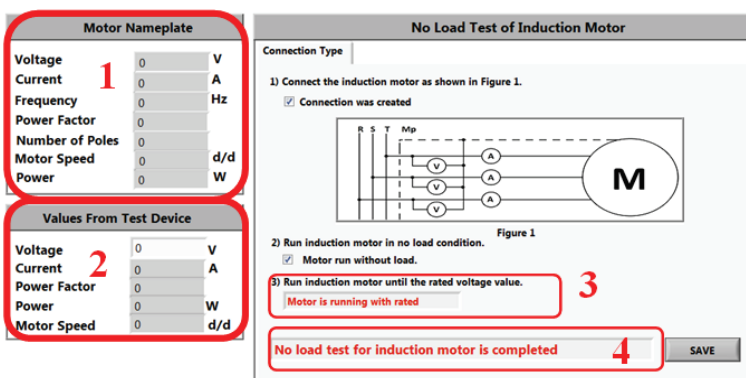
Obrázek 3: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – určení odporu vinutí [2]

K měření odporu statorového vinutí dochází pomocí stejnosměrného napětí mezi dvěma svorkami vinutí statoru. Výsledný odpor statorového vinutí je vypočítán jako podíl svorkového napětí a změřeného proudu (výsledný odpor je podělen dvěma, z důvodu určení odporu pro jednu fázi). K měření a výpočtu dochází automaticky po dosažení definované hodnoty napětí v programu. Program také do výpočtu sám zahrnuje násobení odporu konstantou zahrnující vliv skinefektu. Pro měření zkoušky nakrátko slouží okno programu zobrazené na Obrázku 4. Hřídel rotoru je nutno při zkoušce nakrátko zabrzdit. Následně dochází ke zvyšování svorkového napětí statorového vinutí pomocí autotransformátoru do hodnoty, kdy se proud odebíraný motorem rovná jmenovité hodnotě proudu. Po dosažení jmenovité hodnoty proudu dochází automaticky k změření napětí, proudu, výkonu a fázového posunu mezi napětím a proudem určujícího účinník stroje.



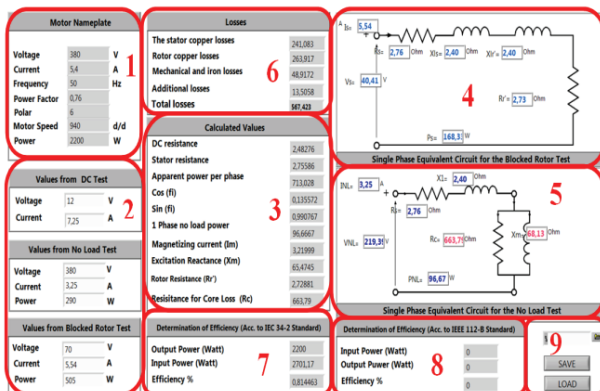
Obrázek 4: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – zkouška nakrátko [2]

Zkouška naprázdno je provedena za pomoci programového okna na Obrázku 5. Napětí satorového vinutí je zvyšováno pomocí autotransformátoru na hodnotu jmenovitého napětí motoru. Program opět automaticky ukládá hodnoty napětí, proudů, výkonu a fázového posunu.



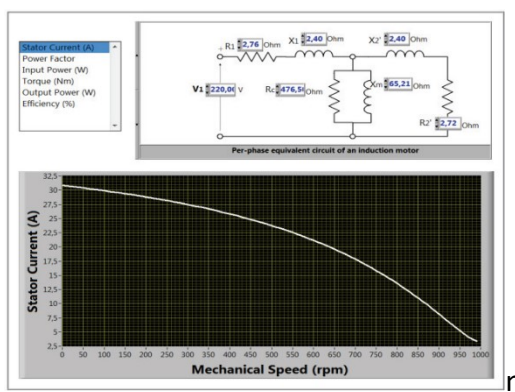
Obrázek 5: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – zkouška naprázdno [2]

Parametry náhradního zapojení motoru jsou vypočítány na základě zkoušek nakrátko a naprázdno spolu se zkouškou pro určení odporu satorového vinutí pomocí stejnosměrného napětí. Určení parametrů je provedeno pomocí zjednodušujících předpokladů v náhradním zapojení, které umožňují zanedbat při zkoušce naprázdno podélnou větev a při zkoušce nakrátko příčnou větev náhradního zapojení. Výpočetní algoritmus programu pro učení parametrů náhradního zapojení je prováděn s ohledem na doporučení normy IEEE 112. Okno uživatelského rozhraní pro vyhodnocení parametrů náhradního zapojení je zobrazeno na Obrázku 6. [2]

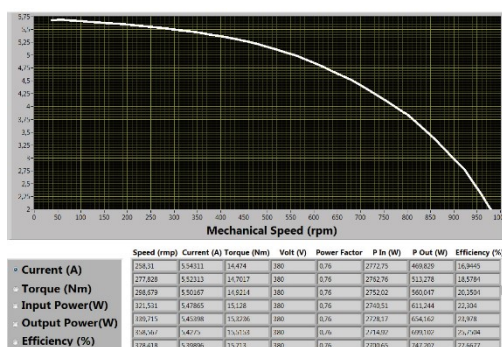


Obrázek 6: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – vyhodnocení náhradního zapojení [2]

Program tohoto systému umožňuje grafické vyhodnocení vlastností stroje dvěma způsoby. První způsob je vyhodnocení na základě změřeného náhradního zapojení asynchronního motoru, viz Obrázek 7. Zatěžovací charakteristika je v tomto případě vypočítána z náhradního zapojení. Druhou možností je grafické vyhodnocení na základě reálné změřené zatěžovací charakteristiky, viz obrázek 8. Reálná zatěžovací charakteristika je měřena zatěžováním od nulové hodnoty do hodnoty 125 % jmenovité hodnoty zatěžovacího momentu. Jednotlivé body jsou ukládány v podobě řádků do tabulkového souboru. U obou případů je možné volit mezi několika typy zatěžovací charakteristiky ($I = f(n)$, $\cos\phi = f(n)$, $P_1 = f(n)$, $P_2 = f(n)$, $M = f(n)$, $\eta = f(n)$).



Obrázek 7: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – vlastnosti náhradního zapojení [2]



Obrázek 8: Ukázka měřicího systému s LabVIEW – reálná zatěžovací charakteristika [2]

Určení fázového posunu je v programu provedeno pomocí zjištěného časového posunu mezi signály napětí a proudu pomocí naprogramovaného komparátoru a následnému přepočtu podle vzorce

$$\text{Fázový posun} = \frac{\text{doba pulzu výstupu komparátoru}}{\text{doba jedné periody}} 360. \quad (1)$$

Na základě znalosti fázového posunu je vypočítán účinník $\cos\phi$, s pomocí kterého je vypočítán činný příkon podle

$$P_1 = 3U_f I_f \cos\phi. \quad (2)$$

Výstupní výkon měřeného stroje je vypočítán pomocí součinu úhlové rychlosti a zatěžovacího momentu stroje. Veličiny rychlost otáček a moment jsou získány v programu převedením napěťových signálů inkrementálního snímače a dynamometru pomocí vytvořených funkcí kalibračních převodů. [2]

1.1.1 Vývojové prostředí LabVIEW

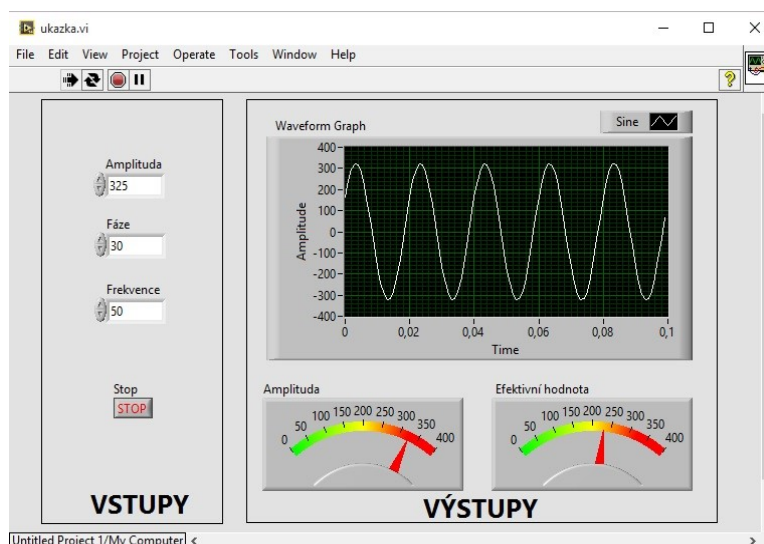
Program LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) představuje programovací a vývojové prostředí vytvořené americkou firmou National Instruments (NI), která je průkopníkem a největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace. Prostředí LabVIEW je koncipováno na základě tzv. G-jazyka (grafický jazyk). Programování systémů pomocí LabVIEW je vhodné pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů, ale také i pro naprogramování složitějších řídicích systémů v robotice. Cílem virtuální instrumentace je dočasné nebo i trvalé nahrazení prostorově, finančně a mnohdy i časově náročných hardwarových zařízení virtuálními prostředky. Takové řešení umožňuje rychlé navrhování nových aplikací, především díky možnosti operativního provádění změn při vývoji. [9]

Oproti klasickým programovacím jazykům, kde je program vykonáván postupným čtením řádků, je vykonávání programu v LabVIEW řízeno datovým tokem. Jedná se o tzv. řízený tok (Control Flow), kde jsou jednotlivé části programu řazeny sekvenčně a datový tok tak jednoznačně určuje směr provádění programu. Zpracování dat je prováděno jen tehdy, pokud jsou na vstupech jednotlivých uzlů blokového diagramu všechny potřebné informace k jeho vykonání. Po ukončení zpracování dat má uzel na výstupu zpracovaná data, která mohou sloužit jako vstup pro další uzel. [9]

Pracovní prostředí je tvořeno dvěma asociovanými okny:

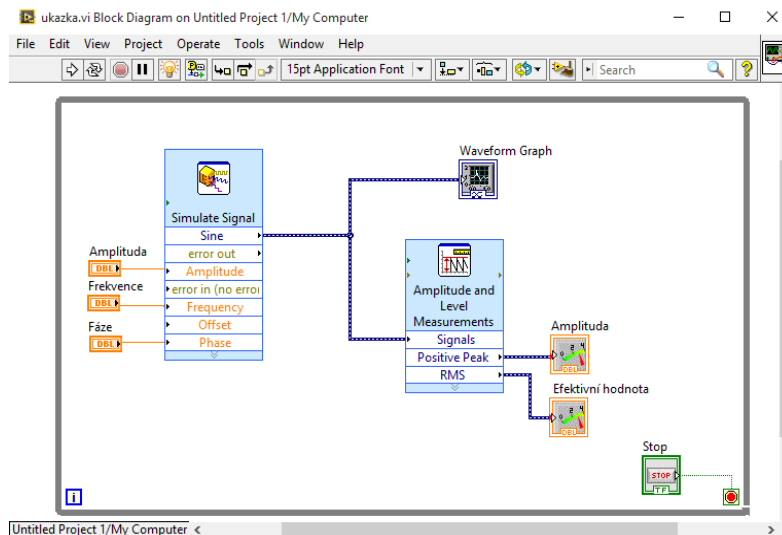
- uživatelské rozhraní - Front Panel
- blokový diagram – Block Diagram

Front panel neboli čelní panel (Obrázek 9), vytváří vnější vzhled uživatelského rozhraní. Pomocí čelního panelu může uživatel řídit běh aplikace, zadávat parametry a získávat informace o zpracovaných výsledcích. Upravováním jednotlivých prvků čelního panelu lze dosáhnout maximálního vzhledového přizpůsobení pro danou aplikaci. Prvky se dělí na vstupy a výstupy. Vstupy mohou mít podobu ovladačů (Control), mezi které patří například otočný knoflík (Knob), posuvný ovladač (Slide), textový ovladač (Text Control) a číselný ovladač (Numeric Control). Výstupní prvky mohou mít podobu různých zobrazovačů (Indicator), jako je například textový nebo číselný zobrazovač (Text Indicator, Numeric Indicator), kontrolka (LED), ručkové měřidlo (Meter), proužkový diagram (Progressbar), různé typy grafů apod. Pomocí nástrojové lišty čelního panelu je možné program ovládat tlačítka Run – spuštění jednoho cyklu programu, Run Continuously – opakovaný běh programu, Pause – pozastavení spuštěného programu, Abort Execution – zastavení programu a nastavení ovládacích prvků nástrojové lišty do výchozího stavu. Pokud se v programu vyskytne chyba, tlačítko Run se změní na Broken run. Broken Run slouží k zobrazení Error Listu s popisem chyby. [9]



Obrázek 9: Názorná ukázka Front Panelu

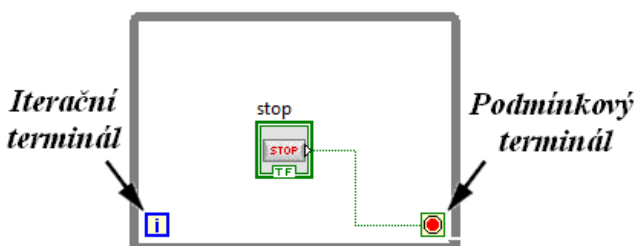
Block Diagram (Obrázek 10) slouží k definování vlastního algoritmu programu, pomocí kterého dochází k propojení prvků Front panelu a definuje jejich funkci. Prvky blokového diagramu se dělí na řídicí terminály (vstupy), zobrazovací terminály (výstupy) a uzly. Program LabVIEW rozlišuje tři typy uzlů, kterými jsou funkce, SubVI a struktury. Funkce slouží k provádění základních operací (sčítání, boolean funkce apod.), SubVI je podprogram jiného programu a strukturami lze řídit průběh programu (smýčka For, While apod.). Nástrojová lišta blokového programu obsahuje kromě základních tlačítek (Run, Run Continuously, Abort Execution, Broken Run, Pause) další tlačítka pro ladění programu pomocí krokování. [9]



Obrázek 10: Názorná ukázka Block Diagramu

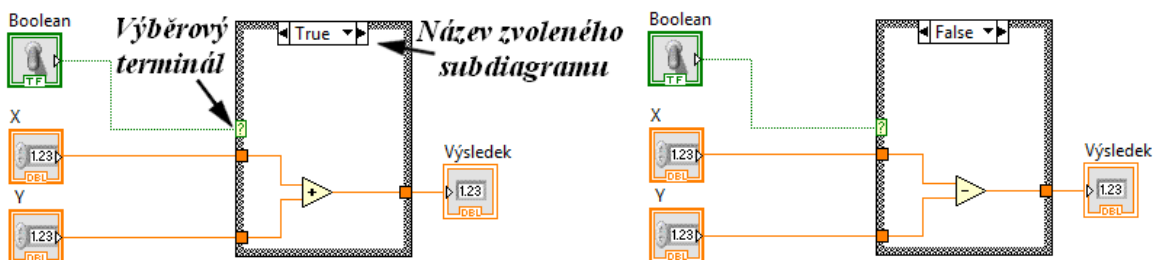
Pro názornost je vhodné představit základní prvky prostředí LabVIEW.

While struktura slouží k vytvoření opakovacího algoritmu, který probíhá do té doby, dokud nedojde k určité podmínce. Podmínka u této smyčky znamená přivedení TRUE nebo FALSE hodnoty na podmínkový terminál. Zvolení hodnoty TRUE nebo FALSE závisí na nastavení smyčky. Smyčka While může být nastavena na podmínky Stop If True nebo Continue if True. Iterační terminál počítá doposud vykonané cykly, viz Obrázek 11. Tuto smyčku lze doplnit o posuvný registr (Shift Register). Posuvný registr přenáší hodnoty z jednoho cyklu smyčky do následujícího. Smyčka While proběhne vždy alespoň jednou. [9]



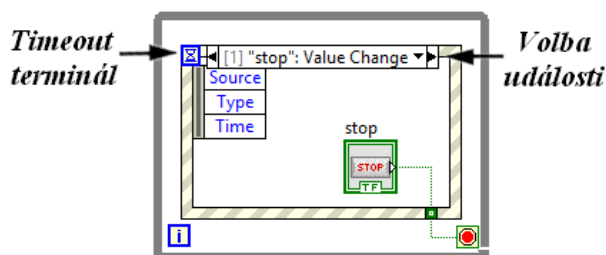
Obrázek 11: Struktura While

Struktura Case (Obrázek 12) je vhodná pro případy, kdy je potřeba pracovat s větvením programu. Tato struktura představuje soubor subdiagramů, které je možné spouštět pomocí podmiňovací řídicích signálu přivedením na výběrový terminál. Řídicím signálem může být boolean hodnota (TRUE, FALSE), nebo číselné a znakové signály. Pro každý okamžik je možné vykonávat pouze jeden subdiagram podmíněný příslušným řídicím signálem. [9]



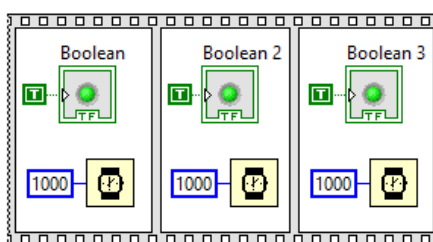
Obrázek 12: Ukázka case struktury - přepínání funkcí sčítání a odčítání

Event struktura (Obrázek 13) má jeden nebo více subdiagramů, které nejsou načítány do doby, dokud nedojde k vyvolání definovanou podmínkou. Vyvolávací podmínkou může být změna boolean hodnoty tlačítka Button, kliknutí myši, posunutí myši, posunutí scrolovacího tlačítka atd. Pomocí jedné podmínky pro vyvolání události lze spustit více událostí, ale v každém okamžiku může probíhat právě jen jedna. Pro zpracování více událostí je nutné Event strukturu umístit do While smyčky. [9]



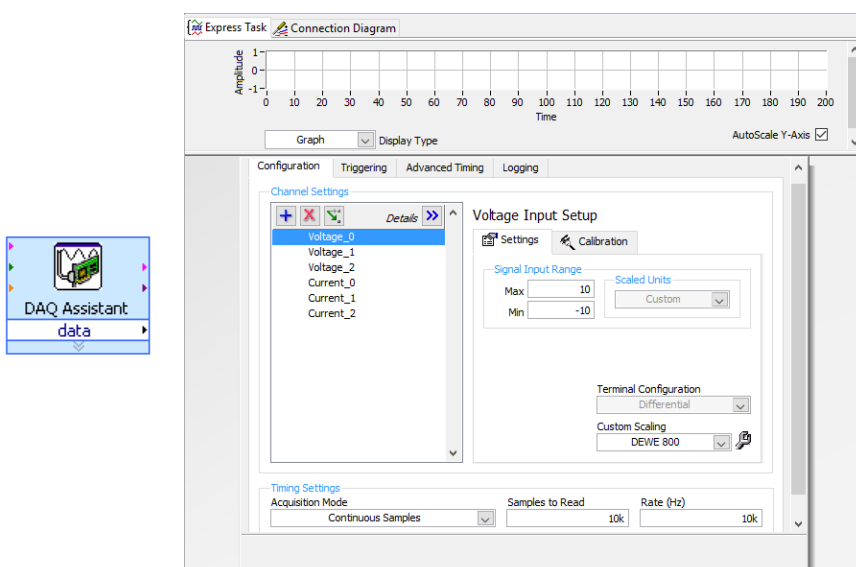
Obrázek 13: Struktura Event

Flat Sequence (Obrázek 14) struktura slouží k postupnému načítání programu v jednotlivých oknech subdiagramů. Načítání oken probíhá zleva doprava. Data opustí jednotlivé okno po vykonání svého programu, neboli výstup jednoho okna ovlivňuje vstup následujícího. [9]



Obrázek 14: Ukázka struktury Flat Sequence s postupným rozsvěcováním kontrolkek

Blok **DAQ Assistant** slouží ke generování a získávání signálů pomocí externích DAQ zařízení. V tomto bloku je možné přiřadit fyzické i simulované karty do vytvářeného programu v LabVIEW. V editačním režimu je možné prohlédnout si průběh vstupních signálů, nastavovat převod signálů (např. při použití zesilovačů, bočníků apod.), popsat a barevně oddělit jednotlivé signály atd.



Obrázek 15: DAQ Assistant

DAQ – Data Acquisition, v překladu získávání dat, je souhrnný název pro měření a generování fyzikálních signálů. Moderní zařízení DAQ jsou v provedení zásuvných karet komunikující s počítačem pomocí systémových konektorů počítače, nebo externích zařízení vybavených rozhraním USB, FireWire, Ethernet apod. Pomocí DAQ systémů lze měřený signál zpracovávat a vyhodnocovat z hlediska několika informací: stavu (např. analogový signál, číslicový signál), rychlosti (např. průběh vzestupné či sestupné hrany), úrovně (např. hodnota v určitém místě průběhu), tvaru (např. průběh hrany) a frekvenčního obsahu (např. frekvenční analýza). Jednoduché blokové schéma DAQ systému je na Obrázku 16, kde snímač slouží k získávání informací z fyzikální veličiny v podobě analogového signálu (napětí, proud), který je následně převeden pomocí A/D převodníku v DAQ zařízení na digitální signál, který je dále softwarově zpracováván v počítači. [9]



Obrázek 16: DAQ systém

Pro konfiguraci DAQ zařízení v LabVIEW slouží programový nástroj **MAX**. Pomocí tohoto nástroje, je možné simulovat konkrétní DAQ zařízení bez fyzického připojení, což umožňuje otestování programu před jeho použitím.

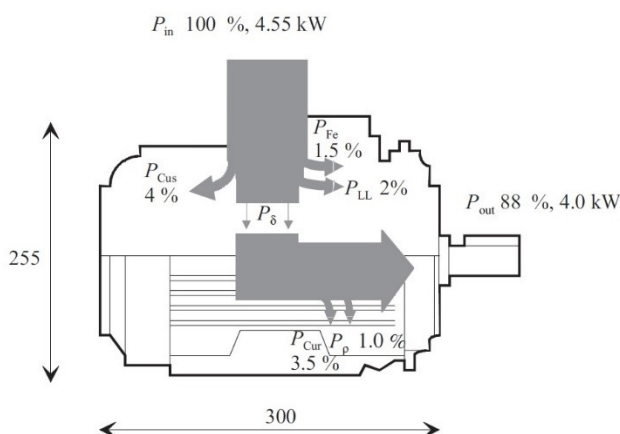
1.2 Ztráty v elektrickém stroji

Při rozboru ztrát v elektrickém stroji se zkoumá vznik ztrátové energie a její rozdělení. Ztrátová energie vyjadřuje rozdíl mezi energií vstupující (odebíraná ze zdroje) do zkoumaného stroje a užitečnou energií na jeho výstupu (přeměněná energie). Míra využití energie se v elektrickém zařízení popisuje pomocí účinnosti, která vyjadřuje poměr mezi výkonem (energie na výstupu zkoumaného zařízení) a příkonem (energie vstupující do elektrického zařízení). Účinnost je vyjádřena rovnicí

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_1 + \Delta P} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \quad [10]. \quad (3)$$

Ztráty v elektrickém stroji lze rozdělit na několik druhů, vzhledem k jejich principu vzniku:

- Ztráty v odporech vinutí statoru a rotoru
- Ztráty v železe magnetického obvodu
- Mechanické ztráty
- Dodatečné ztráty



Obrázek 17: Rozdělení ztrát v typickém 4 kW dvoupólovém asynchronním motoru [11]

Na Obrázku 17 je pro ukázkou znázorněn tok a rozdělení ztrát v typickém 4 kW asynchronním motoru. Celkem 12 % příkonu je přeměněno na tepelnou energii vlivem ztrát. Z celkových ztrát tvoří největší část ztráty ve vinutí, celkem 62,5 %, ztráty v železe 12,5 % a mechanické ztráty 8,3 %. [11]

1.2.1 Ztráty ve vinutí

Ztráty ve vinutí, nebo také jouleovy ztráty, tvoří největší část celkových ztrát. U točivých elektrických strojů tvoří 35 - 60 % celkových ztrát. Pro ztráty na odporu vinutí m-fázového stroje platí

$$\Delta P_j = m I^2 R_v, \quad (4)$$

R_v je odpor vinutí jedné fáze a I je proud odebíraný jednou fází. Pro R_v dále platí

$$R_v = k_R \frac{N l_{av}}{6 S_c}, \quad (5)$$

kde k_R je koeficient zahrnující vliv skinefektu, N počet závitů, l_{AV} střední délka vodiče jednoho závitu, S_c průřez vodiče a σ měrná elektrická vodivost. Pro celkovou hmotnost vodičů vinutí platí

$$m_{Cu} = \rho_m l_{av} S_c, \quad (6)$$

kde ρ je hustota materiálu vodiče. Vyjádřením $N l_{AV}$ z (5) a dosazením rovnice (6) do (4) získáme vztah

$$\Delta P_j = m I^2 R_v = \frac{k_R}{\rho} \frac{I^2}{S_c^2} m_{Cu} = \frac{k_R}{\rho_m \sigma} J^2 m_{Cu}, \quad (7)$$

kde J je proudová hustota. Při výpočtu účinnosti se počítá se stejnosměrným odporem vinutí a vliv skinefektu je zahrnut do dodatečných ztrát. U strojů s komutátory se do ztrát ve vinutí započítávají také ztráty na kontaktech mezi kartáči a kroužky. Úbytek napětí na komutátoru závisí na typu kartáčů, přitlačné síle a protékajícímu proudu. Pro ztráty na kartáčích komutátoru platí

$$\Delta P_B = 2 I_B U_B, \quad (8)$$

kde úbytek napětí na kartáčích U_k je tabulková hodnota příslušných kartáčů. U_k se uvažuje jako konstantní hodnota pro všechny režimy práce. [11], [12]

1.2.1.1 Vliv skinefektu na ztráty ve vinutí

Skinefekt je jev, kdy při toku střídavého proudu vodičem dochází k vytlačování proudu ze středu směrem k povrchu vodiče. Tímto jevem dochází ke zvětšení proudové hustoty v podpovrchových vrstvách, což způsobuje přehřívání. Principálně je jev možné popsat v nekonečně dlouhém vodiči následovně: Podélný pracovní proud $i(t)$ vytváří příčné magnetické pole $B(t)$, které vytvoří podélné vířivé proudy $i_v(t)$. Podélné vířivé proudy mají uprostřed opačný směr než původní proud, proto se od původního proudu $i(t)$ odečítají. Pod povrchem mají vířivé proudy stejný směr, tím pádem se přičítají – zvětšuje se proudová hustota.

