

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

TEPLOTNÍ ANALÝZA ASYNCHRONNÍHO STROJE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

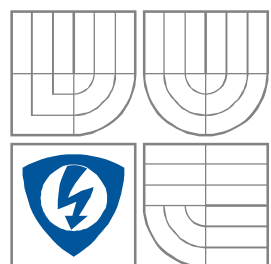
Bc. MILAN STRMEŇ

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

TEPLOTNÍ ANALÝZA ASYNCHRONNÍHO STROJE

TEMPERATURE ANALYSIS OF ASYNCHRONOUS MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MILAN STRMEŇ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARCEL JANDA, Ph.D.

BRNO 2011



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. Milan Strmeň

ID: 76155

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měření teploty v elektrických strojích pomocí LabVIEW

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s programem LabVIEW a teoretickými postupy měření teploty
2. Vytvořte program pro měření teploty s pomocí termočlánku
3. Proveďte měření a vyhodnoťte přesnost vytvořené měřicí soustavy

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá využitím virtuální instrumentace programu LabView jako nástroje pro teplotní měření na povrchu asynchronního motoru. Její součástí je také zvládnutí problematiky měření pomocí termočlánků. Především přepočítá termoelektrického napětí na teplotu. Výstupem práce je program, který měří a požadovanou formou zobrazuje a zaznamenává hodnoty teploty ze čtyř paralelních větví termočlánků.

Abstract

This work deals with using of virtual instrumental program LabView as a tool for thermal measuring at the surface of asynchronous engine. Its part is managing of problems of measuring by the aid of thermocouple, mainly conversion of thermoelectric voltage on temperature. The product of work is program which measures and displays required form and records values of temperature from four parallel branches of thermocouples.

Klíčová slova

Měření teploty, asynchronní motor, teplota, termočlánek, LabView, termokamera.

Keywords

Temperature measuring, asynchronous motor, temperature, thermoelement, LabView, thermovision.

Bibliografická citace

Strmeň, M. Teplotní analýza asynchronního stroje. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, vysoké učení technické v Brně, 2011. 54 s. Vedoucí diplomové práce ing. Marcel Janda, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Teplotní analýza asynchronního stroje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

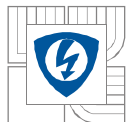
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce ing. Marcelu Jandovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce. A rodině bez jejíž podpory by studium nebylo možné.

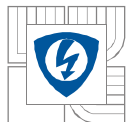
V Brně dne

Podpis autora

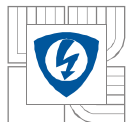


OBSAH

1 ÚVOD	12
2 ZÁKLADNÍ POJMY	13
2.1 TEPLOTA	13
2.2 TEPLLO	13
2.3 TEPLOTNÍ STUPNICE	13
2.4 SENZOR TEPLoty	14
2.5 EMISIVITA	14
2.5.1 ZÍSKÁNÍ HODNOTY EMISIVITY.....	14
3 ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA	15
3.1 PŘENOS TEPLA VEDENÍM	15
3.2 SDÍLENÍ TEPLA KONVEKČÍ (PROUDĚNÍM)	16
3.3 PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM (SÁLÁNÍM)	16
4 MĚŘENÍ TEPLoty	18
4.1 KONTAKTNÍ (DOTYKOVÉ) MĚŘENÍ TEPLoty	18
4.1.1 TERMISTORY	18
4.1.2 TERMOELEKTRICKÉ DETEKTORY	19
4.1.3 VLASTNOSTI A POUŽITELNOST VYBRANÝCH TERMOELEKTRICKÝCH ČLÁNKŮ	20
4.1.4 INDIKÁTORY TEPLoty	21
4.2 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty	22
4.2.1 TERMOVIZE	22
4.2.2 VÝHODY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty	23
4.2.3 NEVÝHODY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty	23
5 ASYNCHRONNÍ MOTOR	24
5.1 PRINCIP ČINNOSTI	24
5.2 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ AS MOTORU S KLECOVÝM ROTOREM	25
5.3 MOTOR S KROUŽKOVÝM ROTOREM	25
5.4 ROZDĚLENÍ TOKU VÝKONU	26
5.5 VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH ZTRÁT	27
5.6 CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ	27
5.6.1 STROJE S PŘIROZENÝM CHLAZENÍM	27
5.6.2 STROJE S VLASTNÍM CHLAZENÍM	28
5.6.3 STROJE S CIZÍM CHLAZENÍM	28
6 3D-MODEL MOTORU	29
7 LAB VIEW	31
7.1 PŘEDSTAVENÍ PROGRAMU	31
7.2 POPIS VYBRANÝCH PANELŮ	32
7.2.1 PALETA TOOLS	32
7.2.2 PALETA CONTROLS	33
7.2.3 SUBPALETA EXPRESS	33