Na podobném principu vzniká také tzv. proximity efekt (přibližovací jev). Proximity efekt se liší tím, že vzniká na základě interakce s okolními vodiči. Rozložení proudové hustoty ve vodiči je ovlivněno magnetickým polem všech sousedních vodičů. Tento jev je možné minimalizovat vhodným uspořádáním vodičů ve vinutí.

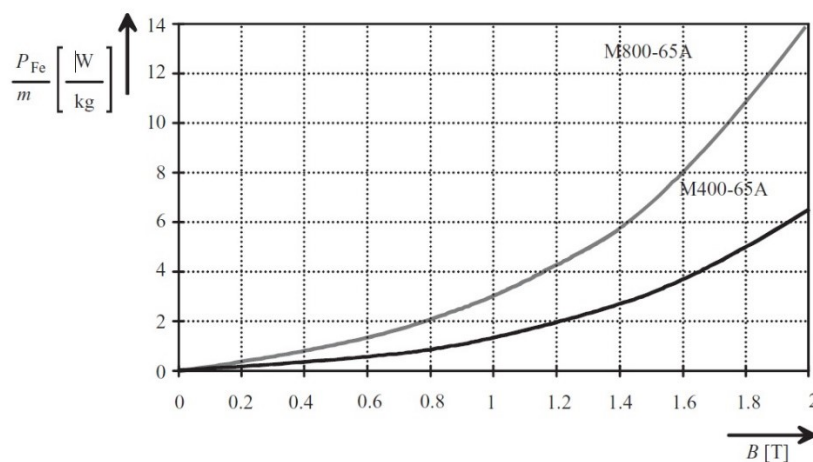
V elektrických strojích se skinefekt projevuje především v oblasti drážek, oproti koncům vinutí, kde vliv skinefektu není tak výrazný. V drážce dochází k vytlačování proudu k povrchu vlivem vyššího rozptylového toku vodiče ve spodní části drážky.

Odstranění skinefektu se docílí například rozdělením vodiče na více dílčích vodičů a jejich vzájemné prohození, použitím kroucených vodičů, prohazováním vodičů (Roebelova tyč), nebo použitím vf lanka (Litz vodič). [11]

1.2.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe se skládají ze ztrát hysterezních ΔP_h a ztrát vířivými proudy ΔP_e . Tyto ztráty jsou závislé na použitém materiálu pro magnetický obvod, tloušťce plechů, frekvenci, indukci a technologickém zpracování. Přesný výpočet ztrát v železe je proto velice obtížný. Výrobci většinou ztráty v železe nerozdělují, ale uvádějí je jako celkové měrné ztráty v železe pro jednotku objemu, tedy v W/kg v závislosti na magnetické indukci B a popřípadě jako vějířovou síť charakteristik pro různé frekvence magnetického toku. Poměr ztrát hysterezních a ztrát vířivými proudy se mění

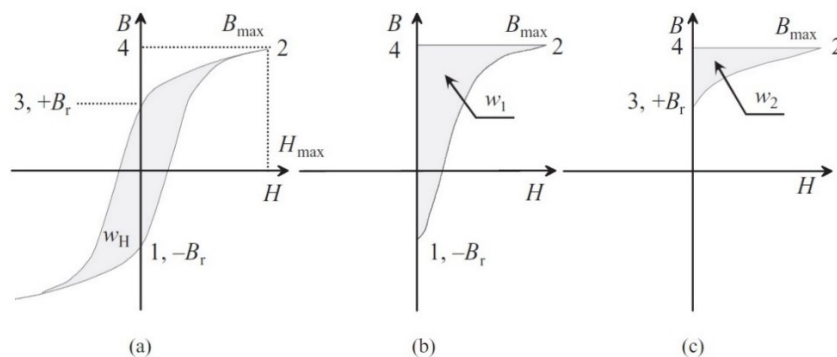
v závislosti na frekvenci. Hysterezní ztráty jsou úměrné první mocnině frekvence, ovšem ztráty vířivými proudy druhé mocnině frekvence. Při frekvenci 50 Hz ztráty hysterezní typicky zaujímají 75 % celkových ztrát v železe. Typická závislost měrných ztrát pro dva různé plechy o stejné tloušťce 0,65mm je zobrazena na Obrázku 18. [11-13]



Obrázek 18: Měrné ztráty v železe v závislosti na magnetické indukci při $f=50$ Hz [11]

1.2.2.1 Ztráty hysterezní

Magnetické jádro se magnetuje podle hysterezní smyčky na Obrázku 19a. Vlivem magnetování magneticky vodivých materiálů dochází ke vzniku ztrátové energie – hysterezní ztrátové energie, která je přeměněna na teplo. Jedná se o energii, která je spotřebována na neustálé přemagnetovávání jádra. Hysterezní ztrátová energie jednotkového objemu je přímo rovna ploše hysterezní smyčky, viz Obrázek 19a.



Obrázek 19: Hysterezní ztráty. (a) celková hysterezní smyčka, (b) akumulovaná energie v magnetickém obvodu, (c) odevzdaná energie zpět do zdroje [11]

Při pohybu po hysterezní křivce z bodu 1 do bodu 2 dochází k akumulování energie v magnetickém obvodu. Tato energie je rovna

$$w_1 = \int_{-B_r}^{B_{max}} H dB . \quad (9)$$

při pohybu po křivce $H \rightarrow 0$ se energie vrácená zpět do zdroje vyjádří jako

$$w_2 = \int_{B_{max}}^{B_r} H dB . \quad (10)$$

Celková hysterezní ztrátová energie se pro objem materiálu V vypočítá jako křivkový integrál

$$W_h = V \int H dB . \quad (11)$$

Ztrátový hysterezní činný výkon musí být definován jako střední hodnota okamžitého výkonu na opakovací periodě T , potom platí

$$\Delta P_h = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} W_H = f W_H = f V w_H . \quad (12)$$

Empiricky upravená rovnice pro hysterezní ztráty má tvar

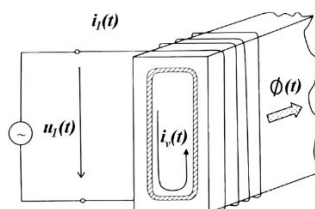
$$\Delta P_h = \eta f V B_{max}^k , \quad (13)$$

kde η je empirická konstanta a exponent k nabývá hodnot 1,5 – 2,5. [11], [14]

1.2.2.2 Ztráty vířivými proudy

Druhou podstatnou část ztrát v železe u elektrických strojů tvoří ztráty vířivými proudy. Z principiálního hlediska můžeme vznik vířivých proudů popsat pomocí principu funkce transformátoru. Na Obrázku 20 je nakresleno jádro z elektricky vodivého materiálu, na kterém je namotáno primární vinutí připojené na zdroj střídavého napětí. Uzavřená elementární proudová smyčka i_v potom představuje sekundární vinutí.

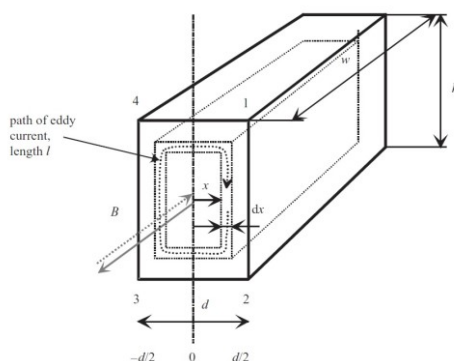
Magnetický tok tímto jádrem je úměrný integrálu napětí u_1 , který způsobí naindukování napětí v elementární ploše jádra a vyvolá tok proudu i_v . Platí zde bezpochyby Lenzův princip: Proud indukovaný v uzavřené vodivé smyčce vyvolá magnetické pole, které působí vždy proti budícímu poli, díky němuž indukovaný proud vznikl, neboli proud indukovaný v uzavřené vodivé smyčce má takový směr, že jeho magnetické pole působí proti změně magnetického toku, který je jeho příčinou. [14]



Obrázek 20: Vznik vířivého proudu uvnitř elektricky vodivého materiálu [14]

Je tedy zřejmé, že k omezení vířivých proudů by bylo vhodné sestavit magnetický obvod z elektricky nevodivého materiálu. V praxi se omezení vířivých proudů docílí sestavením magnetického obvodu ze vzájemně izolovaných plechů a přidáváním příměsí při výrobě oceli, za účelem zvýšení elektrického odporu. [14]

Pro vyjádření parametrické závislosti ztrát vířivými proudy je uvažován Obrázek 21, kde magnetické jádro představuje jeden plech magnetického obvodu.



Obrázek 21: Vířivé proudy v jednom plátu transformátorového plechu [11]

Magnetický tok v jádře je vyjádřen jako

$$\Phi = 2hx B_m, \quad (14)$$

potom na základě indukčního zákona platí pro efektivní hodnotu indukovaného napětí

$$U_e = \frac{\omega B_m}{\sqrt{2}} 2hx. \quad (15)$$

Elektrický odpor elementárního vodiče vířivého proudu lze vyjádřit pomocí vzorce

$$R = \frac{\rho l}{S} \approx \frac{2h\rho}{wdx}. \quad (16)$$

Napětí U_e způsobí tok proudu elementárním vodičem o odporu R

$$dI = \frac{U_e}{R} = \frac{\frac{\omega B_m}{\sqrt{2}} 2hx}{\frac{2h\rho}{wdx}} = \frac{2\pi f B_m w x dx}{\sqrt{2}\rho}. \quad (17)$$

Ztráty vířivými proudy závislé na diferenciálním rozměru dx jsou rovny

$$dP_e = U_e dI = \frac{(2\pi f B_m)^2 w h x^2 dx}{\rho}. \quad (18)$$

V celém plechu jsou ztráty vířivými proudy dány integrálem diferenciálních ztrát

$$\Delta P_e = \int_0^{d/2} dP_e = \frac{(2\pi f B_m)^2 w h}{\rho} \int_0^{d/2} x^2 dx. \quad (19)$$

Vyjádřením integrálu a zavedením vztahu pro objem $V = whd$, získáme vztah pro ztráty vířivými proudy v jednom plechu

$$\Delta P_v = \frac{wh\pi^2 f^2 d^3 B_m^2}{6\rho} = \frac{V\pi^2 f^2 d^2 B_m^2}{6\rho}. \quad (20)$$

Z rovnice (20) je zřejmé, že ztráty vířivými proudy jsou závislé na třetí mocnině tloušťky plechu a na druhé mocnině frekvence napájecího napětí a amplitudě magnetické indukce. Rovnice (20) také ukazuje, že ztráty vířivými proudy jsou nepřímo úměrné rezistivitě materiálu. [11]

1.2.3 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty se v točivém elektrickém stroji skládají ze ztrát třením v ložiskách, ventilačních ztrát točícího se rotoru a ventilačních ztrát chladícího ventilátoru.

Ztráty v ložiskách jsou závislé na otáčkách hřídele, typu ložisek, typu mazání a zátěži. Výpočet ztrát v ložiskách je uveden výrobcem daného ložiska. Pro ložiska SKF platí

$$\Delta P_{m,b} = 0,5\Omega\mu FD, \quad (21)$$

kde Ω je úhlová rychlost hřídele, μ koeficient tření (typicky 0,08 - 0,2 pro kluzná ocelová ložiska), F zátěž ložiska a D vnitřní průměr ložiska.

Ventilační ztráty točícího se rotoru vznikají vlivem tření mezi rotujícím povrchem rotoru a vnějším vzduchem. Tyto ztráty lze rozdělit na ztráty ve vzduchové mezeře ΔP_{pw1} a ztráty na koncích rotoru ΔP_{pw2} . Ventilační ztráty točícího se rotoru se rovnají

$$\Delta P_{m,w} = \Delta P_{m,w1} + \Delta P_{m,w2}. \quad (22)$$

Ztráty ve vzduchové mezeře je možné popsat pomocí rotujícího válce v prostoru. Vztah pro výpočet ztrát způsobených rotujícím válcem v prostoru je uveden v [11].

Konce rotoru je možné považovat za rotující disk ve volném prostoru, ovšem za předpokladu, že k rotoru není připevněn ventilátor. Vztah pro výpočet ventilačních ztrát na koncích rotoru je uveden v [11].

U strojů jejichž konstrukce se neliší od běžných typů, je možné využít pro výpočet mechanických ztrát empiricky zjištěné vzorce. Vzorce bývají vyjádřeny pro konkrétní typy a druhy konstrukčního uspořádání strojů. Literatura [11] uvádí, že je možné celkové ventilační ztráty vyjádřit pomocí vztahu

$$\Delta P_{m,w} = k_p D_r (l_r + 0,6\tau_p) v_r^2, \quad (23)$$

kde k_p je empirická konstanta z tabulky 1, D_r průměr rotoru, l_r délka rotoru, τ_p pólová rozteč a v_r povrchová rychlost rotoru. Rovnice (23) neplatí pro vysokootáčkové motory. [11]

Typ konstrukce	k_p [Ws ² /m ⁴]
TEFC motory - malé a středně velké	15
Otevřený systém chlazení - malé a středně velké	10
Velké motory	5

Tabulka 1: Empiricky zjištěné konstanty pro výpočet ventilačních ztrát [1]

1.2.4 Dodatečné ztráty

Dodatečné ztráty jsou rozdílem mezi celkovými ztrátami a součtem měřených a vypočítaných ztrát ve vinutí, v železe a mechanických ztrát. Přídavné ztráty jsou způsobené několika různými jevy a je různě obtížné je identifikovat. Některé druhy přídavných ztrát se vyskytují při chodu naprázdno, jiné zase v závislosti na zatížení. Je tedy možné tyto ztráty rozdělit na dodatečné ztráty naprázdno a dodatečné ztráty při zatížení. V Tabulce 2 jsou uvedeny předpokládané dodatečné ztráty pro jednotlivé konstrukce točivých strojů. [12]

Typ stroje	Dodatečné ztráty v procentech ze vstupního výkonu
Asynchronní motor s kotvou nakrátko	0,3 – 2 % (někdy až 5%)
Asynchronní motor s kroužkovým rotorem	0,50 %
Synchronní stroj s vyniklými póly	0,1 - 0,2 %
Synchronní stroj s hladkým rotorem	0,5 - 0,15 %
Stejnoseměrný motor bez kompenzačního vinutí	1%
Stejnoseměrný motor s kompenzačním vinutím	0,50%

Tabulka 2: Dodatečné ztráty v procentech příkonu motoru [11]

Dodatečné ztráty naprázdno

Dodateční ztráty naprázdno zahrnují povrchové a pulsní ztráty. Povrchové ztráty jsou způsobené drážkováním, které vytváří nežádoucí pulsní magnetického pole ve vzduchové mezeře. Frekvence těchto pulsní je dána počtem drážek a frekvencí otáčení

$$f_p = \frac{nQ}{60}, \quad (24)$$

kde Q je počet drážek. Změna magnetického pole těchto pulsní způsobí tok vířivých proudů v tenké povrchové vrstvě hlav zubů, které jsou příčinou povrchových ztrát. Drážkování statoru vyvolá ztráty v rotoru a naopak. Tyto ztráty vznikají ve všech točivých strojích, kde je alespoň na jedné straně vzduchové mezery uloženo vinutí pomocí drážek.

Jednotkové povrchové ztráty jsou v literatuře [12] vyjádřeny pomocí vztahů pro stator

$$\Delta p_{e2stat} = k_0 \left(\frac{Q_{rot}n}{10000} \right)^{1,5} (1000B_0\tau_{drot})^2, \quad (25)$$

a rotor

$$\Delta p_{e2rot} = k_0 \left(\frac{Q_{stat}n}{10000} \right)^{1,5} (1000B_0\tau_{dstat})^2, \quad (26)$$

kde k_0 je činitel vlivu tloušťky plechů, typu oceli a opracování povrchu, Q počet drážek, n otáčky rotoru, B_0 amplituda pulsní indukce ve vzduchové mezeře a τ_d drážková rozteč statoru a rotoru. Celkové povrchové ztráty pro danou část (rotor, stator) se vypočítají jako součin jednotkových povrchových ztrát a celkového povrchu vzduchové mezery

$$\Delta P_{e2stat,e2rot} = \Delta p_{e2stat}S_g = \Delta p_{e2rot}S_g. \quad (27)$$

Pulsní ztráty vznikají vzájemným působením drážkování statoru a rotoru. Je-li natočen zub rotoru proti zubu statoru, je magnetická vodivost vzduchové mezery maximální, ovšem je-li natočena drážka rotoru proti zubu statoru, je magnetická vodivost minimální. Vlivem pulsní magnetického pole dochází ke vzniku vířivých proudů v železe zubů. Frekvence pulsní magnetické indukce v zubech rotoru je dána zubovou frekvencí statoru a naopak, frekvence pulsní v zubech rotoru je dána zubovou frekvencí statoru. Amplituda pulsní závisí na střední hodnotě indukce v zubech, rozměrech zubů a drážek, a je určena zvlášť pro zuby statoru a rotoru. Tyto ztráty se dají vypočítat podle přibližných vztahů pro stator a rotor

$$\Delta P_{e3stat} = 0,11 \left(\frac{Q_{rot}n}{1000} B_{pstat} \right)^2 m_{zstat}, \quad (28)$$

$$\Delta P_{e3rot} = 0,11 \left(\frac{Q_{stat}n}{1000} B_{prot} \right)^2 m_{zrot}, \quad (29)$$

kde B_p je amplituda pulsací indukce v zubu statoru a rotoru, Q počet drážek, n otáčky rotoru a m_z hmotnost zubů statoru. Podrobný postup výpočtu povrchových a pulsních ztrát je uveden v [12].

Dodatečné ztráty při zatížení

Dodatečné ztráty při zatížení vznikají ve vodičích vinutí i v železe. Ve vodičích se může jednat především o vliv skinefektu, v železe se jedná o ztráty ve všech ostatních kovových konstrukčních prvcích, jako jsou nosná kostra motoru, ložiskové štíty, příruba a patky motoru. Jednotlivé dodatečné ztráty při zatížení se počítají obvykle jen u strojů velkých výkonů. U strojů pro běžné použití se tyto ztráty uvažují pouze přibližně. Podle normy IEC 60034-2-1 se dodatečné ztráty při zatížení dají určit jako

$$P_{LL} = 0,025P_{in} \text{ , pro } P_{out} \leq 1 \text{ kW} \text{ ,} \quad (30)$$

$$P_{LL} = \left[0,025 - 0,005 \log \left(\frac{P_{in}}{1 \text{ kW}} \right) \right] P_{in} \text{ , pro } 1 \text{ kW} \leq P_{out} \leq 10 \text{ kW} \quad (31)$$

$$P_{LL} = 0,005P_{in} \text{ pro } P_{out} \geq 10 \text{ kW} \text{ ,} \quad (32)$$

kde P_{in} je odebíraný příkon, a P_{out} je výstupní výkon na hřídeli. Dodatečné ztráty při zatížení jsou úměrné rozdílu druhých mocnin statorového proudu I_s a proudu naprázdno I_0 a frekvenci s exponentem 1,5, tedy podle rovnice

$$P_{LL} \sim (I_s^2 - I_0^2) f^{1,5} \text{ . [11], [12]} \quad (33)$$

1.3 Zkoušky asynchronního stroje

Prováděné zkoušky na asynchronním stroji mohou být různých typů, volba záleží především na předmětu zkoušení. Nejběžnější jsou zkoušky naprázdno, nakrátko, se zátěží, oteplovací zkouška nebo zkouška ověření izolace. Aby měly zkoušky správnou vypovídající schopnost, využívá se standardizovaných norem. Normami se zabývají dvě světové instituce IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) a IEC (International Electrotechnical Commission). V české republice se jedná o normu ČSN EN 60034-2-1 (jde o evropskou normu EN 60034-2-1), která vychází z mezinárodní normy IEC 60034-2-1. Norma IEEE je spíše rozšířená v Americe a Kanadě, kdežto IEC na evropském kontinentu. Při používání různých norem je možné dosáhnout až 5% rozdílu v účinnosti. [15]

1.3.1 Všeobecné požadavky

Pro správné měření je nutné zajistit několik základních požadavků na laboratorní prostředí, měřicí zařízení a přístroje. Zdroj musí zajistit především nezkreslený sinusový průběh napětí, kde by THD (The Harmonic Distortion) nemělo překročit 0.05, napěťová nesymetrie by neměla být větší než 0,5 % z průměrné hodnoty všech fázových napětí a frekvence by měla mít maximálně v rozmezí $\pm 0,5$ % požadované frekvence pro běžné zkoušení. Jakékoliv odchylky od požadované zkušební frekvence přímo ovlivňují účinnost měřeného stroje. [16]

Na teplotu okolí měřeného stroje je požadována teplota 25°C. Všechny zatěžující měření se provádí při provozní teplotě stroje, nebo je nutné upravit hodnoty odporů vinutí. Provozní teplota stroje je ustálená teplota stroje při jmenovité hodnotě zatížení. Provozní teplotu můžeme zjistit zahřátím stroje při jmenovitém zatížení, nebo jako udávanou teplotu izolační třídy, na kterou je stroj dimenzován (druhá možnost není akceptována při výpočtu účinnosti). [16]

Přístroje je možné volit analogové i digitální. Digitální přístroje jsou vhodnější z hlediska univerzálnosti a přizpůsobení vstupního odporu (proudové úniky u voltmetru a napěťové úbytky). Avšak vysoký vstupní odpor u digitálních měřicích přístrojů může do měření zanášet rušení. Přístroje by měly být testovány alespoň jednou do roka a neměly by překročit chybu 0,2 % z plného rozsahu při zjišťování účinností. [16]

Napětí je nutné měřit co nejbližší k svorkovnici stroje a změřené napětí se uvažuje jako průměrná hodnota všech sdružených, popřípadě fázových napětí. Proud jedné fáze se také vypočítá jako průměrná hodnota všech fází. Výkon je možné měřit dvouwattmetrovou metodou, vícefázovým wattmetrem nebo třemi jednofázovými wattmetry. Pro měření odporu je možné použít kelvinovu metodu i digitální měřiče odporů. [16]

U mechanických přístrojů měřicí otáčky a moment je nutné brát v potaz možnosti zanesení chyby mechanickými ztrátami měřicího přístroje. Tyto ztráty by měly být kompenzovány a chyba mechanického měřicího přístroje by neměla být větší jak $\pm 0,2$ % z celého rozsahu. Otáčky je vhodné měřit digitálním tachometrem. [16]

K měření teploty částí motoru je možné použít alkoholový teploměr, bodový teploměr (termočlánek, termistor), vestavěné čidlo nebo pomocí změny odporu vinutí. [16]

1.3.2 Měření a vyhodnocení ztrát

Norma IEEE 112 [16] popisuje stejné rozdělení ztrát jako je popsáno v kapitole 1.2. Jedná se tedy o identifikaci ztrát ve vinutí statoru, vinutí rotoru, ztrát v železe, mechanických ztrát (třením a ventilací).

1.3.2.1 Ztráty ve vinutí statoru

Norma IEEE 112 uvažuje pro měření ztrát ve vinutí stejnosměrný odpor (viz kapitola 1.2.1). Ztráty se určí změřením odporu vinutí a výpočtem pomocí Ohmova zákona dle vzorce

$$\Delta P_S = 3R_v I^2, \quad (34)$$

kde R_v je odpor jedné fáze. Pro některé typy zkoušek je nezbytné odpor vinutí upravit pro aktuální teplotu stroje, potom se upravený odpor R_b rovná

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1}, \quad (35)$$

kde $k_1=234,5$ pro 100% IASC měď a $k_1=225$ pro hliník. [16]

1.3.2.2 Ztráty ve vinutí rotoru

Ztráty ve vinutí rotoru se určují pomocí výkonu přenášeného přes vzduchovou mezeru. Výkon přenášený přes vzduchovou mezeru určíme odečtením ztrát ve vinutí statoru ΔP_S a ztrát v železe ΔP_{Fe} od měřeného příkonu naprázdno P_0 . Pro ztráty ve vinutí rotoru platí

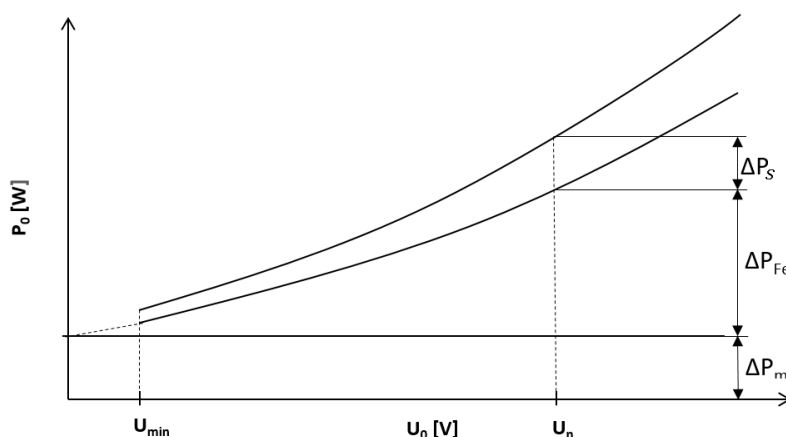
$$\Delta P_r = (P_0 - \Delta P_S - \Delta P_{Fe})s. \quad [16] \quad (36)$$

1.3.2.3 Zkouška naprázdno

Zkouška naprázdno slouží k identifikaci ztrát v železe a ztrát mechanických. Tato zkouška je prováděna ve stavu, kdy je hřídel elektrického stroje mechanicky odpojena od zátěže. Odebíraný příkon motoru se při chodu naprázdno rovná součtu ztrát ve vinutí statoru, ztrát v železe a ztrát mechanických

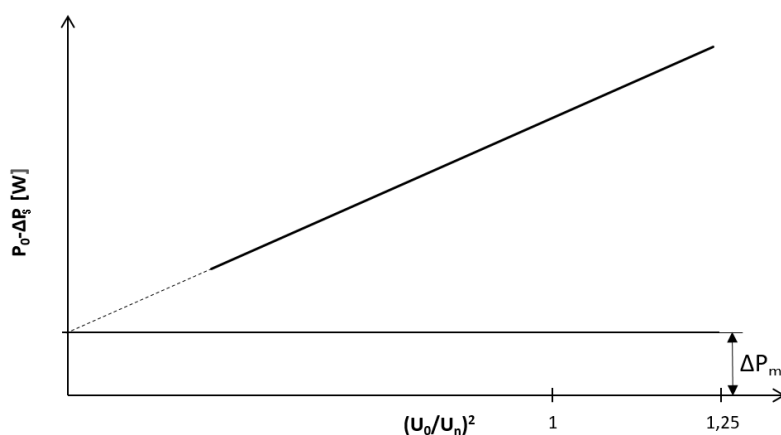
$$P_0 = \Delta P_S + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m. \quad (37)$$

Závislost příkonu naprázdno a dílčích ztrát na hodnotě napájecího napětí je znázorněna na Obrázku 22.