7.2.4 PALETA FUNCTION	33
7.2.5 SUBPALETA STRUCTURES	34
7.3 PRÁCE V LABVIEW	35
8 MĚŘENÍ OTEPLENÍ NA ASYNCHRONNÍM MOTORU POMOCÍ PROGRAMU LABVIEW	36
8.1 PŘEPOČET TERMoeLEKTRICKÉHO NAPĚTÍ NA TEPLITU	36
8.2 PROVEDENÍ PŘEPOČTU V PROGRAMU	36
8.3 MĚŘÍCÍ KARTA USB 6251	37
8.4 ČELNÍ PANEL VIRTUÁLNÍHO MĚŘÍCÍHO PŘÍSTROJE.....	38
8.5 POPIS BLOKOVÉHO SCHÉMATU	39
8.5.1 NASTAVENÍ DAQ ASSISTANTU.....	39
8.6 KOREKČNÍ KŘIVKA	44
8.7 VÝSTUPY MĚŘENÍ.....	46
8.7.1 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT Z TERMOKAMERY	47
9 SHRNU TÍ.....	50
10 ZÁVĚR.....	53
LITERATURA.....	54

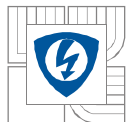


SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3.1.: Přestup tepla[3]</i>	15
<i>Obr. 4.1.: Izotermy tělese a okolí při měření dotykovým snímačem[2]</i>	18
<i>Obr. 4.2.: Seebeckův jev</i>	19
<i>Obr. 4.3.: Charakteristiky vybraných termoelektrických článků[2]</i>	20
<i>Obr. 4.4.: Indikátor teploty[5]</i>	21
<i>Obr. 5.1.: Asynchronní motor</i>	25
<i>Obr. 6.1.: 2D- řez motoru</i>	29
<i>Obr. 6.2.: 3D-model motoru</i>	30
<i>Obr. 6.3.: 3D-model motoru v LabView</i>	30
<i>Obr. 7.1.: Front panel</i>	31
<i>Obr. 7.2.: Blokový diagram</i>	32
<i>Obr. 7.3.: Paleta Tools</i>	32
<i>Obr. 7.4.: Paleta Controls</i>	33
<i>Obr. 7.5.: Subpaleta Express</i>	33
<i>Obr. 7.6.: Paleta Function</i>	34
<i>Obr. 7.7.: Subpaleta Structures</i>	34
<i>Obr. 8.1.: Měřicí karta USB 6251 [8]</i>	37
<i>Obr. 8.2.: Svorkovnice pro připojení měřených vstupů[8]</i>	37
<i>Obr. 8.3.: Čelní panel virtuálního měřícího přístroje</i>	38
<i>Obr. 8.4.: Nastavení DAQ Assistantu</i>	39
<i>Obr. 8.5.: Schéma připojení vstupních signálů</i>	40
<i>Obr. 8.6.: Ikona DAQ v blokovém diagramu</i>	40
<i>Obr. 8.7.: SubVI</i>	42
<i>Obr. 8.8.: Rozmístění teplotních čidel na 3D modelu motoru</i>	43
<i>Obr. 8.9.: Grafické výstupy</i>	43
<i>Obr. 8.10.: Měření oteplení na asynchronním motoru</i>	44
<i>Obr. 8.11.: Rozdíl teplot referenčních a naměřených</i>	45
<i>Obr. 8.12.: Korekční křivky</i>	45
<i>Obr. 8.13.: Naměřené hodnoty po vhodném proložení</i>	46
<i>Obr. 8.14.: Využití zónové analýzy v programu SrS</i>	47
<i>Obr. 8.15.: Program Sat report Standard</i>	48