Obrázek 22: Rozdělení ztrát naprázdno [10]

Pro identifikaci ztrát je nutné zaznamenávat teplotu, napětí, proud a odebíraný příkon při jmenovité hodnotě frekvence. Měření se provádí snižováním napětí ze 125 % jmenovité hodnoty napájecího napětí do hodnoty napětí, kdy snižování napětí začíná způsobovat nárůst statorového proudu. Určení mechanických ztrát se provádí lineární aproximací pomocí regrese příkonu naprázdno do nulové hodnoty napětí v závislosti $P_0 - \Delta P_s = f(U_0^2)$, viz Obrázek 23.



Obrázek 23: Určení mechanických ztrát z měření naprázdno [16]

Pro přesnější určení mechanických ztrát je vhodné využít část závislosti $P_0 - \Delta P_s = f(U_0^2)$ s nižšími hodnotami napětí. Ztráty mechanické se nemusejí vždy jevit jako konstantní a mohou zanechat do měření naprázdno chybu. Nestálost mechanických ztrát bývá způsobena nerovnoměrným rozprostřením mazacího tuku v ložiskách. K dokonalému promazání ložisek dochází až po hodinách chodu stroje. Ztráty mechanické se považují za konstantní ve stavu, kdy se hodnota příkonu naprázdno nemění o více jak 3 %. Se znalostí ztrát mechanických je možné vyjádřit z rovnice (37) ztráty v železe

$$\Delta P_{Fe} = P_0 - \Delta P_s - \Delta P_m \quad [16] \quad (38)$$

1.3.2.4 Zatěžovací zkouška

Zatěžovací zkouška slouží k vyhodnocení účinnosti stroje a další analýze ztrát. Tato zkouška se provádí připojením zatěžovacího zařízení na hřídel motoru. Nejčastěji se jako zatěžovací zařízení v zatěžovací zkoušce využívá dynamometr. Měření se provádí nejméně pro šest hodnot zatížení. Čtyři body se měří v rozmezí 25 % - 110 % jmenovitého zatížení a dva vhodně zvolené body mezi 100 % a 150 % jmenovitého zatížení. Pokud je požadováno přesnější zjištění účinnosti v celém rozsahu, je možné provést měření ve více bodech zatěžovací charakteristiky. [16]

Pro vyhodnocení zatěžovací zkoušky je nezbytné zaznamenávat následující parametry: elektrický příkon, proud, napětí, otáčky motoru, zatěžovací moment, teplotu statorového vinutí nebo jeho odpor. Měření se provádí měřením od hodnoty největšího zatížení po nejnižší momentové zatížení. Měření by mělo být provedeno v co nejkratším čase, z důvodu změny teploty, a teplota statorového vinutí by se měla lišit maximálně o $\pm 10^\circ\text{C}$ od hodnoty maximálního oteplení při jmenovitém zatížení. [16]

V rámci zatěžovací zkoušky se provádí i vyhodnocení dodatečných ztrát při zatížení. Vyhodnocení může být provedeno přímou nebo nepřímou metodou. Nepřímou metodou se dodatečné ztráty při zatížení určí odečtením všech zjištěných ztrát měřením od celkového příkonu elektrického stroje. Platí tedy

$$\Delta P_{LL} = P_1 - \Delta P_S - \Delta P_r - \Delta P_m - \Delta P_{Fe} \quad [16] \quad (39)$$

Přímá metoda vychází z určení dodatečných ztrát zvlášť vlivem základní frekvence a zvlášť vlivem vyšších harmonických. Podrobný popis této metody viz literatura [16].

1.3.2.5 Účinnost elektrického stroje

Z rovnice (3) vyplývá, že účinnost je poměr výstupního výkonu a vstupního příkonu stroje. Je zřejmé, že pokud jsou známy dva ze tří parametrů – výkon, příkon, ztráty, je možné určit účinnost použitím jednoho z tvarů následující rovnice

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (40)$$

kde P_1 je elektrický příkon stroje, P_2 mechanický výkon stroje a ΔP jsou celkové ztráty.

Mechanický výkon se vypočítá pomocí změřeného momentu a otáček, platí tedy

$$P_2 = M \frac{2\pi n}{60}. \quad (41)$$

Norma IEEE 112 rozlišuje několik metod zjišťování účinnosti stroje. Volba metody závisí na velikosti výkonu stroje a jeho konstrukci. Například nejzákladnější zkouška účinnosti z příkonu a výkonu bez rozdělení ztrát (metoda A) je limitována použitím u strojů menšího výkonu jak 1 kW. Stroje pro horizontální uložení ve výkonovém rozmezí 1-300 kW by měly být testovány metodou příkonu a výkonu s rozdělením ztrát (Metoda B). Tabulka 3 ukazuje tři základní metody.

Metoda A	Měření příkonu a výkonu
Metoda B	Měření příkonu a výkonu + rozdělení ztrát s nepřímým měřením dodatečných ztrát
Metoda B1	Měření příkonu a výkonu + rozdělení ztrát s nepřímým měřením dodatečných ztrát s předpokládaným oteplením

Tabulka 3: Základní metody zkoušek účinnosti [16]

V metodě A je účinnost určena podle vzorce (40) se znalostí změřeného elektrického příkonu a mechanického výkonu s případnou teplotní korekcí a korekcí dynamometru. V metodě B jsou ztráty rozděleny na dodatečné ztráty při zatížení (nepřímou metodou) a ostatní identifikovatelné ztráty. Hodnoty dodatečných při zatížení se získají vykreslením závislosti těchto ztrát na čtverci zátěžného momentu, kde lineární regrese eliminuje náhodné chyby. U metody B je vhodné provádět zkoušky v následujícím sledu měření: změření odporu vinutí za studena a teploty okolí, oteplovací zkouška při jmenovitém zatížení, zatěžovací zkouška, zkouška naprázdno. U metody B1 oteplovací zkoušku nahrazuje předpokládané oteplení stroje. [16]

1.3.2.6 Oteplovací zkouška

Oteplovací zkouška slouží k určení nárůstu teploty částí elektrického stroje nad hodnotu teploty okolí při jmenovité, nebo jiné momentové zátěži stroje. Při této zkoušce je důležité zajistit prostorové oddělení od ostatních zařízení, která by mohla způsobovat nepřírozenou cirkulaci vzduchu v okolí měřeného stroje. Zatížení stroje se provádí pomocí dynamometru jmenovitou zátěží stroje. Je možné využít i jinou metodu zatížení stroje, například při chodu naprázdno vytvořením ekvivalentní zátěže snížením napájecí frekvence a upravením hodnoty napětí na takovou hodnotu, aby se odebraný proud stroje rovnal jmenovité hodnotě proudu stroje. [16]

Pro měření teploty mohou být použity měřicí přístroje uvedené v kapitole 1.3.1. Pro určení teploty pomocí změny odporu vinutí platí

$$t_t = \left(\frac{R_t}{R_b} (t_b + k_1) \right) - k_1, \quad (42)$$

kde t_t je vypočítaná teplota vinutí, R_t změřená hodnota odporu, R_b referenční hodnota odporu při známé teplotě t_b , $k_1=234,5$ pro 100% IASC měď a $k_1=225$ pro hliník. [16]

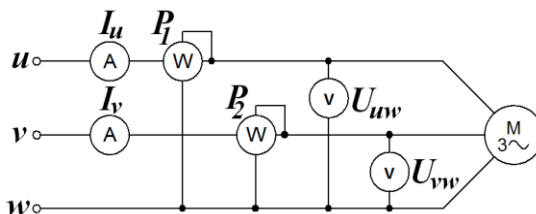
Celková doba oteplovací zkoušky u strojů pro krátkodobé zatížení je dána specifickým časem pro tento stroj, nebo časem, kdy dojde k dosažení jmenovitého oteplení stroje. U strojů pro nepřetržitá jmenovitá zatížení je doba oteplovací zkoušky daná stavem, kdy nárůst teploty nepřekročí 1 °C během periody 30 min.. Pokud se oteplovací zkouška provádí při jiném než jmenovitém zatížení, je možné provést korekci podle vzorce

$$t_{jmen} = t_{test} \left(\frac{I_{jmen}}{I_{test}} \right)^2, \quad (43)$$

kde t_{jmen} je jmenovitá hodnota teploty stroje, I_{jmen} proud při jmenovitém zatížení, t_{test} změřená teplota, I_{test} odebraný proud při zkušebním zatížení. [16]

1.4 Měření činného výkonu

Počet wattmetrů, které jsou nezbytné pro měření činného výkonu n -fázové sítě, udává Blondelův teorém. Blondelův teorém říká, že v n -vodičové soustavě můžeme činný výkon zátěže správně měřit neméně $n-1$ wattmetry. Pro využití Blondelova teorému je nutná spolehlivá znalost sledu fází, jak vyplývá z teoretických poznatků popsaných níže.



Obrázek 24: Aaronovo zapojení wattmetrů [18]

Na Obrázku 24 je zobrazeno Aaronovo zapojení, které vychází z Blondelova teorému. Z Obrázku 24 je zřejmé, že okamžité měřené výkony p_1 a p_2 jsou rovny

$$p_1 = u_{uw} i_u = u_u i_u - u_w i_u, \quad (44)$$

$$p_2 = u_{vw} i_v = u_v i_v - u_w i_v. \quad (45)$$

Sečtením obou výkonů p_1 a p_2 získáme rovnici

$$p = p_1 + p_2 = u_u i_u + u_v i_v + u_w (-i_u - i_v), \quad (46)$$

Kde závorka $(-i_u - i_v)$ představuje proud i_w na základě platnosti 1. Kirchhoffova zákona

$$i_u + i_v + i_w = 0. \quad [18] \quad (47)$$

Tímto je dokázáno, že Blondelův teorém vychází z předpokladu uzavřeného uzlu všech vodičů v měřeném systému, protože proud v kterémkoliv vodiči n -fázového systému je výsledkem součtu proudů ve zbylých vodičích. V Aaronově zapojení je nutno dodržet správnost sledů napětí vůči měřeným proudům. Napěťové cívky jednotlivých wattmetrů musí být zapojeny tak, aby ke vstupní napěťové svorce byla připojena ta fáze, na které je připojena proudová cívka příslušného wattmetru. Na výstupních napěťových svorkách musí být připojeno napětí fáze, ke které není připojen wattmetr. [18]

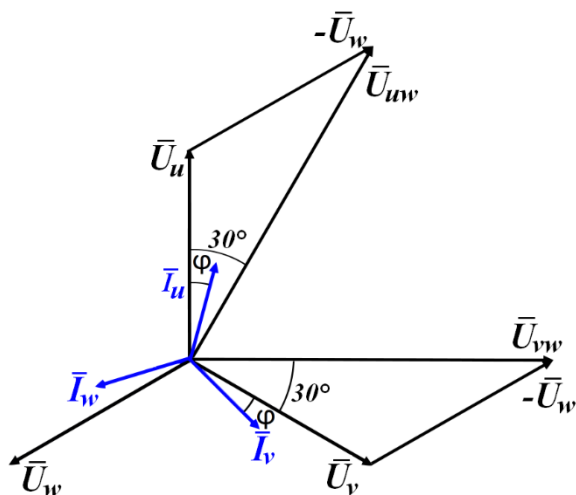
Pro Aaronovo zapojení vyplývají další důležité poznatky z fázorového diagramu. Na Obrázku 25 je zobrazen fázorový diagram třífázové soustavy se zátěží indukčního charakteru. Pro zjednodušení je předpokládána symetrická soustava se symetrickou zátěží, potom můžeme na základě fázorového diagramu určit vztah pro činný výkon

$$P = P_1 + P_2 = UI \cos(\varphi - 30^\circ) + UI \cos(\varphi + 30^\circ). \quad (48)$$

Ze vztahu (48) plyne následující:

- Při fázovém posunu $\varphi = 0^\circ$ budou naměřené hodnoty výkonů obou wattmetrů stejně velké $P_1 = P_2$.
- Při $\varphi = 60^\circ$ je změřený výkon druhého wattmetru roven nule $P_2 = 0 \text{ W}$.
- Ve stavu kdy $\varphi < 60^\circ$ jsou oba výkony kladné $P_1 > 0 \text{ W}$, $P_2 > 0 \text{ W}$.
- Při $\varphi < 60^\circ$ je změřený výkon druhého wattmetru záporný $P_2 < 0 \text{ W}$.

Poslední případ při měření analogovými wattmetry znamená přepólování proudové cívky wattmetru P_2 . [18]



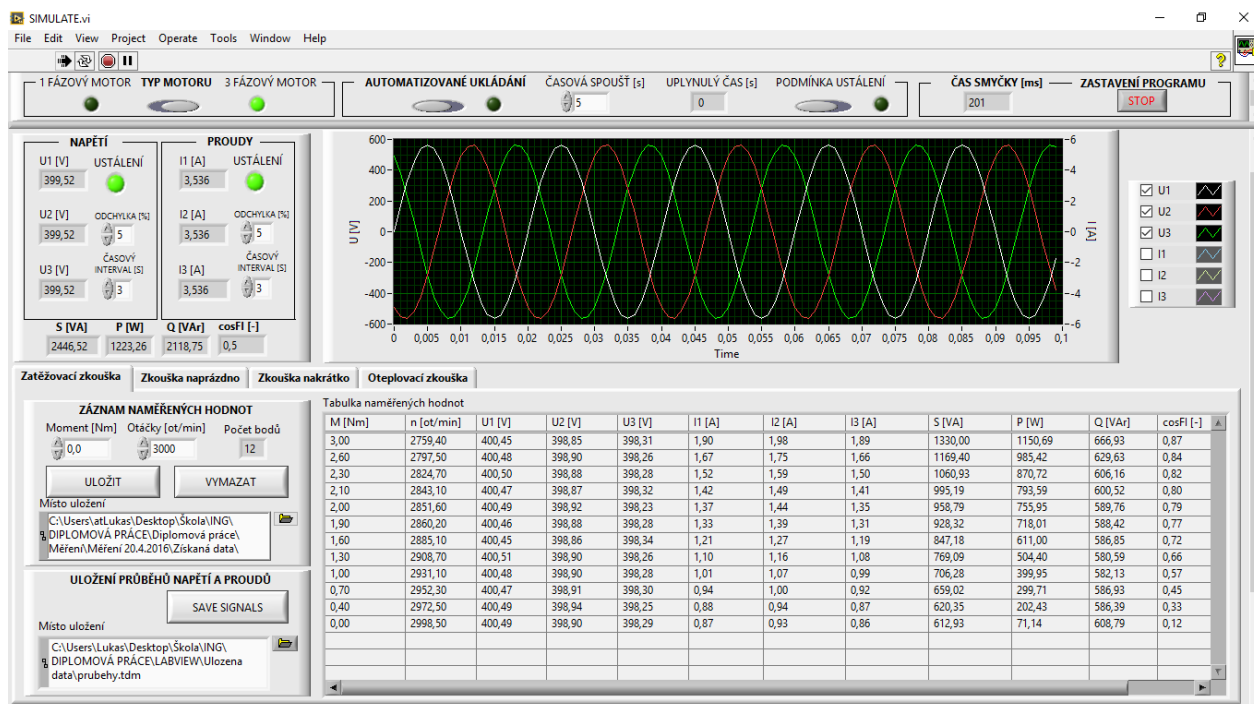
Obrázek 25: Aaronovo zapojení wattmetrů: fázorový diagram

2 MĚŘICÍ PROGRAM

V této kapitole je nejprve popsáno uživatelské rozhraní programu – Front Panel a následně je vysvětlen algoritmus programu – Block Diagram.

2.1 Front Panel

Uživatelské rozhraní programu pro měření na asynchronním stroji je zobrazeno na Obrázku 26. Pro výchozí nastavení měření slouží horní panel. Na tomto panelu je možné zvolit měření třífázového, nebo jednofázového motoru. Díky tomuto přizpůsobení dojde k programové změně výpočtu výkonů a formátu ukládání veličin (ukládání jednoho napětí a proudu místo tří napětí a proudů). Prostřední vymezení slouží ke zvolení funkce automatizovaného ukládání. Tato možnost umožní ukládat měřené veličiny ve zvolném intervalu bez nutnosti stisknutí tlačítka “ULOŽIT”. Interval ukládání se volí pomocí číslcového pole “ČASOVÁ SPOUŠŤ”. Tato funkce zahrnuje i možnost aktivace zahrnutí podmínky ustálení. Pokud je podmínka ustálení aktivována, program vyhodnocuje, zda jsou efektivní hodnoty napětí a proudů ustáleny. Ve stavu, kdy jsou proudy a napětí ustáleny, dochází k ukládání vždy po uplynutí časového intervalu. Pokud nejsou proudy a napětí ustáleny, nedojde k uložení v okamžiku uplynutí časového intervalu, ale program čeká na uplynutí následující časového intervalu, kdy opět program vyhodnotí, zda jsou již veličiny ustáleny. Program tedy automaticky ukládá jen ve stavu ustálení efektivních hodnot napětí a proudů. Číslcový indikátor “UPLYNULÝ ČAS” zobrazuje aktuální uplynulý čas nastaveného intervalu. V pravém vymezení je indikátor “ČAS SMYČKY” který zobrazuje dobu vykonávání jednoho cyklu programu. Tlačítko “STOP” slouží k zastavení programu. Hlavní okno je rozděleno na několik vystupujících ohrazení, které graficky oddělují funkce programu.



Obrázek 26: Front Panel vytvořeného měřicího programu

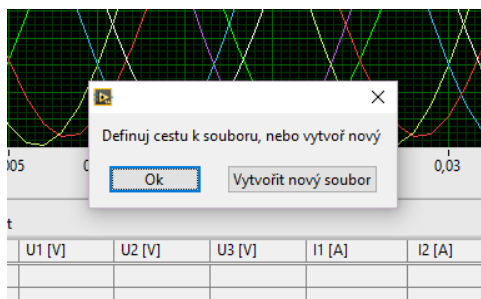
V levém horním vymezení dochází k zobrazení okamžitých měřených hodnot: efektivní hodnoty napětí a proudů, zdánlivého příkonu, činného příkonu, jalového příkonu a účinníku.

U hodnot napětí a proudů jsou kontrolky “USTÁLENÍ“, sloužící pro indikaci ustáleného stavu. Ustálený stav je sledován na základě kontroly, zda okamžitá hodnota veličiny nepřesáhne povolené meze odchylek během definovaného intervalu. Meze se nastavují číselným polem “ODCHYLKA“. Zadaná číselná hodnota do pole “ODCHYLKA“ představuje maximální procentuální povolené vychýlení okamžité hodnoty od referenční hodnoty, která je automaticky zaznamenána na počátku časového intervalu sledování. Délka časového intervalu sledování ustálení se nastavuje v poli “ČASOVÝ INTERVAL“. Princip funkce sledování ustálení je podrobněji vysvětlen v následující kapitole 2.2.

V pravé horní části front panelu je umístěn graf, který zobrazuje průběhy signálů napětí a proudů. Pomocí legendy grafu je možné nastavit zobrazení konkrétních průběhů, což umožňuje zobrazit například signály napětí a proudu pro jednu fázi.

Ve spodní polovině uživatelského rozhraní je vidět pás karet s jednotlivými zkouškami “Zatěžovací zkouška“, “Zkouška naprázdno“, “Zkouška nakrátko“, “Oteplovací zkouška“.

Jednotlivé karty zkoušek se liší z důvodu rozdílných požadovaných veličin pro následné zpracování zkoušek. Všechny karty zkoušek obsahují vymezení okno sloužící k záznamu veličin pro konkrétní bod měřené charakteristiky. V tomto okně je možné pomocí okna “Místo uložení“ vybrat soubor, který již existuje. Pokud není cesta k souboru definována a obsluha programu stiskne tlačítko “Uložit“, zobrazí se dialogové okno s hláškou “Definuj cestu k souboru, nebo vytvoř nový“, viz Obrázek 22. Po zobrazení dialogového okna má uživatel dvě možnosti, buďto stisknutí tlačítka “Ok“ a následně uživatel zadá cestu k souboru, nebo po stisku tlačítka “Vytvořit nový soubor“ zadá uživatel umístění a název nového souboru. V okně “Záznam naměřených hodnot“ je také tlačítko “Vymazat“, které umožňuje vymazání posledního řádku naměřených hodnot, například při špatném zadání vstupních hodnot momentu a otáček. Moment a otáčky je možné zadávat v kartách “Zatěžovací zkouška“ a “Oteplovací zkouška“. Ve zbylých kartách “Zkouška naprázdno“ a “Zkouška nakrátko“ není možné ukládat moment a otáčky vzhledem k bezvýznamnosti veličin pro tyto zkoušky. Indikátor “Počet bodů“ zobrazuje aktuální počet naměřených bodů konkrétní měřené charakteristiky.



Obrázek 27: Dialogové okno při nedefinovaném souboru

Druhé vymezení okno slouží k zaznamenání průběhů signálů napětí a proudů v časové délce definované počtem nahromaděných vzorků signálu v bloku Collector.

V každé kartě jednotlivých zkoušek je umístěna “Tabulka naměřených hodnot“ zobrazující všechny změřené body charakteristiky (jeden řádek představuje jeden bod měřené charakteristiky) ve zvoleném souboru.

Na Obrázcích 28 až 32 jsou zobrazeny všechny karty zkoušek. V kartě pro měření oteplovací zkoušky (Obrázek 28) je v okně záznamu naměřených hodnot navíc měření času. Tlačítkem “START/STOP” je možné spustit a zastavit měření času. Pomocí tlačítka “RESTART” je možné vynulovat uplynulý čas. Čas je zobrazován i ukládán v minutách.

Obrázek 28: Karta zatěžovací zkoušky

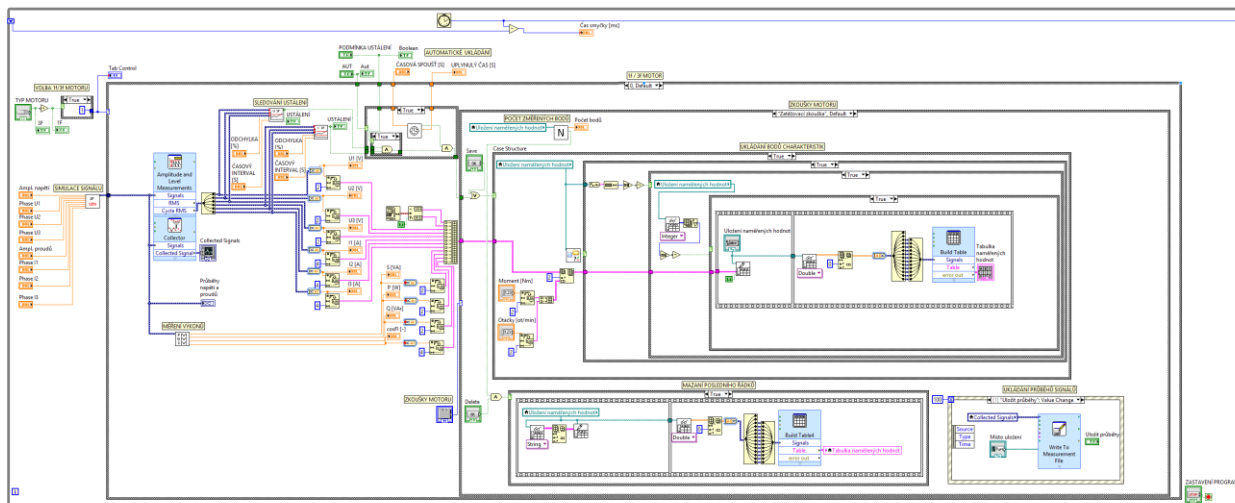
Obrázek 29: Karta zkoušky naprázdno

Obrázek 30: Karta zkoušky naprázdno

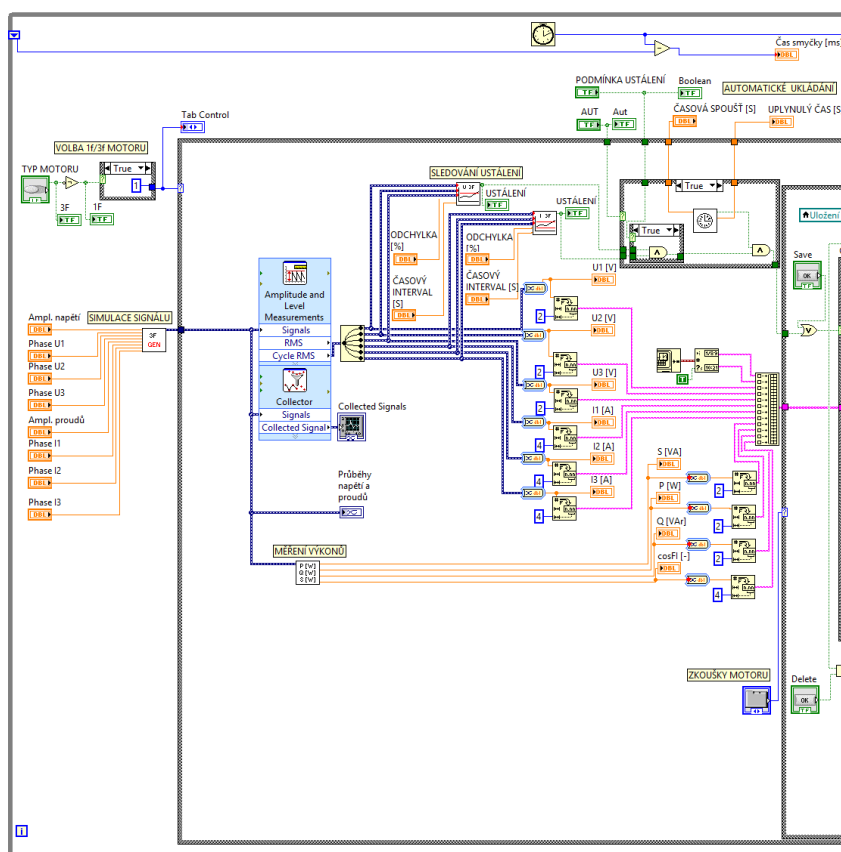
Obrázek 31: Karta oteplovací zkoušky

2.2 Block Diagram

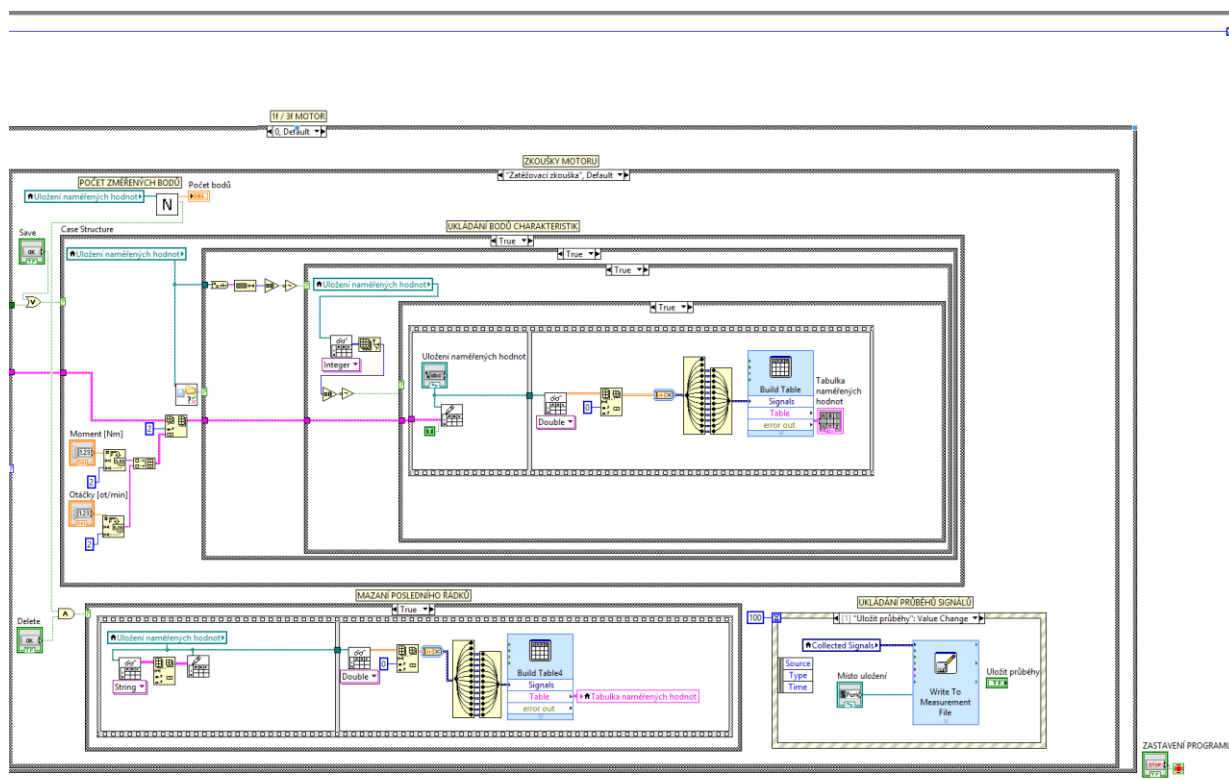
Celkový blokový diagram programu je zobrazen na Obrázku 32. Obrázky 33 a 34 rozdělují blokový diagram na dvě poloviny z důvodu zvětšení jednotlivých bloků a struktury. Nejprve budou popsány nadřazené struktury a následně jednotlivé funkce programu. Jelikož program vytvořený v LabVIEW pracuje na principu sekvenčního vykonávání příkazů jednotlivých bloků, bude program popsán ve směru toku dat, tedy zleva doprava.



Obrázek 32: Blokový diagram měřicího programu



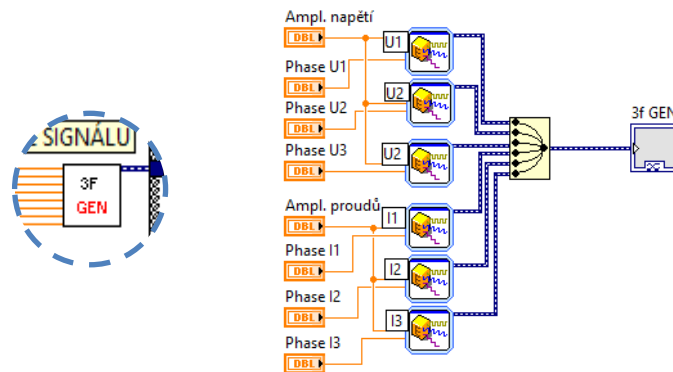
Obrázek 33: Blokový diagram měřicího programu: levá polovina



Obrázek 34: Blokový diagram měřicího programu: pravá polovina

Celá struktura programu je uzavřena ve While smyčce, což umožňuje cyklické vykonávání programu, dokud nedojde k zastavení pomocí tlačítka “STOP“. Na While smyčku je také navázán posuvný registr určující dobu trvání výpočtu jednoho cyklu programu. Následuje struktura Case, která pomocí subdiagramů rozděluje program pro třífázový nebo jednofázový motor. Oba programy pro třífázový i jednofázový motor obsahují stejné rozvržení programu a liší se pouze v některých programových funkcích - výpočet výkonů a ukládání. U jednofázového motoru jsou ukládány hodnoty napětí a proudů pouze pro jednu fázi. Tato Case struktura je svázána s přepínáním záložek ve front panelu. Na front panelu se tedy zobrazí panel pro třífázový, nebo jednofázový program. Subdiagramy pro měření třífázového nebo jednofázového motoru obsahují další strukturu Case s jednotlivými zkouškami – Zatěžovací zkouška, Zkouška naprázdno, Zkouška nakrátko a Oteplovací zkouška. Subdiagramy jednotlivých zkoušek jsou opět svázány s příslušnými záložkami ve front panelu.

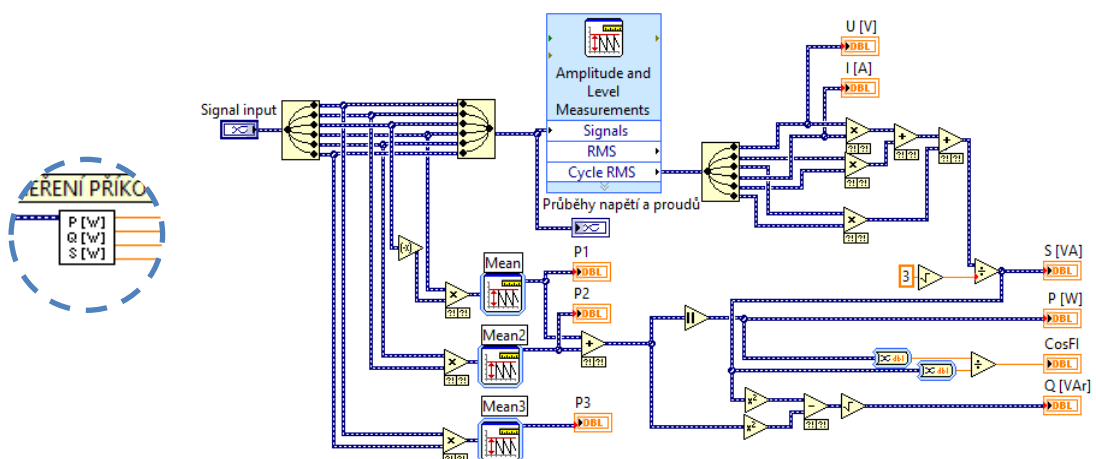
Vstupními proměnnými pro program jsou v tomto případě signály napětí – signál 1, signál 2, signál 3 a signály proudů – signál 4, signál 5, signál 6. Těchto šest signálů je získáno pomocí DAQ zařízení. V programu je DAQ zařízení virtuálně načteno pomocí bloku DAQ Assistant. Při stavbě programu byl blok DAQ Assistant nahrazen SubVI se šesti bloky Simulate Signal, které simulují změřené signály napětí a proudů na třífázovém stroji, viz Obrázek 35. Přímou v DAQ Assistant bloku je možné provést simulaci konkrétního DAQ zařízení pomocí programu MAX, ovšem tato možnost se neprokázala jako užitečná.



Obrázek 35: SubVI pro simulaci signálů

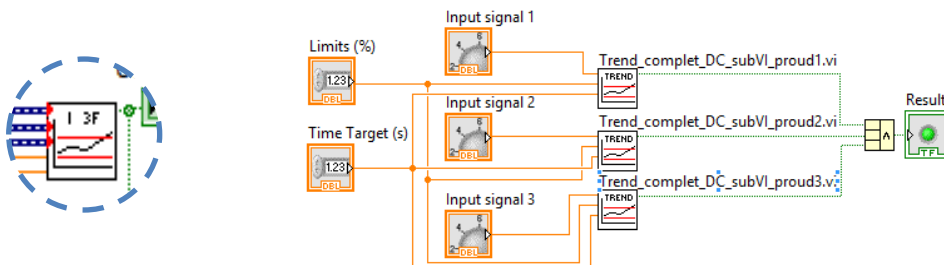
Šest vstupních signálů (3x napětí, 3x proud) je vedeno v jednom signálovém vodiči do bloku Amplitude and Level Measurements, pomocí kterého jsou získány efektivní hodnoty všech signálů. Před blokem, měřící efektivní hodnoty, dochází k odbočení dat do vytvořeného SubVI určující činný příkon, jalový příkon, zdánlivý příkon a účinník.

SubVI určující složky příkonu a účinníku je zobrazen na Obrázku 36. Program tohoto SubVI je vytvořen na základě teorie uvedené v kapitole 1.4. Výpočet činného výkonu je proveden pomocí součtu středních hodnot dvou příkonů P_1 a P_2 . Výkon P_1 je vypočten jako střední hodnota součinu invertovaného signálu 1, který představuje napětí U_{wu} a signálu 4, představující proud I_1 . Výkon P_2 je vypočten jako střední hodnota součinu signálu 2, který představuje napětí U_{vw} a signálu 5, představující proud I_2 . Inverze napětí U_{wu} je provedena v programu z důvodu přehlednějšího zapojení fází na měřič (bylo by možné pouze prohodit fázové vodiče na vstupních svorkách měřicího zařízení sdružených napětí). SubVI měřící příkon dále obsahuje blok Amplitude and Level Measurements pro získání efektivních hodnot potřebných k výpočtu zdánlivého příkonu. Zdánlivý příkon je vypočten jako součet součinů sdružených napětí a proudů podělený odmocninou ze tří. Jalový příkon je v programu získán ze znalosti zdánlivého a činného příkonu. Na základě platnosti Pythagorovy věty ve výkonovém trojúhelníku je jalový výkon vypočítán jako odmocnina rozdílu druhých mocnin zdánlivého a činného příkonu. Celkový účinník je potom vyjádřen jako poměr činného a zdánlivého výkonu. Výpočet činného výkonu P_3 je pouze informativní. Vstupy do tohoto SubVI jsou všechny vstupní signály a výstupy změřený činný příkon, zdánlivý příkon, jalový výkon a celkový účinník.



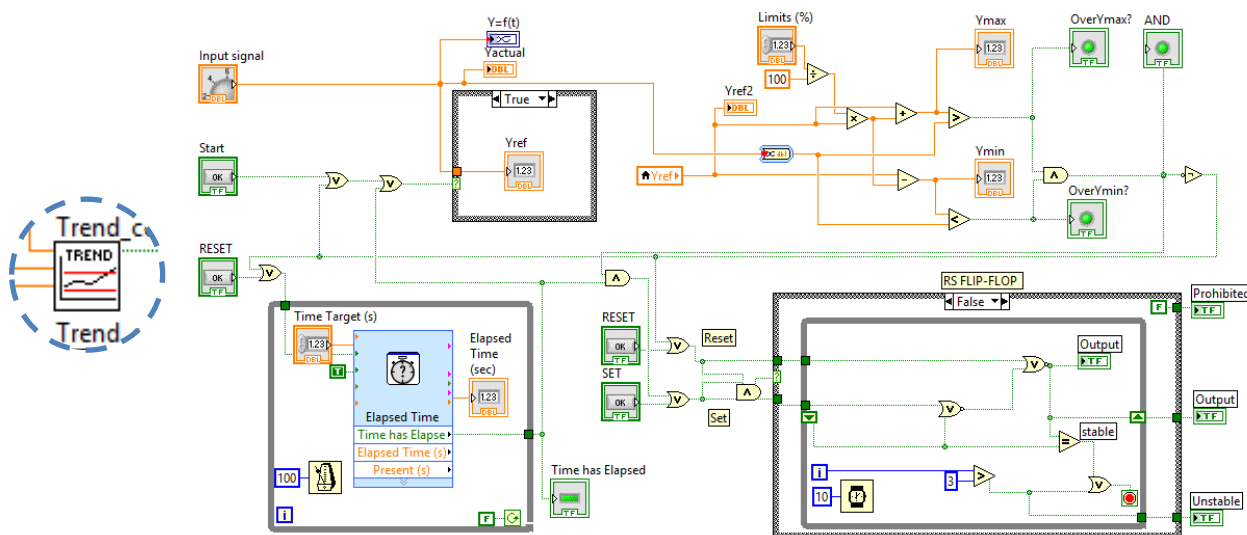
Obrázek 36: SubVI pro měření příkonu

Za blokem Amplitude and Level Measurements dochází k rozbočení na jednotlivé signály pomocí Split Signals. Jednotlivé signály jsou napojeny na vstupy do SubVI sloužícího ke sledování ustálení okamžitých efektivních hodnot napětí a proudů. V následujícím odstavci je použit pro efektivní hodnoty napětí a proudů pojem signál, protože všechny měřené veličiny jsou v programu považovány za signál.



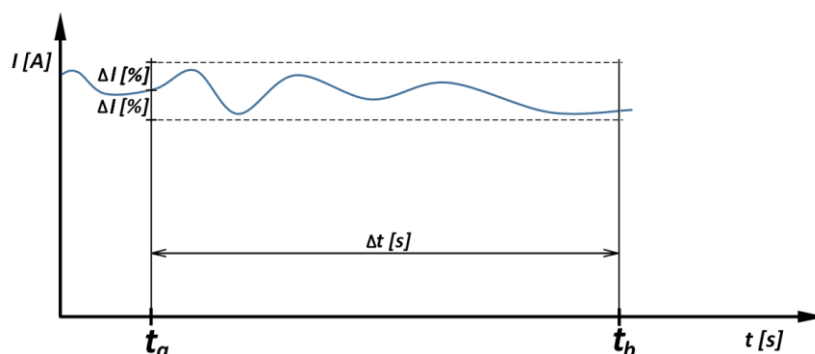
Obrázek 37: SubVI pro sledování ustálení signálů - AND člen

Struktura bloku SubVI pro sledování ustálení signálů je zobrazena na Obrázku 37, kde jsou vidět tři provázané SubVI bloky pro jednotlivé proudy (stejně provázání je provedeno i v SubVI pro napětí). Toto provázání slouží k zavedení logického členu AND na výstup všech bloků SubVI, aby výsledná indikace ustálení vypovídala, zda jsou, nebo nejsou ustáleny hodnoty všech napětí (proudů), neboli stačí jediný neustálený proud ze tří a podmínka ustálení není splněna. Hlavní SubVI program pro sledování ustálení signálu je zobrazen na Obrázku 38.



Obrázek 38: SubVI pro sledování ustálení signálu

Pro prvotní pochopení principu sledování ustálení signálu slouží Obrázek 39, kde je zobrazen ukázkový průběh signálu, v tomto případě proudu v závislosti na čase. Uživatelsky jsou nastavitelné dva limitující parametry – ΔI a Δt . ΔI určuje povolenou výchylku signálu v procentech vypočítanou z referenční hodnoty signálu v čase t_a . Δt určuje časový interval během kterého nesmí dojít k překročení nastavených mezí pomocí ΔI . Principiálně program funguje tak, že v časovém okamžiku t_a dojde k uložení referenční hodnoty signálu, výpočtu okrajových mezí pomocí ΔI a je spuštěno odpočítávání časového intervalu Δt . Po celou dobu intervalu dochází k porovnávání aktuální hodnoty signálu s vypočtenými mezemi.

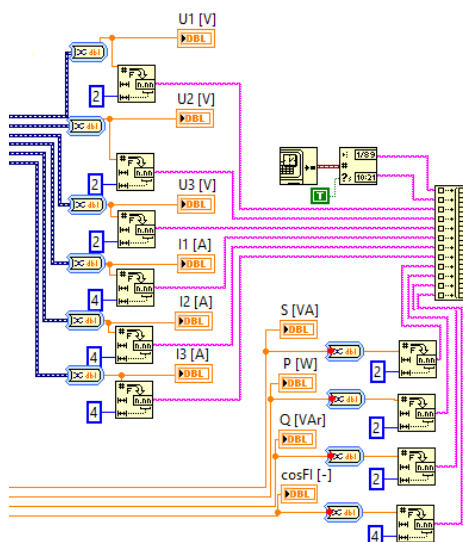


Obrázek 39: Vysvětlení principu sledování ustálení signálu

V programu pro sledování ustálení signálu mohou nastat dva různé děje:

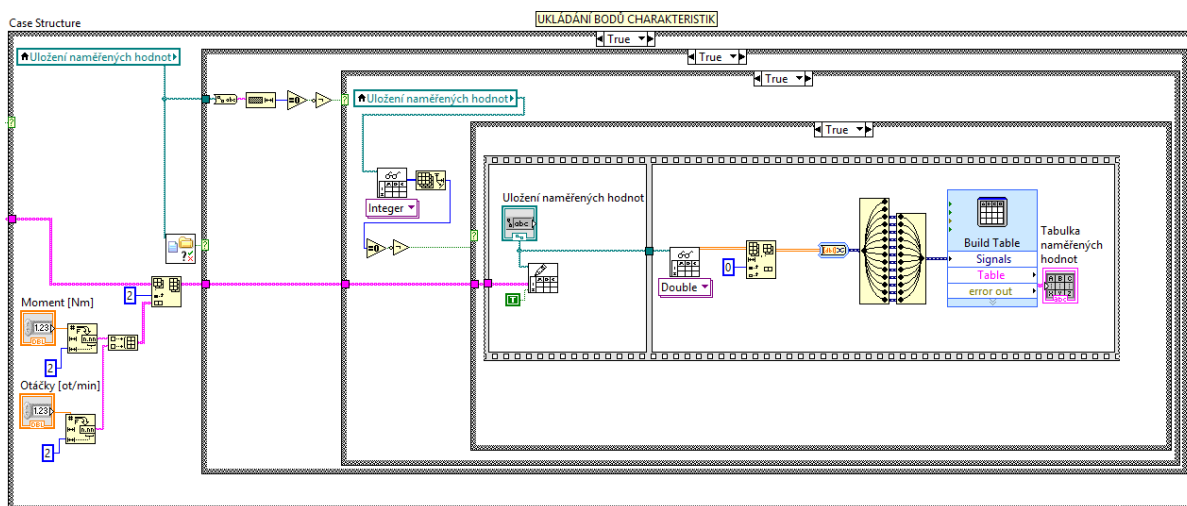
1. **Čas intervalu vyprší a nedojde k překročení mezí.** Výstup je pomocí RS klopného obvodu nastaven na TRUE - indikuje tedy, že v posledním intervalu nedošlo k překročení mezí, a průběh signálu je možné považovat za ustálený. Po vypršení časového intervalu dojde opět k nastavení nové referenční hodnoty a okrajových mezí a výstup je stále nastaven na hodnotu TRUE.
2. **Během časového intervalu dojde k překročení mezí.** Dojde k resetu RS klopného obvodu – nastavení výstupu na FALSE. FALSE indikuje, že měřený signál není ustálen. Vlivem překročení mezí dojde zároveň k nastavení nové referenční hodnoty a mezí z aktuální hodnoty průběhu a spustí se nové odpočítávání intervalu. Výstup je nastaven na FALSE, dokud neproběhne cyklus podle předchozího bodu.

V signálové cestě je dále možné pozorovat převedení dynamických dat na formát typu string a omezení desetinných míst hodnot jednotlivých veličin, viz Obrázek 40. Všechny datové formáty jsou převedeny na formát typu string z důvodu sjednocení formátů pro uložení do souboru. Na stejném obrázku je také vidět připojení času a výsledných hodnot výkonů a účinníku. Všechny signály jsou následně sjednoceny do jednoho signálového vodiče a slouží jako vstup do Case struktury pro ukládání bodů měřených charakteristik.

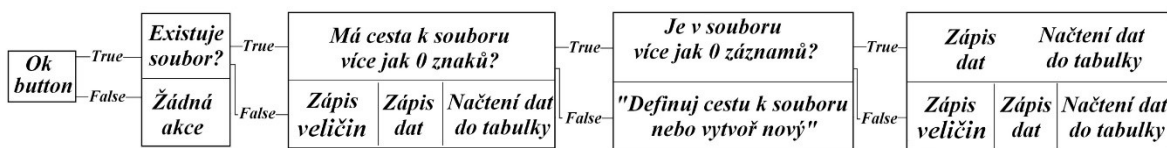


Obrázek 40: Úprava datových formátů

Case struktury na Obrázku 41 slouží k ukládání jednotlivých bodů měřených charakteristik. Ve vytvořeném programu pracuje ukládání bodů charakteristik na principu přiřazování řádků do souboru a následném načítání dat ze souboru do Tabulky naměřených hodnot ve front panelu. Tato prvotní myšlenka je vidět v poslední struktuře Case, kde je posloupnost událostí zapsí a čti zajištěna strukturou Flat Sequence. Struktura Case se při návrhu rozvinula do více posloupných Case struktur pro zajištění zápisu hlavičky s veličinami a možnosti vytvoření nového souboru pro zápis dat. Díky ukládání každého nového bodu charakteristik přímo do souboru nemůže dojít ke ztracení naměřených dat při náhlém zastavení programu, například vlivem chyby programu. Blokový diagram na Obrázku 41 je součástí struktury programu pro zatěžovací zkoušku, proto je vidět v první Case struktuře připojení informací o momentu a otáčkách. Závislost jednotlivých Case struktur popisuje blokové schéma na Obrázku 42.

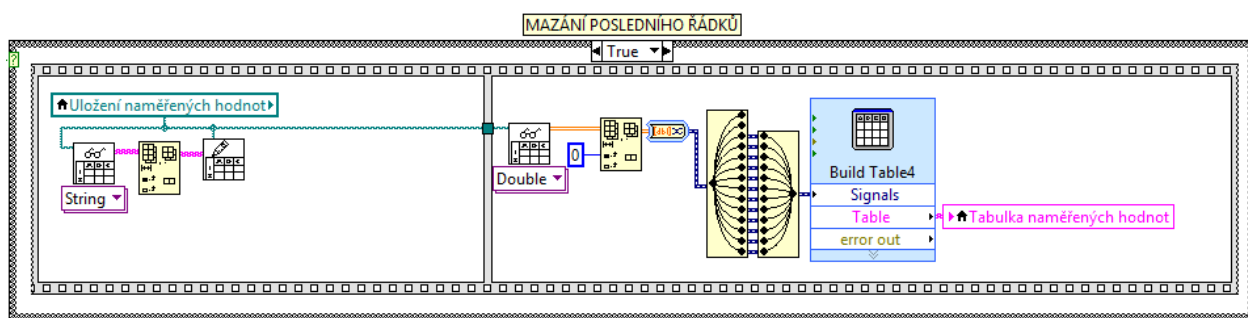


Obrázek 41: Case struktury pro ukládání bodů charakteristik



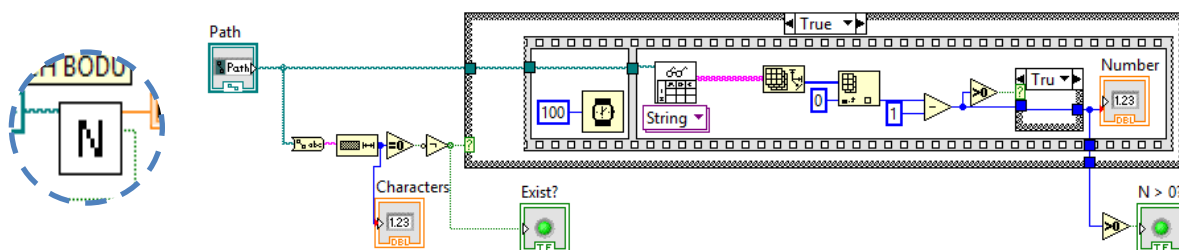
Obrázek 42: Závislost subdiagramů Case struktur při zápisu bodů charakteristik

Ve strukturách jednotlivých zkoušek jsou dále Case struktury, viz Obrázek 43, sloužící pro vymazání posledního řádku změřené charakteristiky. V prvním okně Flat Sequence struktury dochází k vymazání řádku pomocí Delete From Array a následnému uložení dat zpět do souboru. V druhém okně dochází k načtení dat do Tabulky naměřených hodnot. Aby nebylo možné používat funkci odmazávání ve stavu, kdy není uložen žádný řádek, musí být při zmáčknutí tlačítka "DELETE" splněna podmínka $n > 0$, kde n je počet uložených bodů charakteristiky – v datovém typu Array se jedná o počet řádků. Splnění podmínky zabezpečuje logický člen AND.