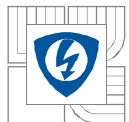


<i>Obr. 8.16.: Závislost emisivity na teplotě.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 8.17.: Nastavení parametrů měření</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 9.1.: Digitální multimetr METEX [9].....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 9.2.: Ukázka teplotní analýzy pomocí termovize</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 9.3.: Grafické výstupy virtuálního měřicího přístroje.....</i>	<i>52</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Φ	.....zářivý tok	[-]
t_1	..... teplota 1	[°C]
ε	.....emisivita	[-]
S	.....plocha	[m^2]
d	.....délka	[m]
$\Delta t, \Delta u$	.....rozdíl teplot	[°K, °C]
I_t	..... tepelný tok	[W]
I	.....součinitel tepelné vodivosti materiálu	[-]
R_t	..... tepelný odpor	[°K · W ⁻¹ ; °C · W ⁻¹]
r_t	..... měrný tepelný odpor.....	[-]
a	.....tepelná propustnost tělesa.....	[-]
s	..... odrazivost tělesa	[-]
d	.....pohltivost tělesa	[-]
c	.....součinitel sálavosti	[-]
c	.....konstanta	[$5,67 \cdot 10^{-8}$]
n_1	.....synchronní otáčky	[$rad \cdot s^{-1}$]
f	.....frekvence	[Hz]
n	.....jmenovité otáčky	[$rad \cdot s^{-1}$]
p	.....počet pólových párů	[-]
M	.....moment.....	[$N \cdot m^{-1}$]
K	.....konstrukční konstanta.....	[-]
U_i	.....indukované napětí	[V]
I	.....proud.....	[A]
$\cos j$	.....účinník.....	[-]
s	.....skluz	[%]
w	.....úhlová rychlost	[$rad \cdot s^{-1}$]
$b_0 - b_9$	.....koeficienty polynomu	[-]
E	.....elektromotorické napětí	[mV]



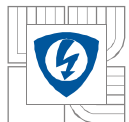
1 ÚVOD

Tato práce se zabývá měřením teploty na točících se elektrických strojích, jako příklad el. stroje byl použit asynchronní motor. Teplota je jedna z nejdůležitějších termodynamických vlastností, které určují stav hmoty, a objevuje se v mnoha fyzikálních zákonech. Existuje jen velmi málo vlastností látek, které by nebyly teplotně závislé. Oteplovací zkouška je jednou z rozhodujících zkoušek, které vypovídají o provozuschopnosti elektrického stroje.

V úvodní části práce jsou zpracovány teoretické poznatky, které souvisí s měřením teploty. Popisuje se zde vznik a šíření tepla, jednotky teploty a způsoby měření. V práci je uvedena teorie o konstrukci asynchronního motoru, o rozdělení výkonu, ztrátách a také způsobu chlazení.

Další část vychází z teoretických předpokladů a je zaměřena na vytvoření programu pro měření teplot na asynchronním motoru v programovém prostředí LabView. Po úvodním seznámení s programem je zde popsán vznik a ovládání vlastního programu. V práci je řešena problematika přepočtu termoelektrického napětí na teplotu a popis významu jednotlivých funkčních bloků programu.

V poslední části je provedeno oteplovací měření na asynchronním motoru pomocí nově vytvořeného programu za současného měření jinými již zavedenými dotykovými i bezdotykovými metodami. Všechna měření jsou následně vyhodnocena a analyzována. Jednotlivé výhody a nedostatky jednotlivých měření jsou diskutovány v závěru.



2 ZÁKLADNÍ POJMY

2.1 Teplota

Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy. To je stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán, nezávisí na čase. Stav termodynamické rovnováhy bývá charakterizován termodynamickou teplotou, která musí být stejná pro všechny části izolované soustavy. Teplota se nedá měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Měření teploty je tedy měření nepřímé.[2]

2.2 Teplo

Teplo je část vnitřní energie, kterou systém vymění (tj. přijme nebo odevzdá) při styku s jiným systémem, aniž by přitom docházelo ke konání práce. Mluvíme o tepelné výměně. Teplo popisuje procesy, v nichž se odehrává spousta srážek jednotlivých částic, které přímo nemůžeme sledovat ani měřit. O práci mluvíme, když způsobenou změnu energie můžeme vyjádřit jako součin veličin, obvykle síly a posunutí, či tlaku a změny objemu, nebo konečně jako součin napětí, proudu a času. O teplo jde tehdy, když se změna energie jako součin jiných měřitelných veličin vyjádřit nedá.