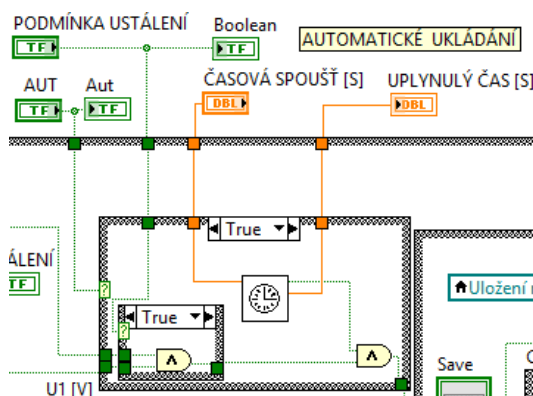
Obrázek 43: Mazání posledního řádku měřené charakteristiky

Počet řádku změřené charakteristiky určuje SubVI na Obrázku 44. K vykonávání programu pro indikaci řádků dochází pouze ve stavu, kdy je definován soubor pro ukládání. Pokud je soubor definován, dochází k načtení dat ze souboru a určení velikosti dimenze datového typu String Array v podobě řádků. Vstupem toho SubVI je cesta k souboru a výstupem počet uložených řádků spolu s indikací, zda je splněno $n > 0$ v podobě boolean hodnoty. Výstupní boolean hodnota je zavedena do podmínky limitující funkci mazání posledního řádku (viz předchozí odstavec).



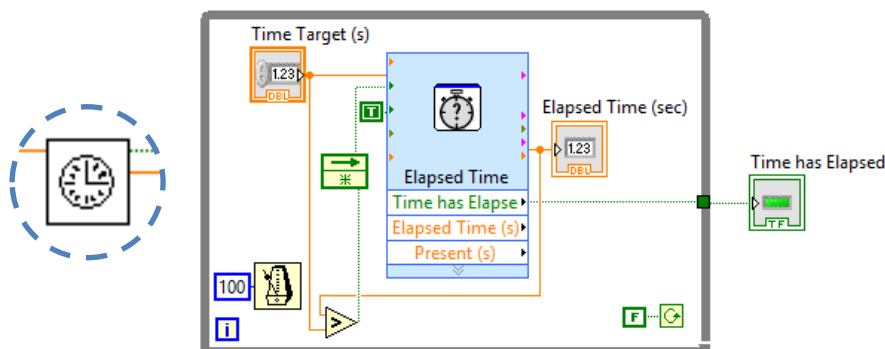
Obrázek 44: Určení počtu změřených bodů charakteristik

Struktura na Obrázku 45 slouží k aktivaci automatického ukládání. Automatické ukládání umožňuje ukládání jednotlivých bodů charakteristik opakovaně po uplynutí definovaného časového intervalu.



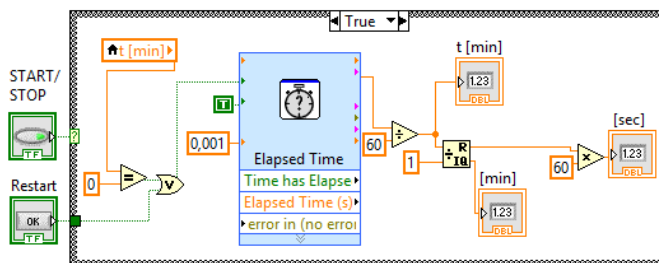
Obrázek 45: Case struktura k aktivaci automatického ukládání

Stopky této funkce tvoří SubVI s blokem Elapsed Time, viz Obrázek 46. Blok Elapsed Time je funkčně ošetřen tak, že při nastavení menší hodnoty časového intervalu než hodnoty uplynulého času, dojde k resetu stopek. Po uplynutí časového intervalu je na výstupu tohoto SubVI hodnota TRUE, která je přivedena na výběrový terminál Case struktury pro ukládání bodů charakteristik. Volbu mezi ručním nebo automatickým ukládáním zajišťuje logický člen OR. Pomocí podřazené struktury Case na Obrázku 45 dochází k aktivaci podmínky ustálení.



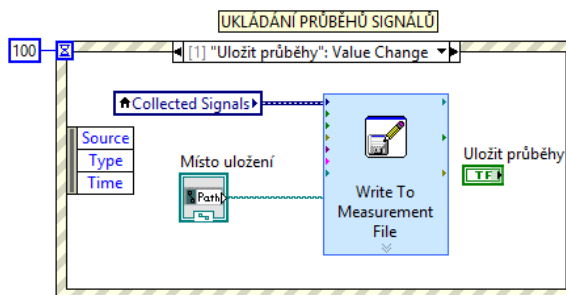
Obrázek 46: SubVI pro měření času intervalu automatického ukládání

Na Obrázku 47 je zobrazena Case struktura sloužící pro měření času oteplovací zkoušky (nachází se tedy pouze v subdiagramu Oteplovací zkouška). Vstupy této funkce k měření času jsou START / STOP a RESTART. Výstupem je měřený čas v minutách, který je pomocí lokální proměnné vřazen do datového signálu s ostatními ukládanými veličinami. Čas v minutách je dále rozdělen na číslo před desetinnou čárkou (celé minuty) a číslo za desetinnou čárkou, které je přepočítáno na vteřiny. Rozdělení je provedeno kvůli zobrazení ve front panelu.



Obrázek 47: Case struktura pro měření času oteplovací zkoušky

Ukládání průběhů signálů napětí a proudu je provedeno pomocí Event struktury zobrazené na Obrázku 48. Délka zaznamenaného průběhů je definována počtem nashromážděných vzorků v bloku Collector. Signál je uložen do souboru TDM, který je možné číst a dále zpracovávat v programu Excel.



Obrázek 48: Ukládání průběhů napětí a proudu pomocí Event struktury

3 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Praktické měření bylo v diplomové práci provedeno za účelem ověření správné funkce vytvořeného měřicího programu a provedení zkoušek, na základě kterých byly vyhodnoceny ztráty motoru. V rámci této diplomové práce byly změřeny dva motory:

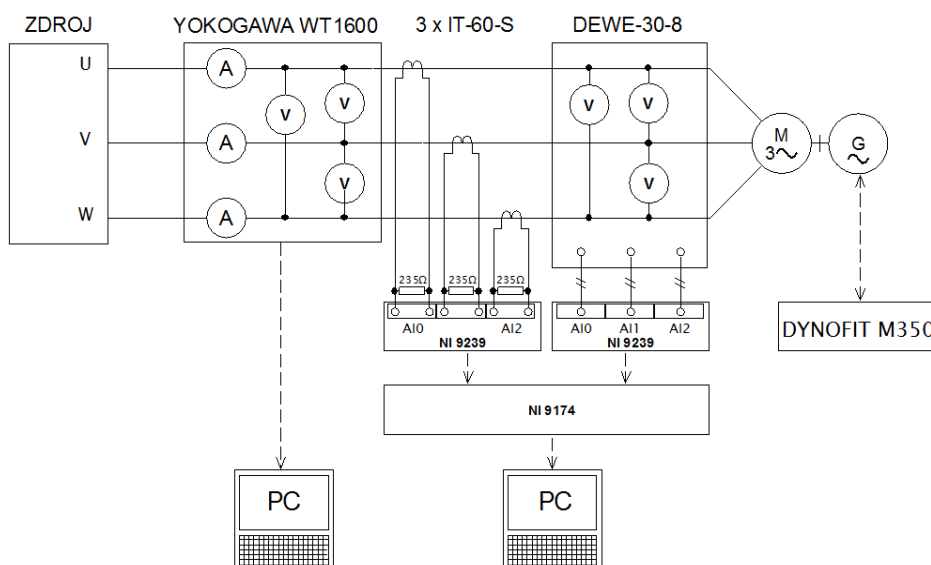
- EMP Slavkov TM2 100 4L – **3kW, 4p**
- Atas T22VT512 – **0,6, 2p**

Jako analyzovaný motor byl zvolen třífázový dvoupólový asynchronní motor Atas T22VT512. Štítkové parametry stroje jsou uvedeny v Tabulce 4. Tento motor byl měřen při $f = 50$ Hz.

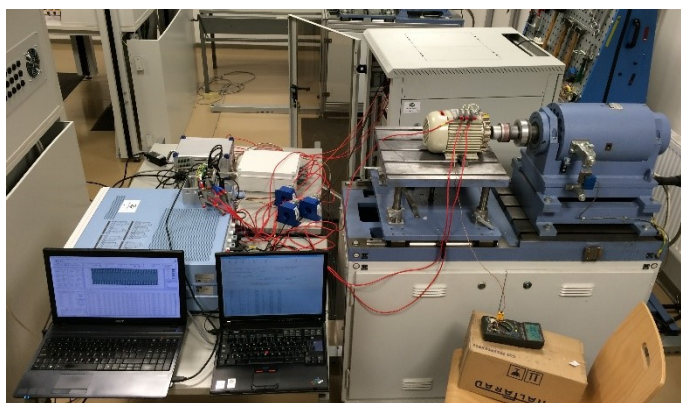
f [Hz]	50	60
P_n [kW]	0,6	0,72
I_n [A]	1,6	1,5
U_n [V]	400	460
$\cos\varphi$ [-]	0,3	0,85
n_n [min ⁻¹]	2830	3410

Tabulka 4: Jmenovité parametry motoru T22VT512

Celkové schéma zapojení měřicího pracoviště je zobrazeno na Obrázku 49. Třífázová napájecí síť byla vytvořena laboratorním regulovatelným zdrojem California Instruments 5kVA. Tento zdroj generuje čistý sinusový průběh napětí s nízkým obsahem vyšších harmonických složek. Jako referenční zařízení pro posouzení správné funkce zpracování dat sloužil digitální analyzátor výkonů YOKOGAWA WT1600. Všechna data, která byla měřena vytvořeným programem, byla zároveň změřena i pomocí WT1600, aby bylo možné následně posoudit správné zpracování dat programem.



Obrázek 49: Schéma zapojení měřicího pracoviště



Obrázek 50: Měřicí pracoviště

Měřicí systém s vytvořeným programem (program viz kapitola 2) obsahuje několik zařízení. Pro získávání vstupních dat, v tomto případě průběhů napětí a proudů, byly použity dva DAQ moduly NI 9239. Jedná se o měřicí DAQ karty firmy National Instruments, které disponují čtyřmi simultánními vstupy s maximální vzorkovací frekvencí 50 kS/s. Pro měření napětí byla využita karta se šroubovací svorkovnicí a pro měření proudů verze karty s BNC konektory. Obě tyto karty byly připojeny do CompactDAQ NI 9174 šasi. K šasi NI 9174 lze připojit celkem čtyři nezávislé DAQ moduly, a disponuje komunikačním rozhraním typu USB.



Obrázek: Měřicí karty NI 9239 s BNC konektory a šroubovací svorkovnicí [19]

Počet kanálů	Vstupní rozsah	Bitové rozlišení	Vzorkovací frekvence jednoho kanálu	Anti-aliasing filtr	Izolační schopnost (šroubová svorka/BNC konektor)
4	± 10 V	24	50 kS/s	ANO	250/60V

Tabulka 5: Základní parametry měřicí karty NI 9239 [19]

Pro měření pomocí DAQ modulů je důležité vhodně zvolit přístroj pro převedení měřené veličiny na měřitelnou hodnotu pomocí měřicí karty. V případě tohoto měření, bylo pro snížení hodnoty signálu napětí využito laboratorní zařízení DEWE-30-8 s nastaveným převodovým poměrem 800/5. K získání proudových signálů byla použita proudová čidla LEM IT 60-S USLTRASTAB. IT 60-S USLTRASTAB představuje průvlekové galvanicky oddělené proudové čidlo. Pomocí tohoto proudového čidla lze měřit relativně velké proudy, a to až do 60A. Čidlo IT 60-S USLTRASTAB je aktivní prvek, který je nutno napájet napětím 15V. Základní parametry proudového čidla viz Tabulka 6. Převod výstupního proudu čidla na napěťový signál byl proveden pomocí dvou paralelně zapojených rezistorů s hodnotou 470 Ω .

Měřicí rozsah	Výstupní hodnota proudu	Převod	Přesnost	Napájení
± 60 A	± 100 mA	1/600	0.02725 %	15 V

Tabulka 6: Základní parametry proudového čidla LEM IT 60-S [20]

3.1 Analýza ztrát

Pro analýzu ztrát asynchronního stroje je nutné provést několik typových zkoušek stroje. Při provádění zkoušek je vhodné využít doporučení norem, které se zkouškami zabývají, viz kapitola 1.3. V rámci měření byly provedeny následující zkoušky

- Měření odporu statorového vinutí
- Oteplovací zkouška
- Zkouška naprázdno
- Zatěžovací zkouška
- Zkouška nakrátko

3.1.1 Měření odporu statorového vinutí

Měření odporu statorového vinutí bylo provedeno na začátku měření, ve stavu kdy teplota motoru byla ustálena na teplotu okolí a dále po provedení každé zkoušky. Odporu vinutí bylo možné měřit jen mezifázově z důvodu zapojení vinutí na svorkovnici do hvězdy, proto je průměrný změřený odpor podělen dvěma. Hodnoty odporů vinutí uvádí Tabulka 7. Měření bylo prováděno pomocí microohmmetru CROPICO DO5000.

	Za studena	Oteplovací zkouška	Zatěžovací zkouška	Zkouška nakrátko	Zkouška naprázdno
$R_{uv} [\Omega]$	23,890	26,930	26,571	26,592	25,558
$R_{vu} [\Omega]$	23,890	26,765	26,477	26,456	25,483
$R_{uw} [\Omega]$	24,230	27,890	26,774	26,925	25,874
$R_{wu} [\Omega]$	24,220	25,633	25,791	25,640	24,470
$R_{\text{průměr}/2} [\Omega]$	12,029	13,402	13,202	13,202	12,673

Tabulka 7: Naměřené hodnoty odporů

3.1.2 Oteplovací zkouška

Při této zkoušce byl motor zatížen jmenovitým zátěžným momentem na hřídeli.

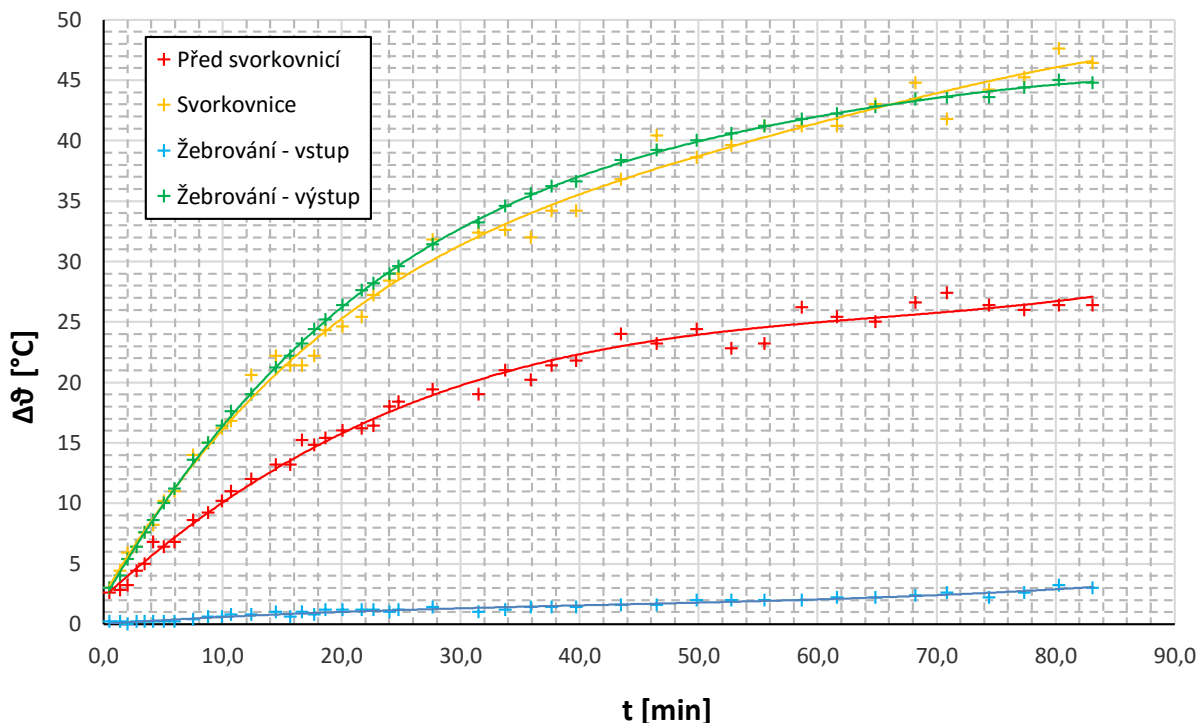
Při měření oteplovací charakteristiky byly zaznamenávány teploty různých bodů na vnější části konstrukce motoru. Teplota byla měřena v těchto místech konstrukce: chladicí žebra – vstup i výstup proudění vzduchu, v okolí svorkovnice, ložiskový štít.

Z měření oteplovací charakteristiky motoru Atas T22VT51 bylo zjištěno, že došlo k maximálnímu oteplení na povrchu konstrukce motoru (v místě výstupu vzduchu u žebrování a ložiskového štítu), jen o přibližně 6 °C za dobu 120 min. Teploty byly získávány pomocí kontaktního čidla teploty připojeného k multimetru Metex M3890D a laserového měřiče teploty Fluke 59. Díky nízké hodnotě oteplení a relativně velkých chyb měřicích přístrojů je výsledná oteplovací charakteristika motoru Atas T22VT51 značně zkreslená.

Z důvodu špatné vypovídající schopnosti oteplovací charakteristiky motoru Atas T22VT51 je zde uvedena oteplovací charakteristika druhého měřeného motoru TM2 100 4L, viz Obrázek 52. Na Obrázku 51 je uvedeno rozmístění měřených bodů vnější konstrukce motoru.



Obrázek 51: Rozmístění měřených bodů při oteplovací zkoušce



Obrázek 52: Oteplovací charakteristika motoru EMP Slavkov TM2 100 4L

Z oteplovací charakteristiky obrázku 52 je zřejmé, že k největšímu oteplení dochází v oblasti svorkovnice. V místě žebrování – vstup se teplota jen lehce navyšuje z důvodu ofukování tohoto místa studeným vzduchem z ventilátoru. Naopak v místě žebrování – výstup je proudící vzduch již ohřátý průchodem žeber, což způsobuje větší oteplování tohoto místa.

3.1.3 Zkouška naprázdno

Zkouška naprázdno byla provedena na motoru ve stavu, kdy hřídel motoru byla mechanicky odpojena od zatěžovacího dynamometru. Měření a následné zpracování hodnot bylo provedeno s doporučením normy IEE 112, viz kapitola 1.3. Napájecí napětí bylo nejprve nastaveno na hodnotu 150 % jmenovité hodnoty a postupně bylo snižováno do hodnoty, při které začínal narůstat odebíraný proud vlivem vzrůstu ztrát v rotoru. Nejprve byly určeny ztráty ve vinutí statoru podle vzorce

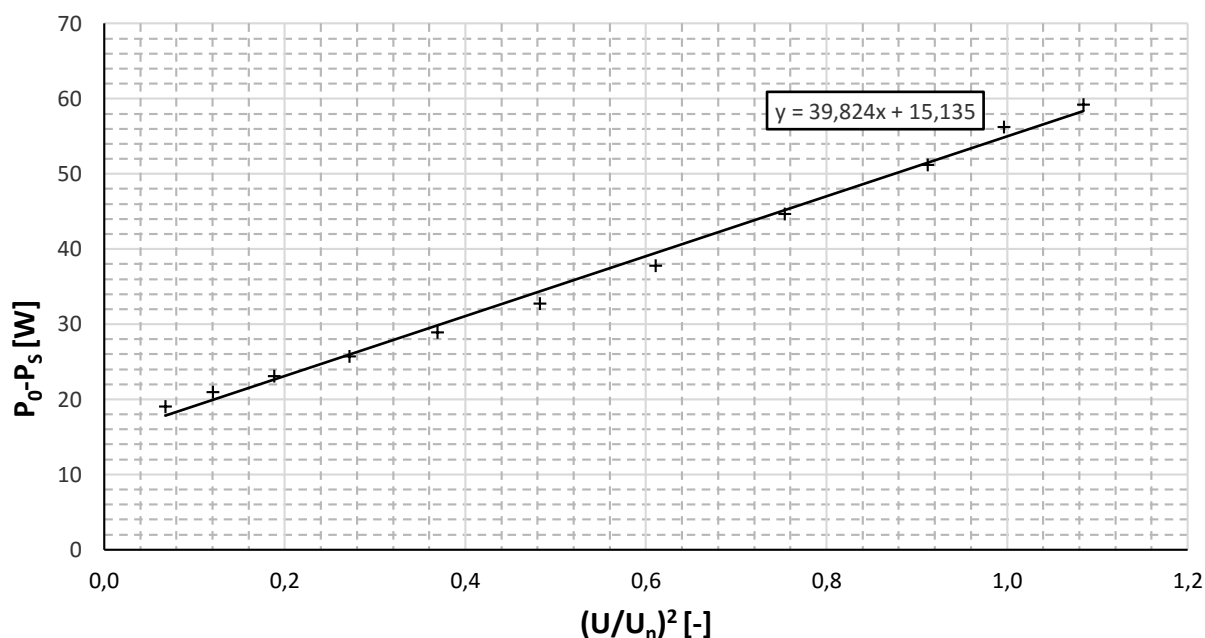
$$\Delta P_S = 3R_v I^2, \quad (49)$$

kde za R_v byl dosazen změřený odpor po zkoušce naprázdno.

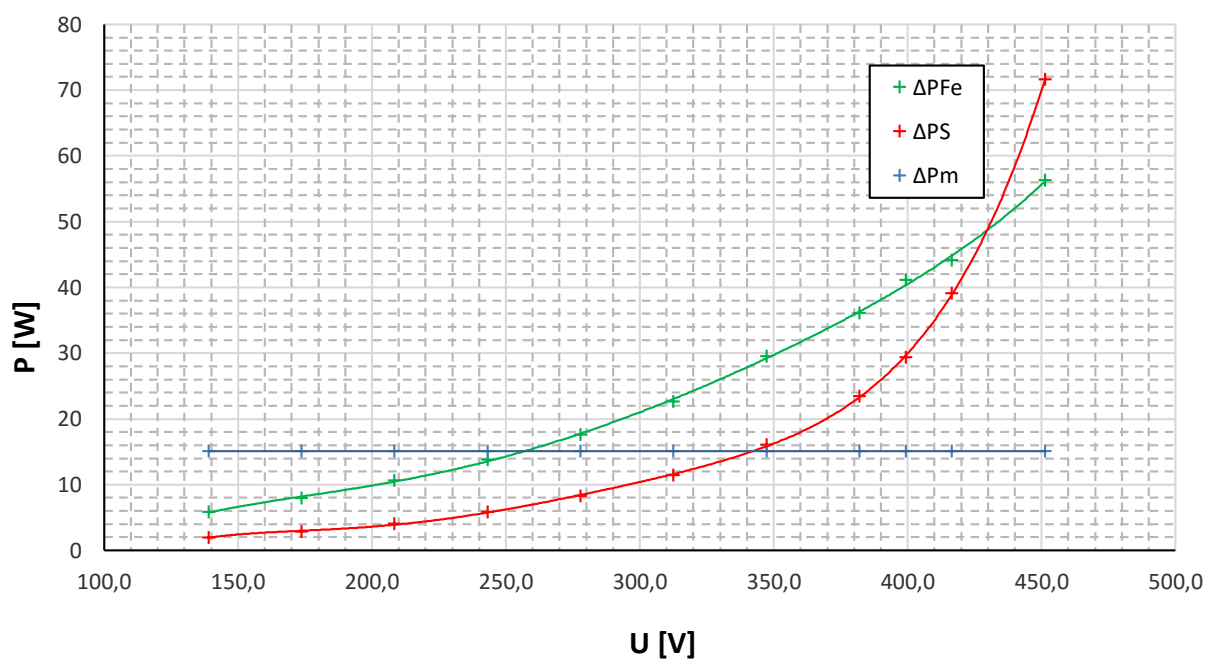
Odečtením ztrát ve vinutí statoru od celkového příkonu naprázdno byly získány konstantní ztráty

$$\Delta P_k = P_0 - \Delta P_s. \quad (50)$$

Konstantní ztráty zahrnují ztráty v železe a ztráty mechanické. Konstantní ztráty jsou rozděleny pomocí zobrazení grafické závislosti $P_0 - \Delta P_s = f(U/U_n)^2$ a provedením lineární aproximace pomocí regrese příkonu naprázdno do nulové hodnoty napětí. V nule napětí jsou získány mechanické ztráty. Závislost zobrazuje graf na Obrázku 53. Odečtením ztrát mechanických od konstantních ztrát byly získány ztráty v železe. Vypočítané rozdělení ztrát naprázdno je uvedeno v Tabulce 8 a zobrazeno v grafu na Obrázku 54.