Teplo je fyzikální veličinou popisující změnu termodynamického stavu systému, nikoli stav samotný. Jednotky tepla jsou shodné s jednotkami energie a práce. [2]

2.3 Teplotní stupnice

Teplota je základní veličinou pro určení vnitřní pohybové energie látky. Měří se ve stupních Kelvina [K] nebo ve stupních Celsia [°C].

Někdy ve staré případně zahraniční literatuře (USA) se vyskytují stupně Fahrenheita [°F], případně stupně Reaumura [°R]. Přepočty jsou uvedeny v následujícím.

Stupeň Celsiovy stupnice je shodný se stupněm Kelvinovy stupnice. Rozdíl je však v počátku měrné soustavy. Celsiova stupnice bere za nulovou hodnotu teplotu rovnovážného stavu směsi voda-led (při normálním atmosférickém tlaku). Vývojově mladší Kelvinova stupnice počíná stavem absolutního klidu částic v látce.

$$T_{[°C]} = T_{[K]} - 273,15$$

$$T_{[K]} = T_{[°C]} + 273,15$$

Stupnice Fahrenheita a Reaumurova mají odlišný jak začátek stupnice, tak velikost stupně.

Převod mezi stupnicemi Fahrenheita a Celsia:

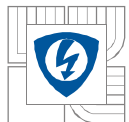
$$Y_{[°F]} = (X_{[°C]} \cdot 1,8) + 32 \quad (1)$$

$$X_{[°C]} = (Y_{[°F]} - 32) / 1,8$$

Převod mezi stupnicemi Reaumuru a Celsia:

$$Y_{[°R]} = 0,8 \cdot X_{[°C]} \quad (2)$$

$$X_{[°C]} = 1,25 \cdot Y_{[°R]} \quad [4]$$



2.4 Senzor teploty

Senzor teploty je funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce tj. blok, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Pojem senzor teploty je ekvivalentní pojmu snímač teploty (samostatná konstrukční součást teploměrového zařízení, která obsahuje teplotní čidlo), ale také pojmu čidlo teploty (část snímače převádějící teplotu na jinou vhodnou fyzikální veličinu). Stejně tak se jako senzor označuje detektor tepelného zařízení nebo teploměr (zařízení k měření teploty).

- Dle fyzikálního principu se senzory teploty dělí na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické a na další jako jsou např. kapacitní, aerodynamické.
- Dle styku s měřeným prostředím se senzory teploty dělí na dotykové a bezdotykové.
- Dle transformace signálu se senzory teploty dělí na aktivní, které se působením teploty chovají jako zdroj elektrické energie (termoelektrické články) a na pasivní, u kterých je s výjimkou chemických indikátorů teplot nutné elektrické napájení pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu, neboť měření teploty je vždy měřením nepřímým.[2]

2.5 Emisivita

Emisivita reprezentuje záření emitované povrchem. Měřítkem pro emisivitu je vyzařování absolutně černého tělesa v uzavřeném prostoru při konstantní teplotě. Tvar ani materiál nemají na toto záření žádný vliv, tzn. že závisí jen na teplotě samotné. Povrch vždy vyzařuje méně než absolutně černé těleso při stejné teplotě a právě tento poměr se nazývá emisivitou. Z toho vyplývá, že hodnota emisivity je v intervalu 0-1.