Obrázek 53: Určení mechanických ztrát motoru T22VT512



Obrázek 54: Rozdělení ztrát naprázdno motoru T22VT512

U _{avg} [V]	I _{avg} [A]	S ₀ [VA]	P ₀ [W]	Q ₀ [VAr]	cosφ [-]	ΔP _s [W]	ΔP _k [W]	ΔP _m [W]	ΔP _{Fe} [W]
451,28	1,373	1073,14	143,07	1063,56	0,133	71,67	71,40	15,14	56,27
416,58	1,014	731,70	98,36	725,06	0,134	39,10	59,26	15,14	44,13
399,40	0,879	607,98	85,66	601,92	0,141	29,37	56,29	15,14	41,16
382,03	0,785	519,41	74,66	514,02	0,144	23,43	51,23	15,14	36,10
347,33	0,650	391,13	59,76	386,54	0,153	16,09	44,66	15,14	29,53
312,61	0,550	297,61	49,30	293,49	0,166	11,49	37,81	15,14	22,68
277,90	0,467	224,62	41,05	220,84	0,183	8,28	32,77	15,14	17,64
243,18	0,392	165,27	34,78	161,57	0,211	5,85	28,93	15,14	13,79
208,47	0,327	118,23	29,83	114,40	0,252	4,08	25,75	15,14	10,62
173,75	0,273	82,15	25,93	77,95	0,316	2,83	23,10	15,14	7,96
139,03	0,228	54,90	22,93	49,89	0,418	1,98	20,95	15,14	5,82
104,31	0,198	35,70	20,57	29,18	0,576	1,48	19,09	15,14	3,95
69,60	0,208	25,03	19,14	16,12	0,765	1,64	17,50	15,14	2,37

Tabulka 8: Naměřené a vypočítané hodnoty z měření naprázdno motoru T22VT512

3.1.4 Zatěžovací zkouška

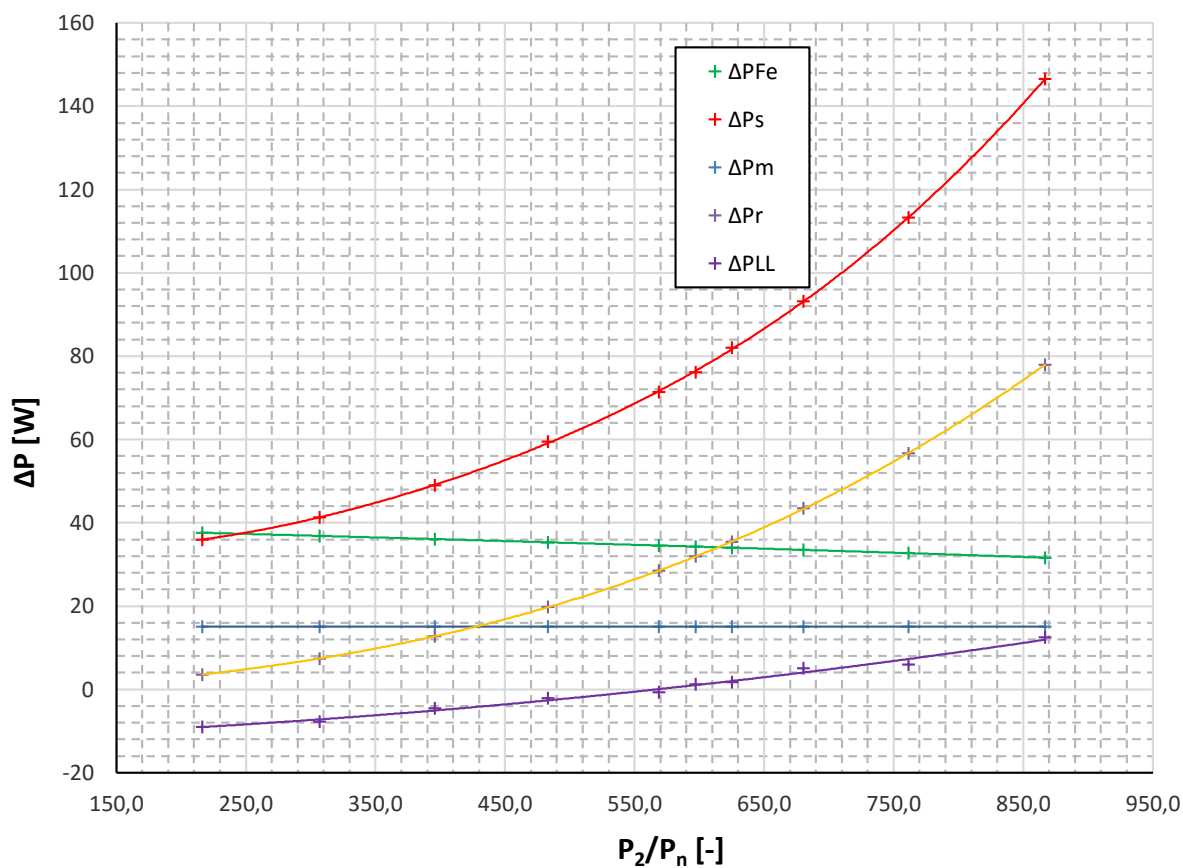
Zatěžovací zkouška asynchronního stroje byla provedena zatěžováním měřeného asynchronního motoru pomocí dynamometru. Měřený motor byl zatěžován přibližně v rozmezí 25 % - 110 %. Ztráty mechanické a ztráty v železe jsou známy z měření naprázdno, viz Kapitola 3.1.3. Ztráty v železe, dle normy ČSN [21], je nutné pro jednotlivé body přepočítat. Norma do výpočtu zahrnuje vliv úbytku napětí na statorovém vinutí. Bylo provedeno přepočítání napětí podle vzorce

$$U = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2}IR\cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}IR\sin\varphi\right)^2} \quad [21]. \quad (51)$$

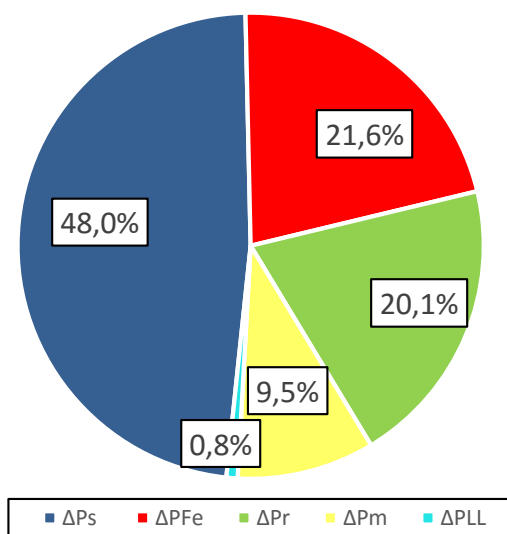
Ztráty v železe byly následně určeny pomocí aproximované závislosti $\Delta P_{Fe} = f(U)$ z měření naprázdno.

Ztráty v rotoru jsou určeny pomocí přenášeného výkonu vzduchovou mezerou, viz kapitola 1.3.2.2.

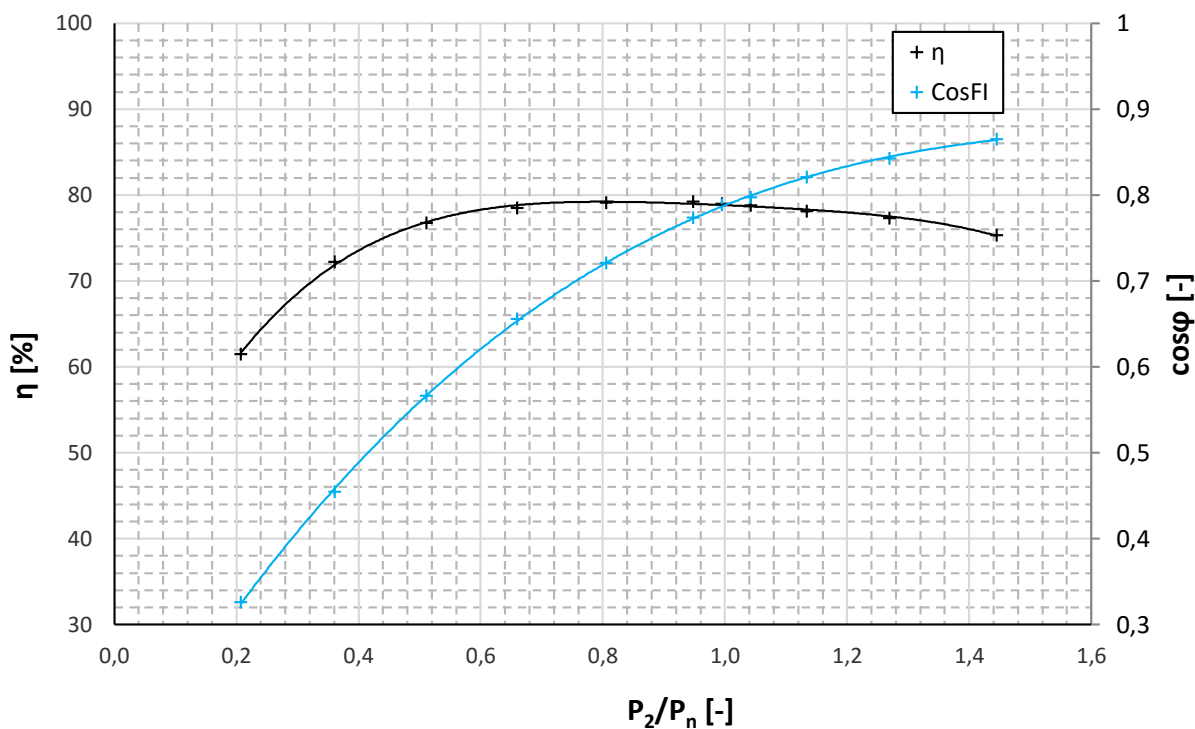
Dodatečné ztráty jsou určeny jako rozdíl mezi výkonem a příkonem s přičtenými ztrátami. Výkon motoru je určen pomocí rovnice 41. Rozdělení ztrát v závislosti na zatížení zobrazuje graf na Obrázku 55. Další grafy určující vlastnosti stroje ze zatěžovací zkoušky jsou zobrazeny v Obrázcích 57 a 58.



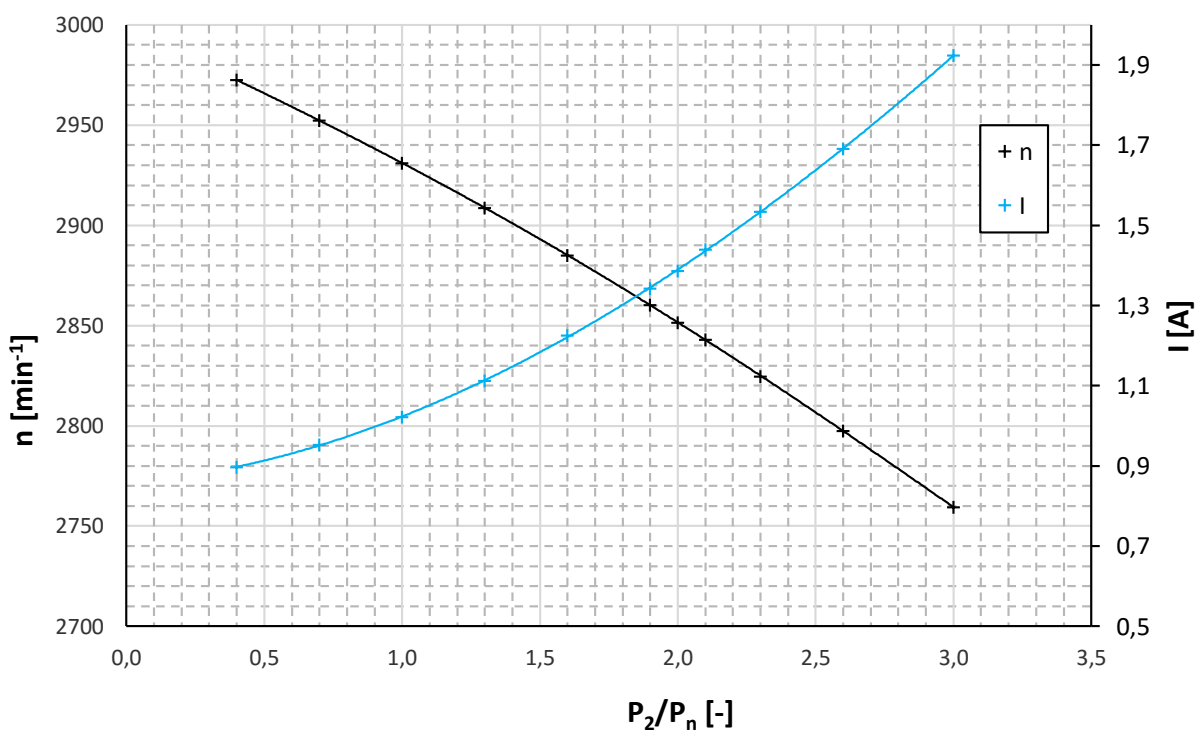
Obrázek 55: Ztráty motoru T22VT512 v závislosti na zatížení



Obrázek 56: Procentuální rozdělení ztrát při jmenovitém zatěžovacím momentu



Obrázek 57: Závislost účinnosti a účiníku na zatížení motoru T22VT512



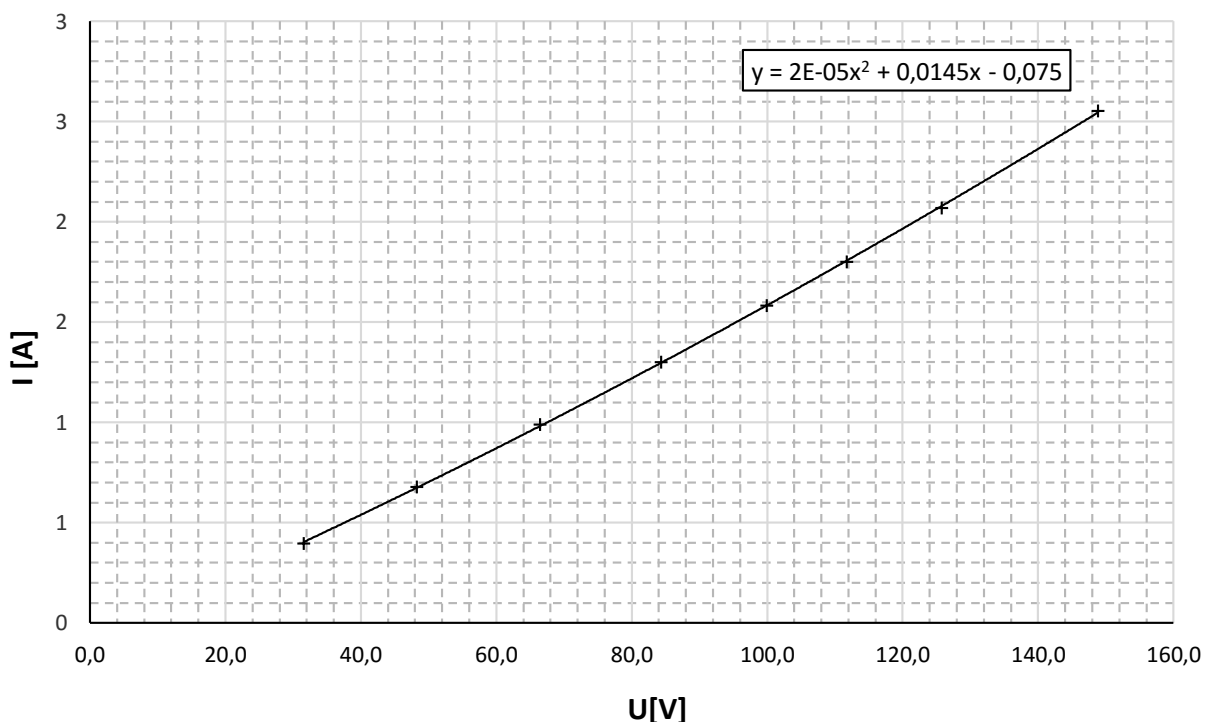
Obrázek 58: Závislost otáček a odebraného proudu na zatížení motoru T22VT512

M [Nm]	n [min ⁻¹]	U _{avg} [V]	I _{avg} [A]	P ₁ [W]	cosφ [-]	ΔP _s [W]	ΔP _m [W]	ΔP _{Fe} [W]	ΔP _r [W]	ΔP _{LL} [W]	P ₂ [W]	η [%]
3,0	2759,4	399,20	1,924	1150,69	0,865	146,54	15,14	31,62	78,00	12,51	866,89	75,34
2,6	2797,5	399,21	1,691	985,42	0,843	113,28	15,14	32,71	56,66	5,96	761,68	77,29
2,3	2824,7	399,22	1,534	870,72	0,821	93,24	15,14	33,48	43,47	5,05	680,34	78,14
2,1	2843,1	399,22	1,439	793,59	0,797	82,04	15,14	34,02	35,44	1,74	625,23	78,79
2,0	2851,6	399,21	1,387	755,95	0,788	76,15	15,14	34,27	31,93	1,22	597,24	79,00
1,9	2860,2	399,21	1,343	718,01	0,774	71,39	15,14	34,54	28,52	-0,67	569,09	79,26
1,6	2885,1	399,22	1,225	611,00	0,721	59,45	15,14	35,31	19,77	-2,06	483,40	79,12
1,3	2908,7	399,22	1,112	504,40	0,656	49,00	15,14	36,08	12,76	-4,55	395,98	78,50
1,0	2931,1	399,22	1,021	399,95	0,566	41,32	15,14	36,85	7,39	-7,69	306,94	76,75
0,7	2952,3	399,23	0,953	299,71	0,455	35,98	15,14	37,61	3,60	-9,02	216,41	72,21
0,4	2972,5	399,23	0,897	202,43	0,326	31,87	15,14	38,35	1,21	-8,66	124,51	61,51
0,0	2998,5	399,23	0,886	71,14	0,116	31,12	15,14	39,39	0,00	-14,50	0,00	0,00

Tabulka 9: Naměřené a vypočítané hodnoty zatěžovací zkoušky motoru T22VT512

3.1.5 Zkouška nakrátko

Tato zkouška byla provedena se zabrzděnou hřídelí. Dle doporučení normy EN 60034-28 bylo provedeno měření v rozmezí hodnot 10 – 150 % jmenovité hodnoty proudu. Nastavování proudu bylo docíleno postupným zvyšováním napájecího napětí. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 10. Pomocí rovnice regrese naměřené závislosti nakrátko $I = f(U)$ je možné určit rozběhový proud. Dosazením jmenovité hodnoty napětí do rovnice regrese z grafu na Obrázku 59 je získána hodnota rozběhového proudu $I_z = 8,925$ A.



Obrázek 59: Závislost proudu na napětí nakrátko motoru T22VT512

U_{avg} [V]	I_{avg} [A]	S [VA]	Q [VAR]	P [W]	$\cos\varphi$ [-]	ΔP_s [W]	ΔP_r [W]
148,91	2,554467	658,82	450,53	480,69	0,6838	258,43	222,26
125,82	2,071167	451,36	305,33	332,42	0,6765	169,89	162,53
111,76	1,8004	348,52	233,14	259,05	0,669	128,38	130,67
99,96	1,582067	273,91	181,06	205,54	0,661	99,13	106,41
84,34	1,3016	190,14	123,18	144,84	0,6479	67,10	77,74
66,47	0,9908	114,07	71,41	88,95	0,626	38,88	50,07
48,25	0,6786	56,71	33,54	45,73	0,5914	18,24	27,49
31,58	0,397267	21,73	11,45	18,47	0,5269	6,25	12,22

Tabulka 10: Naměřené a vypočtené hodnoty zkoušky nakrátko motoru T22VT512

3.2 Srovnání s YOKOGAWA 1600WT

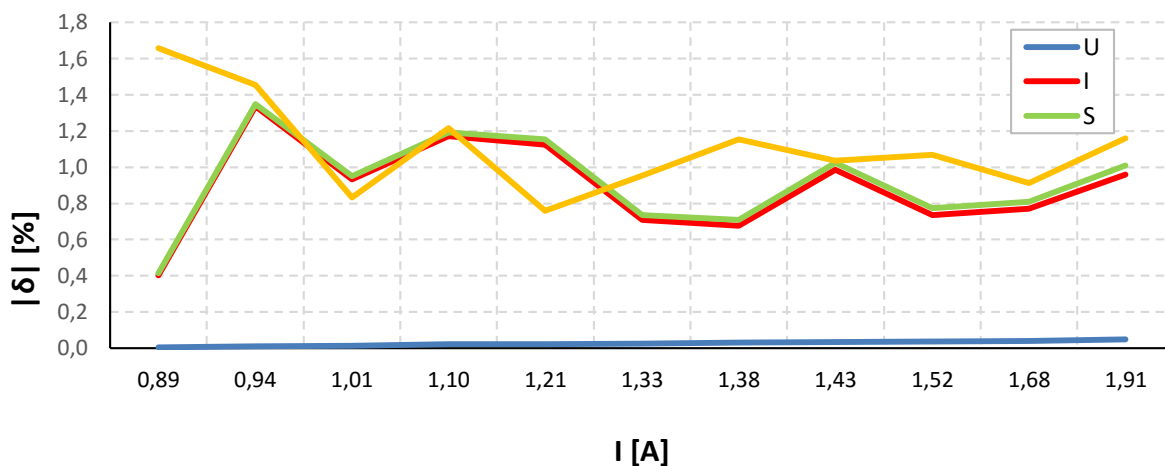
Pro ověření správnosti zpracovávání dat ve vytvořeném programu, byl k motoru zároveň připojen výkonový analyzátor YOKOGAWA 1600WT (zapojení viz Obrázek 49). Analyzátor YOKOGAWA 1600WT je v rámci tohoto ověřování považován za referenční.

Graf na Obrázku 60 zobrazuje závislost relativní chyby napětí, proudu, činného a zdánlivého příkonu na odebíraném proudu. Příkony jsou přímo matematicky zpracovávány na základě signálových průběhů a efektivních hodnot napětí a proudů (viz Kapitola 2.2). Z grafu na Obrázku 60 je zřejmé, že se zvyšujícím se odebíraným proudem roste relativní chyba napětí, což může být způsobeno úbytkem napětí na proudovodných cestách zapojeného pracoviště.

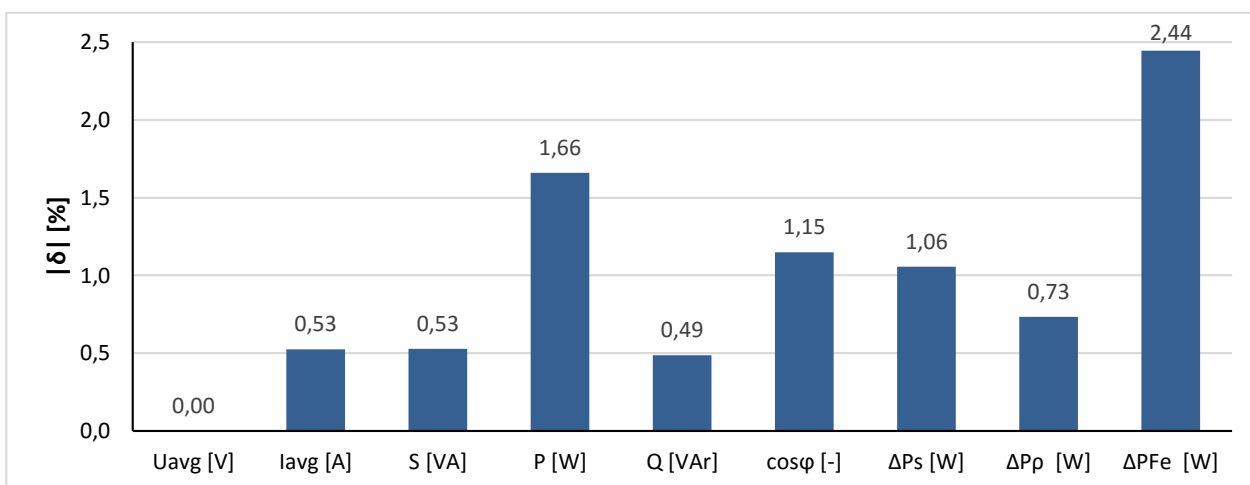
Efektivní hodnota měřeného proudu je průměrně zatížena chybou okolo 1 %. Chyba proudu může být způsobena několika faktory. Prvním z nich je fakt, že ačkoliv bylo použito relativně přesné proudové čidlo, tak ve srovnání se zařízením YOKOGAWA, které po celou dobu měření využívalo rozsah 2A, proudové čidlo měřilo proudy na spodní mezi svého rozsahu (při jmenovité proudové zátěži $I_n = 1,6$ A na 2,6 % z celkového rozsahu). Dalším faktorem způsobující chybu měření proudu může být vliv tolerance jmenovité hodnoty odporu rezistoru pro převod proudu na napětí. Rezistor mohl také do měření vnášet chybu vlivem své teplotní závislosti.

Z grafu na Obrázku 60 je také zřetelné, že relativní chyba vypočítaného zdánlivého příkonu je rovna součtu relativních chyb napětí a proudu, což vyplývá z matematické funkce násobení efektivních hodnot proudu a napětí ve vytvořeném programu. Relativní chyba vypočítaného činného příkonu dosahuje v průměru stejné relativní chyby jako chyba zdánlivého příkonu. Odlišnost velikostí relativních chyb činného a zdánlivého příkonu v jednotlivých bodech zatížení je způsobena rozdílným způsobem zpracování činného a zdánlivého výkonu.