2.5.1 Získání hodnoty emisivity

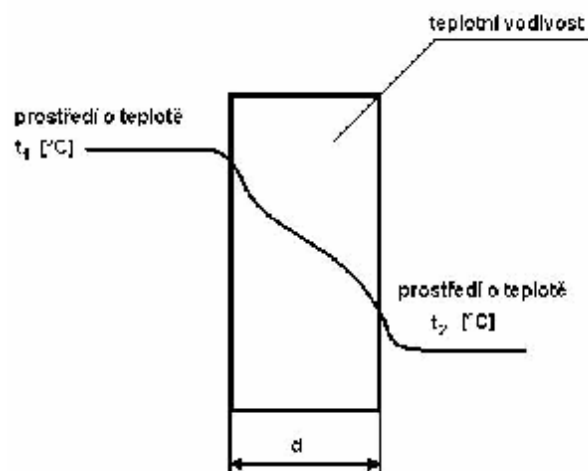
- použitím vhodných tabulek
- teplota objektu se nejprve změří dotykovým snímačem, a pak se po zaměření objektu pyrometrem nastaví emisivita na takovou hodnotu, aby pyrometr ukázal předem změřenou teplotu, nastavená hodnota je pak správná hodnota emisivity povrchu tělesa
- část povrchu objektu lze začernit speciální vrstvou laku nebo jiného materiálu se známou hodnotou pohltivosti, po změření správné teploty připravené plochy zaměříme pyrometr na jinou část plochy a další postup je obdobný jako v předcházejícím případě. Do objektu, pokud je to možné, vyvrtáme otvor, jehož hloubka bude alespoň 6x větší než průměr, průměr otvoru musí být větší než je průměr terče stanovený optikou pyrometru pro danou vzdálenost; při měření teploty v otvoru nastavíme emisivitu pyrometru na hodnotu $e = 1$, podmínkou je, aby teplota tělesa byla v otvoru stejná jako na povrchu.
- emisivitu vzorku materiálu lze změřit spektrometrem [2]

3 ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA

Teplu se přenáší z místa o vyšší teplotě do místa o nižší teplotě (jak to vyplývá z druhé věty termodynamiky).

K přenosu tepla dochází trojím způsobem:

- vedením (kondukcí). Uplatňuje se ve všech skupenstvích, především při přenosu tepla v tuhých látkách
- prouděním (konvekci). Uplatňuje se především při přenosu tepla v kapalinách a plynech
- vyzařováním (radiací, sáláním). Přenos tepla zářením se uskutečňuje formou elektromagnetického záření.[4]



Obr. 3.1.: Přestup tepla[3]

3.1 Přenos tepla vedením

Jestliže jedna stěna pevného tělesa má vyšší teplotu než jeho druhá stěna, pak teplo (tepelný tok) prochází tělesem od teplejší stěny ke stěně s nižší teplotou. Stěnou o ploše $S[m^2]$ a tloušťky $d[m]$, při teplotním rozdílu $\Delta t = t_2 - t_1$ [K nebo °C], prochází tepelný tok I_t , udávaný ve [W].

$$I_t = S \frac{\lambda}{d} (t_2 - t_1) \quad [^\circ\text{C}, \text{K}] \quad (3)$$

Kde λ je součinitel tepelné vodivosti materiálu

Také se často používá vyjádření tepelné vodivosti materiálu ekvivalentu elektrického odporu, tak zvaného tepelného odporu $R_t [K \cdot W^{-1}]$ nebo $[^\circ\text{C} \cdot W^{-1}]$

$$R_t = \frac{d}{\lambda S} = r_t \frac{d}{S} \quad (4)$$



Kde r_t je měrný tepelný odpor

Množství tepla Q_t prošlého průřezem tělesa (stěnou tělesa) je dán součinitelem tepelného toku I_t a času t

$$Q_t = I_t \cdot t \quad [J, W, s] \quad \text{nebo} \quad [Ws, W, s]. \quad [4] \quad (5)$$

3.2 Sdílení tepla konvekcí (prouděním)

Konvekcí (prouděním) představuje přestup tepla mezi povrchem pevného tělesa a kapalinou nebo plynem, který těleso obklopuje. Nejčastějším případem je konvekce mezi tělesem a okolním vzduchem.

Fyzikální jev v případě, že těleso je ponořeno do kapaliny, která má menší teplotu než těleso, dochází v okolí tělesa ke zředění hustoty částic kapaliny v porovnání se stavem ve vzdálenějším prostoru. To má za následek, že síly způsobené rozdílem těchto hustot způsobí pohyb částic z okolí teplého tělesa vzhůru.