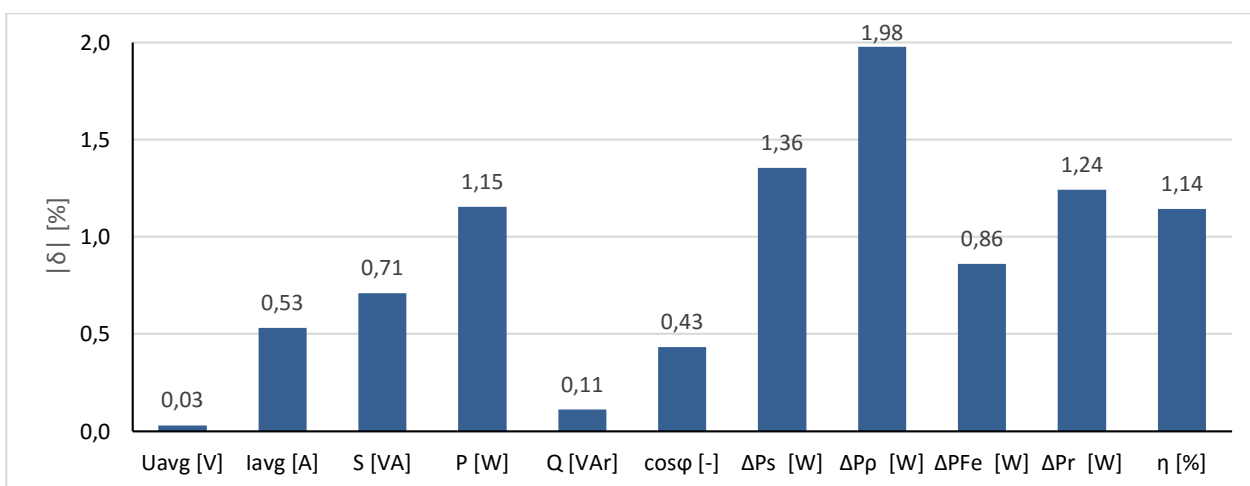
Graf na Obrázku 61 zobrazuje relativní chyby veličin zkoušky naprázdno při napětí $U = 400$ V. Graf na Obrázku 62 zobrazuje relativní chyby veličin zatěžovací zkoušky při zátěži $M = 2$ Nm. Tyto grafy vyjadřují vliv chyb výchozích veličin – napětí, proudů a výkonů na další vypočítané veličiny – účinník, jalový příkon a jednotlivé ztráty.



Obrázek 60: Závislost relativních chyb na odebíraném proudu při napětí $U = 400 \text{ V}$



Obrázek 61: Relativní chyby naměřených a vypočítaných veličin v měření naprázdno při jmenovitém napětí $U = 400 \text{ V}$



Obrázek 62: Relativní chyby naměřených a vypočítaných veličin při jmenovitém zatížení

4 ELEKTROMAGNETICKÝ VÝPOČET MOTORU ATAS T22VT512

V rámci této diplomové práce byla provedena matematická analýza stroje Atas T22VT512 pomocí výpočtového softwaru Ansys Maxwell za účelem srovnání vlastností motoru plynoucích z měření. Výpočet je proveden nejprve v prostředí RMxpert a následně v Maxwell 2D. Výpočty motoru byly provedeny na základě technických dokumentací výrobce motoru. Z důvodu autorských práv nebudou v následujících kapitolách uvedeny žádné konkrétní technické parametry stroje.

4.1 RMxpert

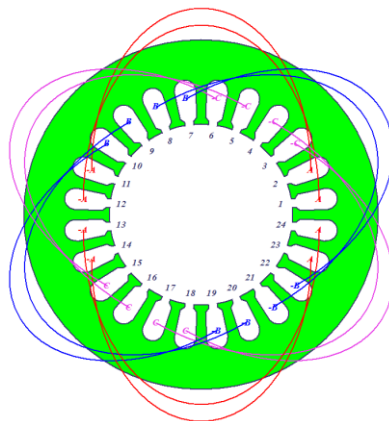
RMxpert je programový nástroj softwaru Ansys Maxwell. Výpočet provádí na základě klasické teorie elektrických strojů a ekvivalentních magnetických obvodů. Návrh stroje se v RMxpert vytváří pomocí předdefinovaných šablon pro většinu elektrických strojů. Oproti programu založenému na principu výpočtu pomocí metody konečných prvků, kde výpočet trvá ve většině případů i několik hodin, RMxpert představuje nástroj s dobou výpočtu několika sekund. Rychlost výpočtu spolu s intuitivním uživatelským prostředím velice usnadňuje proces návrhu a optimalizace elektrického stroje. Prostředí RMxpert je také možné využít k návrhu geometrického modelu stroje pro prostředí Maxwell 2D a Maxwell 3D. [22]

Z knihovny šablon modelů strojů byl vybrán Třífázový asynchronní stroj. Následně byly zadány do šablony Machine základní parametry stroje – počet pólů, koeficient dodatečných ztrát, ztráty třením a ztráty ventilační a referenční otáčky, viz Obrázek 63.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Machine Type	Three Phase Induction Motor		
Number of Poles	2		
Stray Loss Factor	0.01		0.01
Frictional Loss	10.02	W	10.02W
Windage Loss	5.01	W	5.01W
Reference Speed	3000	rpm	

Obrázek 63: RMxpert: Zadané parametry v šabloně Machine

Parametry statoru byly definovány v šabloně Stator, ve které byly nejprve zadány základní parametry statoru – vnější a vnitřní průměr, délka statoru, činitel plnění statoru, materiál magnetického obvodu, počet statorových drážek a typ statorové drážky. Dále byly v podkategorii Slot zadány geometrické rozměry drážky statoru vybraného typu statorové drážky a v podkategorii Winding byly určeny parametry vinutí – počet vrstev, typ vinutí, počet paralelních větví, počet vodičů na drážku, počet drátů na vodič, tloušťka izolace vodiče, průměr vodiče, poloviční délka jednoho závitu, tloušťka klínu v drážce a činitel plnění drážky. Na Obrázku 63 je zobrazeno nastavené rozložení statorového vinutí.



Obrázek 64: RMxppt: Rozložení satorového vinutí

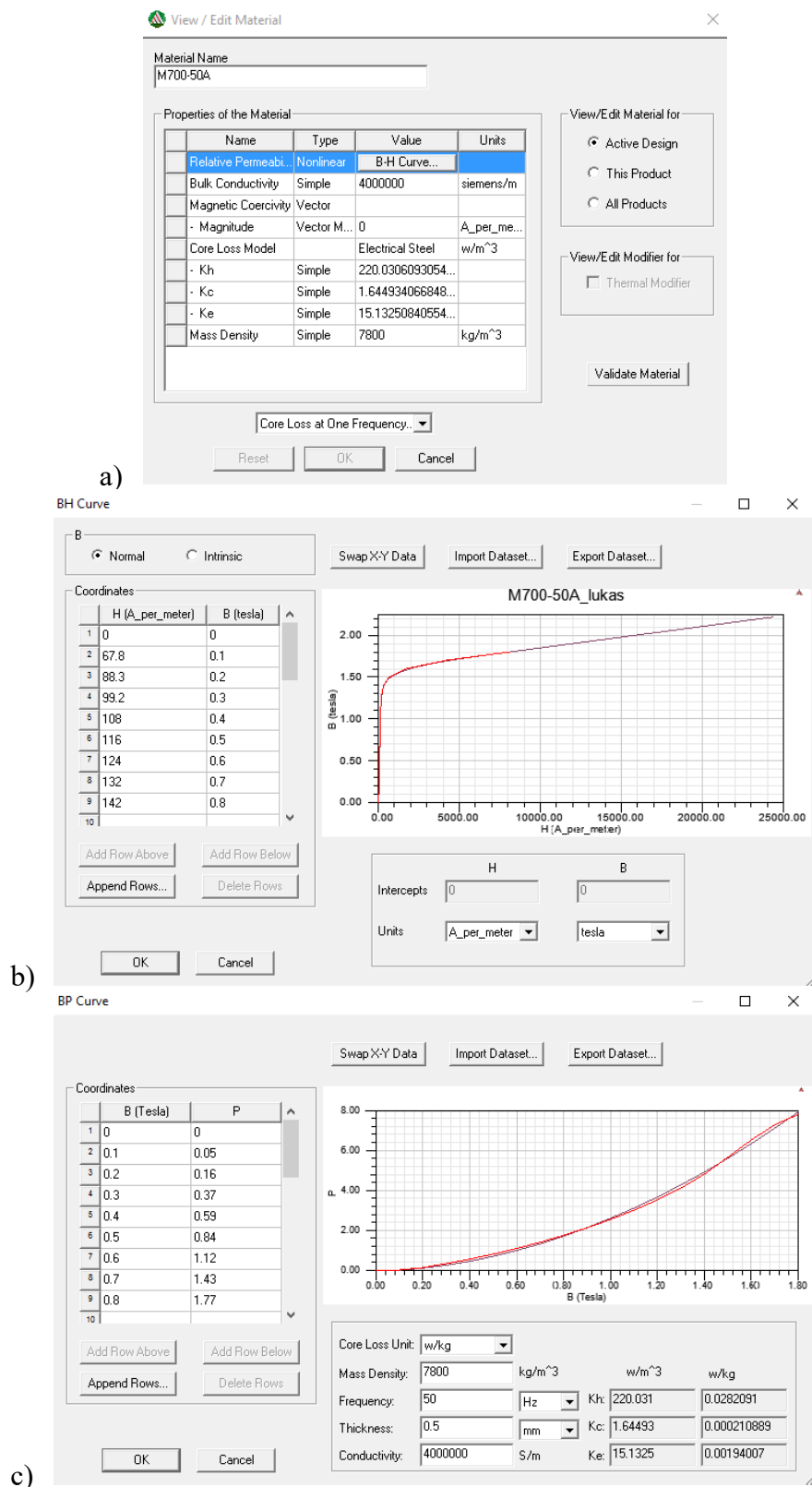
Parametry rotoru byly definovány v šabloně Rotor, ve které byly nejprve zadány základní parametry statoru – činitel plnění železa, počet drážek rotoru, typ rotorové drážky, vnější a vnitřní průměr, délka rotoru, materiál magnetického obvodu rotoru, natočení drážek a odlévání typ klece rotoru. Dále byly v podkategorii Slot zadány geometrické rozměry drážky rotoru vybraného typu rotorové drážky, a v podkategorii Winding byly určeny parametry vinutí – materiál rotorových tyčí, šířka, výška a materiál spojovacího kruhu rotorových tyčí.

Magnetickému obvodu statoru a rotoru byl přiřazen materiál v podobě neorientovaných elektrotechnických plechů M700-50A. Vlastnosti materiálu byly získány z informací datasheetu od výrobce Cogent [23]. Materiál plechů M700-50A byl definován na základě znalostí $B = f(H)$ křivky při $f=50$ Hz, $B = f(P)$ křivky při $f=50$ Hz, vodivosti plechů a hustoty materiálu. Definování materiálu M700-50A v programu RMxppt je zobrazeno na Obrázku 66.

V šabloně Analysis bylo provedeno nastavení typu chodu, typu zátěže, jmenovitého výkonu, hodnoty napájecího napětí, propojení satorových svorek, jmenovité otáčky a pracovní teplota stroje. Nastavení analýzy je zobrazeno na Obrázku 65.

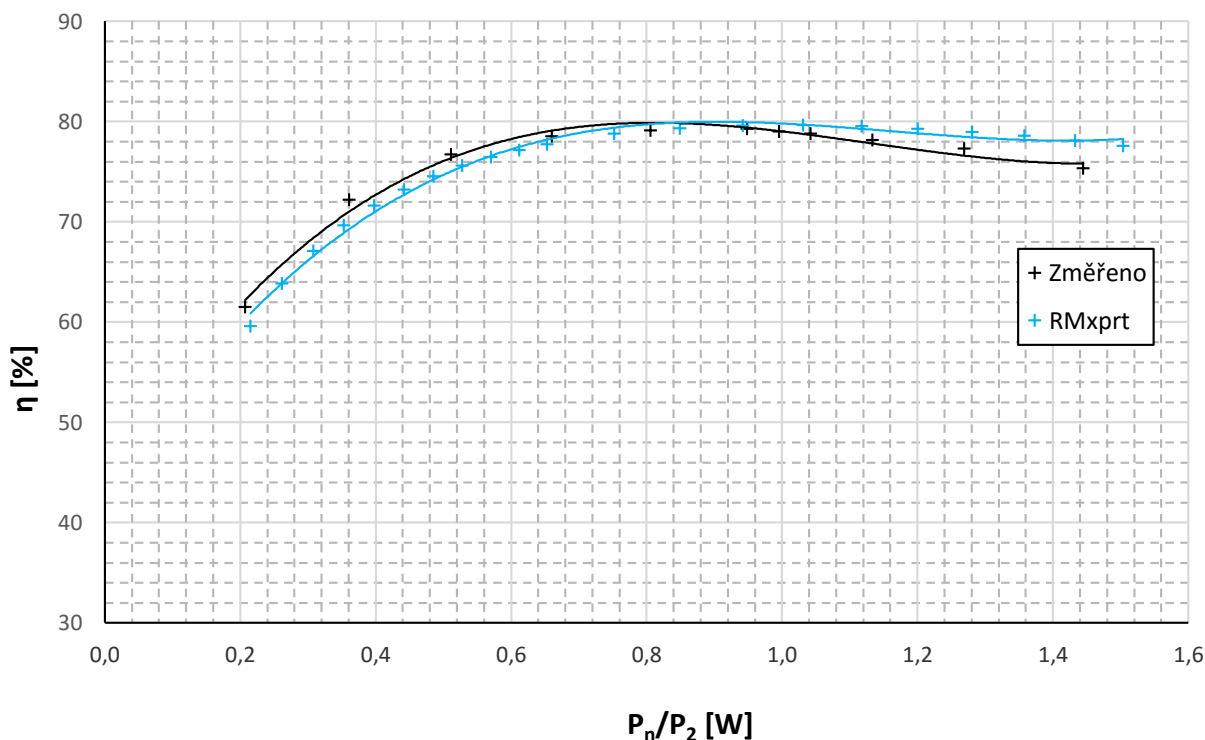
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name	Setup1		
Enabled	☒		
Operation Type	Motor		
Load Type	Const Power		
Rated Output P...	600	W	600W
Rated Voltage	399	V	399V
Rated Speed	2830	rpm	2830rpm
Operating Tem...	75	cel	75cel

Obrázek 65: RMxppt: Nastavení parametrů výpočtu

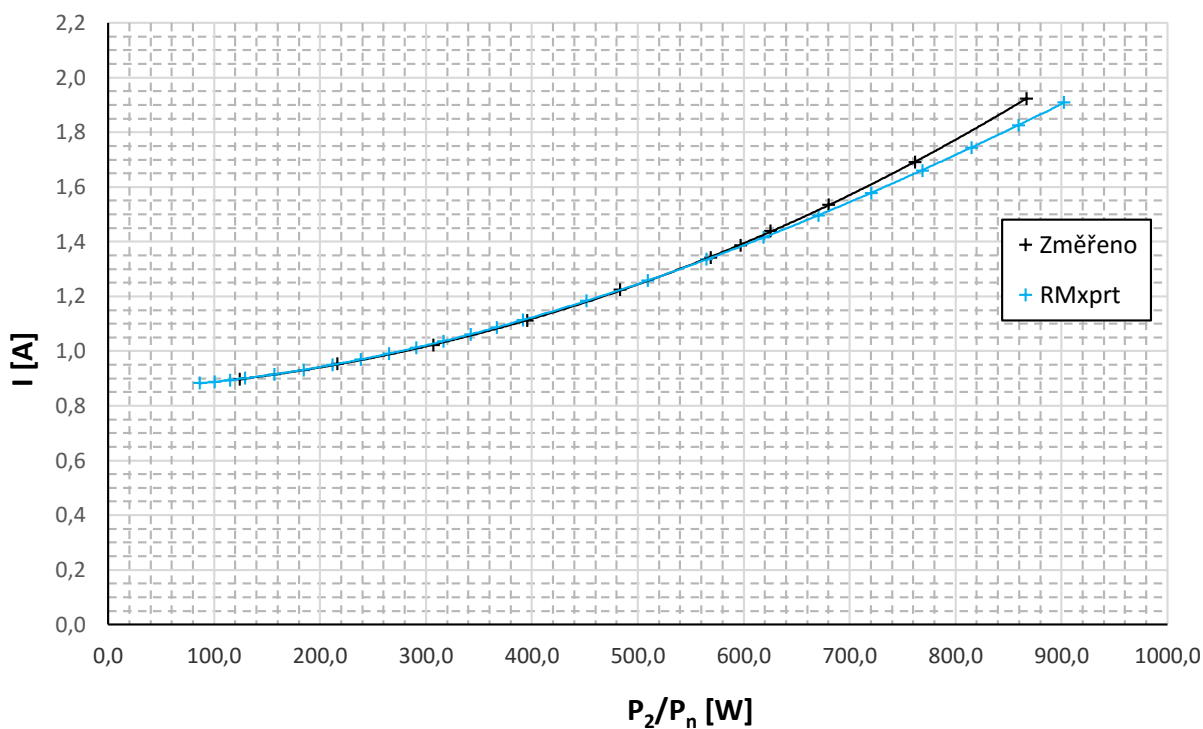


Obrázek 66: RMxpert: Definování vlastností plechů M700-50A. a) Hlavní okno b) $B=(H)$ křivka
c) $B=f(P)$ křivka

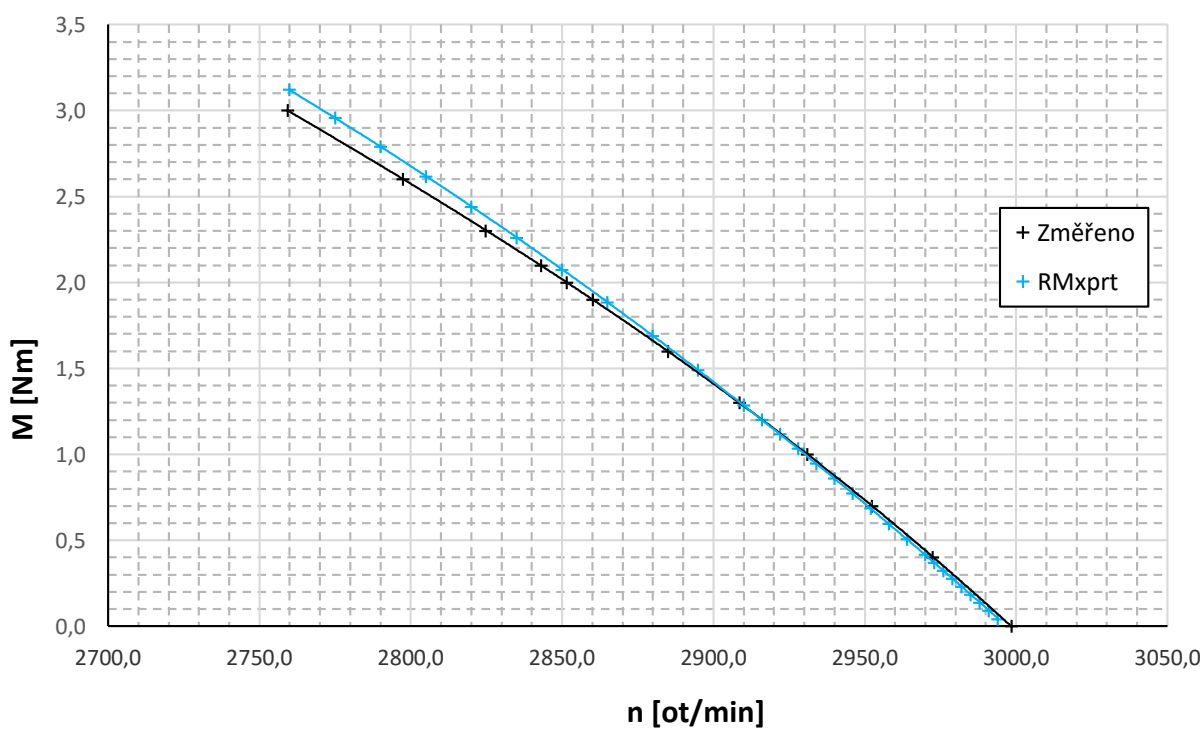
Výsledky výpočetní analýzy v RMxpřt byly použity ke srovnání s hodnotami získanými z měření reálného stroje. Srovnání lze pozorovat v grafech na Obrázcích 67, 68, 69 a v Tabulkách 11 a 12. V Grafu na Obrázku 58 lze pozorovat, že účinnost modelu stroje vytvořeného RMxpřt se nejvíce blíží měřenému stroji v okolí jmenovitého zatížení, kde se přibližně křivky protínají. Graf na Obrázku 59 zobrazuje závislost odebíraného proudu na zatížení, kde dochází se zvětšujícím se zatížením k větší odchylce od měřeného stroje. V Tabulce 11 je provedeno srovnání některých parametrů při chodu naprázdno, kde je patrně největší rozdíl v hodnotě ztrát v železe, což může být zapříčiněno “idealizováním“ plechů magnetického obvodu. Z poznatků například v literatuře [26] plyne, že vlastnosti magnetického obvodu jsou ovlivněny mnoha faktory při výrobě magnetických obvodů. Pokud jsou použity charakteristické vlastnosti elektrotechnických plechů od výrobce, v RMxpřt je možné dále ztráty v železe ovlivnit pouze činitelem plnění železa. V Tabulce 12 je provedeno srovnání některých parametrů při jmenovitém zatížení, kde je vidět patrný rozdíl ve ztrátách ve vinutí statoru. Tento rozdíl je zřejmě způsoben rozdílem odporů statorového vinutí. Z měření byla získána hodnota odporu $R_{Směř} = 13,202 \Omega$ a ve výpočtu RMxpřt $R_{SRMxpřt} = 11,95 \Omega$. V RMxpřt by mělo být možné zkorrigovat hodnotu odporu statorového vinutí na poměrně přesnou hodnotu pomocí záložky End/Insulation, kde je možné podrobně nastavit rozměry čela vinutí. V tomto konkrétním případě bylo vinutí statoru definováno na základě technické dokumentace stroje, kde byly dostupné pouze informace pro určení střední délky závitu. Z porovnání parametrů modelu vytvořeného v RMxpřt a parametrů měřeného stroje vyplývá, že se simulovaný model přibližně podobá reálnému stroji Atas T22VT512.



Obrázek 67: Srovnání RMxpřt s měřením: závislost účinnosti na výkonu



Obrázek 68: Srovnání RMxpřt s měřením: závislost odebíraného proudu na výkonu



Obrázek 69: Srovnání RMxpřt s měřením: momentová charakteristika

	U _{avg} [V]	I _{avg} [A]	S [VA]	P [W]	cosφ [-]	ΔP _{Fe} [W]
Změřeno	399,40	0,879	607,98	85,66	0,141	40,97
RMxp _{rt}	399,00	0,864	608,75	84,80	0,139	35,50
Δ	-0,40	-0,015	0,77	-0,86	-0,002	-5,47

Tabulka 11: Srovnání RMxp_{rt} s měřením: stav naprázdno

	M [Nm]	n [min ⁻¹]	I _{avg} [A]	S [VA]	P [W]	cosφ [-]	ΔP _s [W]	ΔP _m [W]	ΔP _{Fe} [W]	ΔP _r [W]	ΔP _{LL} [W]	P ₂ [W]	η [%]
Změřeno	2,00	2851,60	1,370	958,79	755,95	0,788	76,15	15,32	34,27	31,93	1,04	597,24	79,00
RMxp _{rt}	2,01	2855,33	1,387	978,26	753,26	0,770	68,97	15,25	31,89	31,89	6,00	599,98	79,65
Δ	0,01	3,73	0,017	19,47	-2,69	-0,018	-7,18	-0,07	-2,38	-0,04	4,96	2,74	0,65

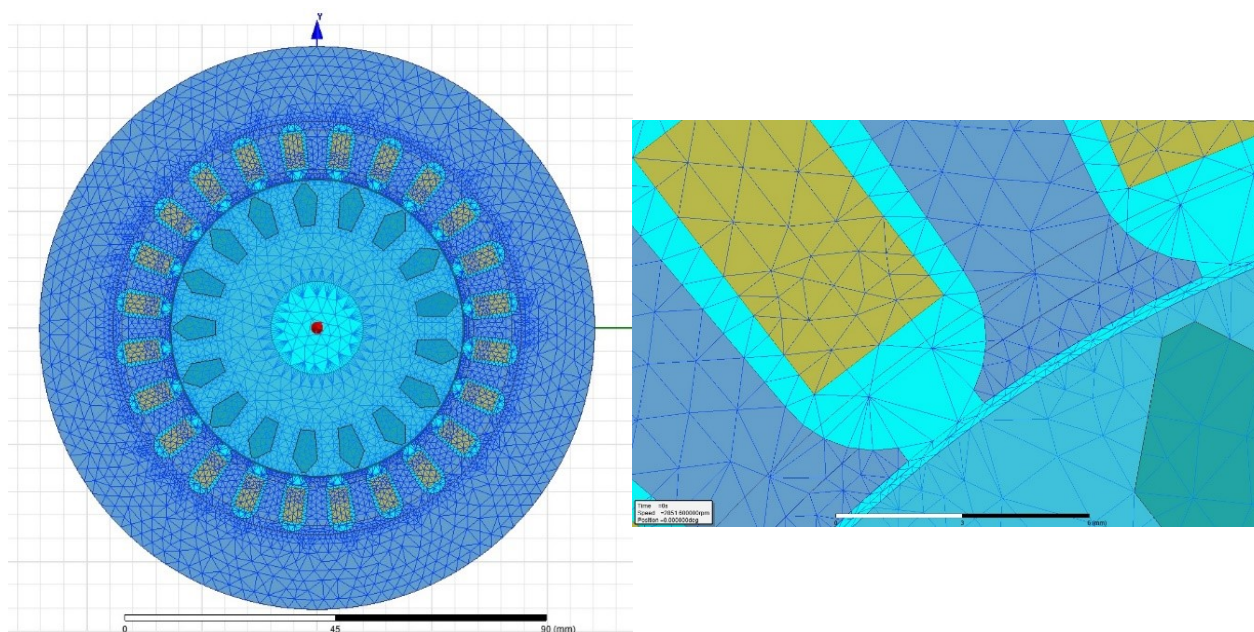
Tabulka 12: Srovnání RMxp_{rt} s měřením: jmenovité zatížení

4.2 Maxwell 2D

Po vytvoření modelu a provedení výpočtu motoru ATAS T22VT512 prostřednictvím RMxp_{rt}, byla s výhodou využita možnost exportu modelu do Maxwell 2D prostředí.

Maxwell 2D (3D) je vysoce interaktivní software využívající metodu konečných prvků k výpočtu elektrických a magnetických polí zkoumaného objektu. Výpočty jsou prováděny na základě řešení Maxwellových rovnic v jednotlivých elementech sítě. [25]

Po exportu do Maxwell 2D byl model upraven. Nejprve byla provedena úprava v podobě rozdělení magnetického obvodu statoru na tři části – jho, zuby a vrstva na zubech statoru o tloušťce 1 mm. Tyto úpravy byly provedeny hlavně z důvodu efektivnějšího nastavení výpočetní sítě mesh. Upravena byla také vzduchová mezera. Po exportu z RMxp_{rt} tvoří polovinu vzduchovou mezery oblast Band, která slouží k definování rotující oblasti. Druhá polovina mezery je vyplněna oblastí Outer Region, která vyplňuje kromě vzduchové mezery také prostor v okolí statorového vinutí. Pro lepší rozložení výpočetních elementů byla přidána další oblast oddělující zmíněnou vzduchovou oblast v okolí vinutí. Mesh byla po exportu nastavena automaticky, ale bohužel velice neefektivně. Kromě počátečních podmínek určující rozložení mesh, byly definovány další podmínky omezující maximální délku elementu v určitých oblastech. Neefektivní nastavení výpočetní sítě může v podobě malých rozměrů elementů způsobit zbytečně časově náročný výpočet. Naopak při velkých rozměrech elementů, může docházet ke zkreslení výpočtu, což způsobuje chybu výsledků. Nastavená mesh je zobrazena na Obrázku 70. Celkový počet elementů této sítě je 16 652.



Obrázek 70: Nastavená mesh - celkový pohled a detail v okolí vzduchové mezery

Po exportování z RMxprt je také důležité zkontrolovat definování materiálů. Po exportu se automaticky změnila vlastnosti materiálu plechů magnetického obvodu, které byly již definovány v RMxprt. Bylo nutné tedy opět definovat charakteristiky $B = f(H)$ a $B = f(P)$ na hodnoty udávané výrobcem plechu. Otáčky rotoru byly napevno zadány v kartě Motion Setup na hodnotu změřených otáček $n = 2851,6$. Otáčky v simulaci byly definovány na stejnou hodnotu jako otáčky reálného stroje ATAS T22VT512 při jmenovitém zatížení.

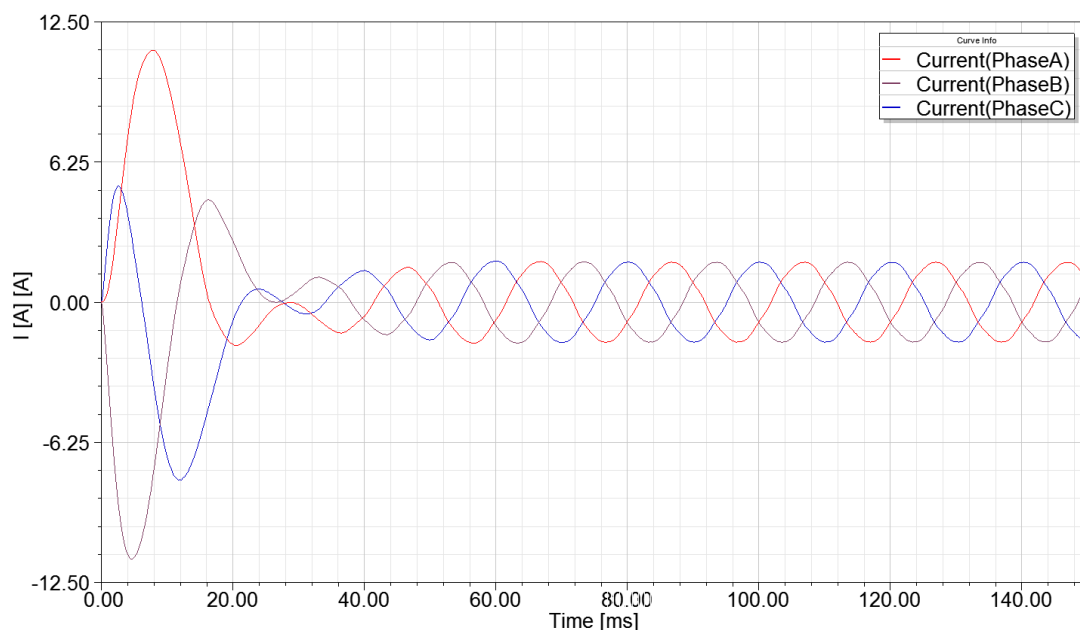
Nastavení analýzy bylo provedeno v kartě Solve Setup. Délka doby výpočtu byla nastavena na hodnotu 150 ms s krokem 0,1 ms. K dosažení hladkých průběhů veličin je nutné krok výpočtu volit s ohledem na délku periody napájecího napětí, v tomto případě bylo dosaženo 200 kroků na jednu periodu. Délka doby výpočtu je zvolena s ohledem na počáteční přechodový jev. Ukládání elektrických a magnetických polí bylo prováděno s krokem 0.5 ms.

Po provedení analýzy v Maxwell 2D je vhodné provést ověření správnosti výpočtu pomocí parametru Power balance, který představuje procentuální chybu mezi průměrným příkonem a výkonem analyzovaného objektu. V případě motoru je power balance dán vztahem

$$P. B. = \frac{P_1 - P_2 - P_{Eloss}}{P_1} 100, \quad (52)$$

kde P_1 je příkon, P_2 výkon na hřídeli a P_{Eloss} je suma všech elektrických ztrát [24]. V této analýze power balance dosahuje hodnoty $P. B. = 1,13 \%$, z čehož plyne, že analýza není zatížena žádnou zásadní chybou způsobenou např. nastavováním rozložení mesh nebo krokem výpočtu.

Z grafu satorových proudů, viz Obrázek 71, je zřetelné, že k ustálení přechodného jevu došlo přibližně v čase $t = 60$ ms.



Obrázek 71: Maxwell 2D: Průběhy statorových proudů

Při vyhodnocování v Maxwell 2D je možné zobrazovat některé průběhy veličin přímo, nebo je možné na základě známých veličin dopočítat neznámé veličiny definováním matematických funkcí při vytváření reportů.

Tabulka 13 obsahuje porovnání vybraných parametrů získaných z měření reálného stroje a simulace pomocí Maxwell 2D. Parametry použité ve srovnání s reálným strojem jsou spočítány jako průměrné hodnoty průběhů veličin v časovém intervalu 130 – 150 ms. Moment stroje a s ním i výkon stroje byl snížen o mechanické ztráty, jelikož nebyly nikde v simulaci zahrnuty.

Z Tabulky 13 je zřejmé, že se parametry reálného a simulovaného stroje liší. Odlišnost je dána hlavně srovnáváním rozdílných zatěžovacích bodů. Pro korektní srovnání ztrát by musel být výstupní výkon simulovaného stroje stejný jako změřený výkon reálného stroje. Tato skutečnost ovlivňuje ostatní srovnávané parametry.

V simulaci byl použit vygenerovaný odpor statorového vinutí z RMxpřt $R_{SRMxpřt} = 11,95 \, \Omega$, což způsobuje další odlišnosti.

	M	n	I_{avg}	S	P	$\cos\varphi$	ΔP_s	ΔP_m	ΔP_{Fe}	ΔP_r	ΔP_{LL}	P_2	η
	[Nm]	[min ⁻¹]	[A]	[VA]	[W]	[-]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]
Změřeno	2,00	2851,60	1,370	958,79	755,95	0,788	76,15	15,14	34,27	31,93	1,04	597,24	79,00
Maxwell 2D	2,08	2851,60	1,253	866,12	733,69	0,847	56,49	15,14	27,58	12,58	0	622,10	83,40
Δ	0,01	0,00	-0,117	-92,67	-22,26	0,059	-19,66	0,00	-6,89	-19,35	-1,04	24,86	4,40

Tabulka 13: Srovnání Maxwell 2D s měřením: jmenovité zatížení

Je důležité zmínit také fakt, že v simulaci stroje byla provedena řada zjednodušení. Mezi hlavní zjednodušující okolnosti lze zařadit:

- Zjednodušení konstrukce
- Neuvažování vlivu technologie výroby na magnetický obvod
- Neznalost přesných vlastností použitých plechů

U reálného motoru ATAS T22VT512 je statorový svazek nýtován. Pro snýtování statorových plechů jsou ve statorovém svazku provedeny čtyři otvory. Nýtování se projeví jednak ve změně magnetického obvodu statoru, ale také nýty společně s plechy statoru tvoří klec nakrátko, čímž zvyšují ztráty v železe statoru.

Vnější obvod statorového svazku reálného motoru není kruhový, tak jako v simulaci, ale obsahuje čtyři zkosení a vodící drážky usnadňující skládání svazku při výrobě. Tyto konstrukční uzpůsobení statorového svazku mají přímý vliv na parametry motoru.

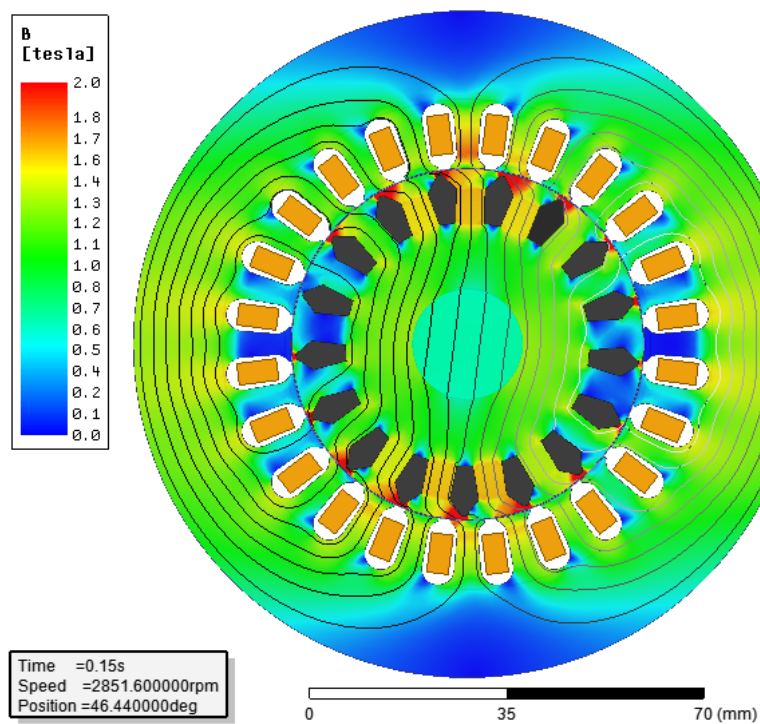
V simulaci není nijak zahrnut vliv technologie zpracování plechů magnetického obvodu. V literatuře [26] je dokázáno, že technologie výroby elektrotechnických plechů výrazně ovlivňuje parametry elektrického stroje. Na vlastnosti elektrotechnických plechů má vliv způsob zpracování (stříhání, řezání laserem aj.) ale i manipulace a přeprava. Vlivem stříhání, popřípadě jiného technologického postupu, dochází ke zhoršení magnetické vodivosti v okolí stříhu. Vliv stříhu se může projevovat až do hloubky 10 mm. Zhoršení vlastností magnetického obvodu, vlivem technologie zpracování, se může značně projevit u malých strojů, kam lze zařadit i měřený motor ATAS T22VT512. U motorů malých výkonů jsou rozměry zubů statoru poměrně malé ve srovnání s hloubkou, do které může být vlivem zpracování materiál poškozen.

Dalším problémem v simulaci může být nepřesnost charakteristik $B = F(H)$ a $B = f(P)$, udávaných výrobcem elektrotechnického plechu. Charakteristiky se mohou lišit vlivem tolerance a přepravy, kdy je materiál vystaven mechanickému namáhání. [26]

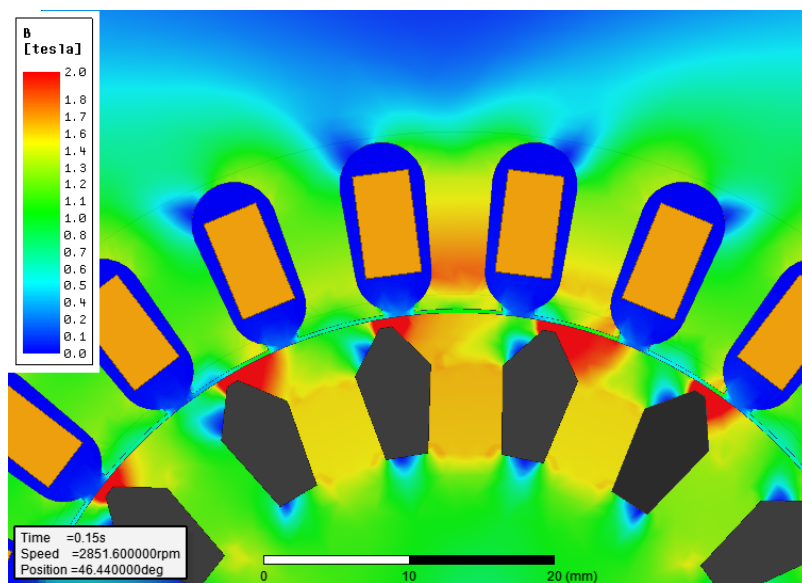
Z důvodu mnoha faktorů, které mohou ovlivnit odlišnost simulovaného a reálného stroje, a rozsahu této práce, nebyla dále snaha přiblížit se simulaci v Maxwell 2D reálnému stroji.

Na Obrázku 72 je zobrazeno rozložení magnetické indukce v řezu stroje v čase 150 ms. Siločáry slouží k interpretaci cest magnetického toku. Z Obrázku 72 je vidět, že největší hodnota magnetické indukce je v nejužších místech magnetického obvodu kde se uzavírá magnetický tok. Detail přesycované oblasti je zobrazen na Obrázku 73.

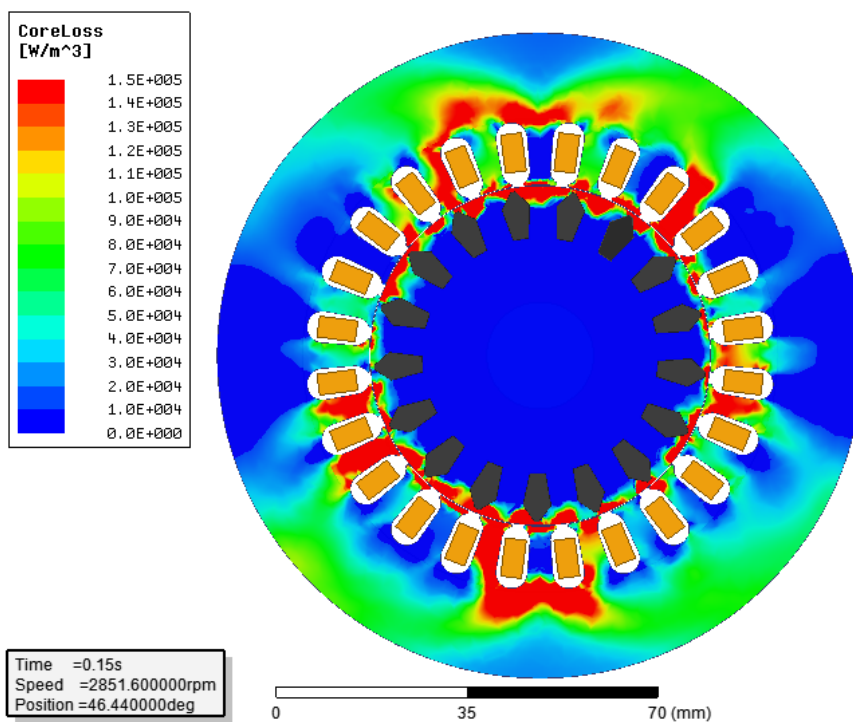
O ztrátách v železe magnetického obvodu dobře vypovídá Obrázek 74, kde je zobrazeno rozložení měrných ztrát v řezu stroje. Ve statorovém magnetickém obvodu se projevují ztráty vlivem velikosti magnetické indukce i frekvence. V magnetickém obvodu rotoru jsou naopak ztráty v železe nulové, vlivem skluzové frekvence. Ovšem, na povrchu rotoru jsou ztráty vlivem přesycení vysoké – úměrné magnetické indukci, viz Obrázek 72 a 73.



Obrázek 72: Maxwell 2D: Rozložení magnetické indukce



Obrázek 73: Maxwell 2D: Rozložení magnetické indukce - detail



Obrázek 74: Maxwell 2D: Rozložení měrných ztrát v železe

ZÁVĚR

V úvodu této práce, viz kapitola 1.1, je nejprve pojednáno o možnostech využití automatizovaného měření v oblasti asynchronních strojů. V kapitole 1.1 jsou představeny tři možné aplikace automatizovaného měření:

- určení ztrát asynchronního stroje a jeho účinnosti
- určení parametrů náhradního zapojení asynchronního stroje
- diagnostika poruch asynchronního stroje

V Kapitole 1.2 je provedena rešerše na téma ztrát v elektrickém stroji se zaměřením na asynchronní stroj. V této kapitole jsou popsány ztráty ve vinutí, ztráty v magnetickém obvodu stroje, mechanické ztráty a dodatečné ztráty.

Kapitola 1.3 se zabývá způsoby provádění zkoušek asynchronního stroje dle normy IEE 112.

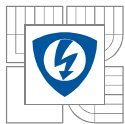
V kapitole 1.4 je teoreticky popsána metoda měření činného výkonu pomocí dvou wattmetrů, která je principiálně využita ve vytvořeném měřicím programu.

V kapitole 2 je představen vytvořený měřicí program, který byl naprogramován ve vývojovém programovacím prostředí LabVIEW. Vytvořený program sloužící spolu s vytvořeným měřicím pracovištěm k provádění zkoušek na asynchronním stroji. V kapitole 2 je nejprve popsán podrobně front panel, který představuje uživatelské rozhraní programu. V návaznosti na uživatelské prostředí je popsán block diagram, který představuje algoritmus vytvořeného programu. Vytvořený program disponuje těmito funkcemi:

- možnost volby měření jednofázového nebo třífázového motoru
- měření charakteristik při vykonávání zatěžovací zkoušky, zkoušky naprázdno, zkoušky nakrátko a oteplovací zkoušky
- sledování ustálení vstupních veličin – napětí a proud
- automatické zaznamenávání bodů měřených charakteristik s volbou podmínky ustálení

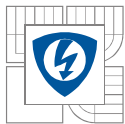
V rámci diplomové práce bylo provedeno praktické měření dvou asynchronních motorů za účelem ověření funkčnosti vytvořeného programu a provedení zkoušek, na základě kterých byl proveden rozbor ztrát. V kapitole 3.1 je na základě změřených dat pomocí vytvořeného měřicího programu proveden rozbor ztrát sériově vyráběného dvoupólového asynchronního motoru Atas T22VT512. Rozdělení ztrát motoru Atas T22VT512 je při jmenovitém zatížení následující:

- ztráty vlivem odporu vinutí statoru - 48,0 %
- ztráty v železe magnetického obvodu - 21,6 %
- ztráty vlivem odporu vinutí rotoru - 20,1 %
- mechanické ztráty – ventilační a v ložiscích - 9,5 %
- dodatečné ztráty - 0,8 %



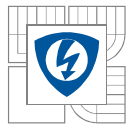
V kapitole 3.2 je provedeno srovnání vytvořeného měřicího systému s analyzátozem YOKOGAWA 1600WT, který byl v měření považován za referenční. V této kapitole je pojednáno o možných faktorech, které mohou ovlivňovat přesnost vytvořeného měřicího systému.

V této práci byl také proveden elektromagnetický výpočet motoru Atas T22VT512 pomocí výpočtového softwaru Ansys Maxwell. Výpočet byl proveden pomocí dvou principiálně odlišných programů. Nejprve byl proveden výpočet motoru pomocí analytického výpočtu v RMXprt, viz kapitola 4.1. V návaznosti na analytický výpočet motoru byla provedena 2D simulace pomocí metody konečných prvků v programu Maxwell 2D, viz kapitola 4.2. U obou výpočtů je provedeno srovnání s měřením reálného stroje. V RMXprt bylo dosaženo u analytického modelu přibližně podobných vlastností jako u reálného stroje. Podobnost plyne ze srovnání zatěžovací charakteristiky a chodu naprázdno. Simulace v Maxwell 2D se poněkud liší od reálného stroje, což je způsobeno řadou zjednodušujících předpokladů, o kterých je pojednáno v kapitole 4.2.



LITERATURA

- [1] PAČES, Pavel. *Krátké doporučení pro tvorbu akademických prací: Automatizované měření* [online]. 2010, s. 24 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.pacespavel.net/Skola/fileDownload/PacesJakNaAutomatizovaneMereni.pdf>
- [2] CALIS, Hakan a Eyup CAKI. *LabVIEW Based Laboratory Typed Test Setup for the Determination of Induction Motor Performance Characteristics*. Journal of Electrical Engineering and Technology [online]. 2014, 9(6), 1928-1934. ISSN 19750102. Dostupné z: <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=E1EEFQ&py=2014&vnc=v9n6&sp=1928>
- [3] JOSEPH, R. Allen, T. NARASIMMALOU, K. BASKARAN a Anuj ABRAHAM. *Automated efficiency measurement of three phase induction motor using LabVIEW*. In: *2013 International Conference on Computer Communication and Informatics* [online]. IEEE, 2013, s. 1-5. ISBN 9781467329071. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6466110>
- [4] SONNAILLON, M.O., G. BISHEIMER, C. De ANGELO a G.O. GARCÍA. *Automatic induction machine parameters measurement using standstill frequency-domain tests*. IET Electric Power Applications [online]. 2007, 1(5). ISSN 17518660. Dostupné z: http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-epa_20060512
- [5] KYUNG-SEO, Kim a Byun SUNG-HOON. *Auto-Measurement of Induction Motor Parameters*. Journal of Electrical Engineering and Technology [online]. 2006, 1(2), 226-232 [cit. 2016-05-22]. ISSN 19750102. Dostupné z: <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=E1EEFQ&py=2006&vnc=v1n2&sp=226>
- [6] BEZDÍČEK, Jan. Diagnostika asynchronních motorů. AUTOMA [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=32229
- [7] BULÍN, T. *Zařízení pro diagnostiku asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Rostislav Huzlík.
- [8] ABITHA, Memala.W a V. RAJINI. *Induction motor fault diagnosis using labview*. In: *2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)* [online]. IEEE, 2013, s. 176-179. ISBN 9781467349222. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6528826>
- [9] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. 1. Praha: BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [10] KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické pohony*. VUT, rok vydání neznámý. Skriptum.
- [11] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. 2. Chichester: John Wiley & sons Ltd., 2014. ISBN 978-118-58157-5.



- [12] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. 1. Praha: SNTL, 1988.
- [13] FITZGERALD, Artur Eugene. *Electric Machinery*. 6. New York: McGraw-Hill, 2005. ISBN 0-07-366009.
- [14] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. Brno: VUT, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [15] WEPING, Cao. Comparison of IEEE 112 and new IEC Standard 60034-2-1. *Energy Conversion*. 2009, 2009(3): 802-808. ISSN 0885-8969.
- [16] *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators: IEEE 112*. New York: IEEE, 2004.
- [17] *Měření na elektrických strojích*. Praha: České vysoké učení technické, 1970, 99 s.
- [18] BEJČEK, Ludvík. *Měření v elektrotechnice*. VUT, datum neznámé. Skriptum.
- [19] *National Instruments* [online]. [cit. 2016-04-1]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz.html>
- [20] *Datasheet IT-60 ULTRASTAB* [online]. In: . 3. LEM, 2014, s. 8 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: http://www.lem.com/docs/products/it_60-s_ultrastab.pdf
- [21] 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.
- [22] *Ansoft Announces RMxprt; Dedicated Software for Rotating Electric Machine Design*. PR Newswire [online]. New York, 1999, , 1. Dostupné z: <http://search.proquest.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/docview/449527041?accountid=17115>
- [23] *Typical data for SURA M700-50A* [online]. [cit. 2016-05-2]. Dostupné z: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m700-50a.pdf>
- [24] BÁRTA, Jan a Čestmír ONDRŮŠEK. *Finite Element Analysis of High-Speed Solid Rotor Induction Machine with Copper Cage* [online]. s. 195 [cit. 2016-05-24]. DOI: 10.1007/978-3-319-23923-1_29. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-23923-1_29
- [25] *ANSYS Maxwell V16 Training Manual*: [online]. [cit. 2016-05-1]. Dostupné z: <http://ansoft-maxwell.narod.ru/english.html>
- [26] MACH, M. *Analýza ztrát asynchronních motorů malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 120 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..