Popsaný fyzikální děj se nazývá volnou konvencí. Jestliže se použije k vyvolání tlaku pomocné zařízení (na příklad ve vzduchu ventilátor, nebo v kapalině čerpadlo) pak se hovoří o nucené konvekci. Tepelný tok Φ , který za časovou jednotkou projde mezi plochou povrchu ponořeného tělesa S a obklopujícím prostředím, při rozdílu teplot ΔJ (aby nedocházelo k záměně symbolu t pro čas a teplotu, bude v dalším textu, kde by toto nebezpečí hrozilo, používán pro teplotu symbol J). [4]

3.3 Přenos tepla zářením (sáláním)

Jak již bylo uvedeno, přenos tepla zářením (někdy též nazýván radiací nebo sáláním) se uskutečňuje formou vlnění. Energie tohoto vlnění se po dopadu na těleso mění na teplo.

V praxi je nejznámější tento přenos tepla ve formě slunečního záření, nebo při použití tzv. infrazářičů. Vlnová délka 10^{-4} až $10^{-6} m$.

Při dopadu tepelného záření na těleso mohou nastat tři následující případy:

- tepelné záření bude tělesem částečně propuštěno. Tepelná propustnost tělesa závisí na druhu látky, ze které je těleso vyrobeno, a na vlnové délce tepelného záření, značí se α .
- tepelné záření bude tělesem částečně odraženo. Odrazivost (obdoba zrcadla u viditelného záření) závisí stejně tak jako propustnost na druhu látky, ze které je těleso vyrobeno, dále na struktuře povrchu a vlnové délce tepelného záření. Značí se ρ .
- tepelné záření bude tělesem pohlceno. Pohltivost tělesa závisí na barvě jeho povrchu. Značí se δ . Pohltivost tak zvaného černého tělesa je rovna 1.



Je důležité, že každé těleso, které má určitou teplotu je zářičem tepla. Tepelný tok (tepelný proud) vystupující z tělesa je úměrný ploše $S[m^2]$, čtvrté mocnině absolutní teploty a tak zvané sálavosti.

$$I_t = c \cdot c \cdot S \cdot (J_2^4 - J_1^4) \quad (6)$$

Kde J_2 je teplota tělesa teplo vysílající

J_1 je teplota okolí

$$c = 5,67 \cdot 10^{-8}$$

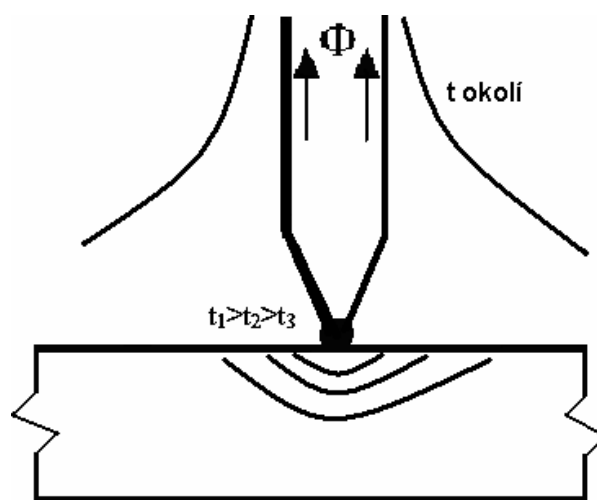
c je součinitel sálavosti (bezrozměrné číslo)

Sálavost c závisí na druhu, barvě a povrchu látky teplo vyzařující. Jedná se o bezrozměrnou konstantu. Při stejné teplotě vyzařují plochy světlé a hladké teplo hůře, než plochy černé a drsné.[4]

4 MĚŘENÍ TEPLoty

4.1 Kontaktní (dotykové) měření teploty

Rozdíl v deformaci izoterm u dotykového měření teploty je zobrazen na *Obr.4.1*. Při dotykovém měření, např. termoelektrickým článkem, dochází k akumulaci dvou nejistot měření. Jednak zářivý tok Φ proudící do vodičů termoelektrického článku způsobí deformaci izoterm v měřeném místě tělesa a jednak vznikne teplotní rozdíl způsobený zářivým tokem Φ na stykovém tepelném odporu mezi snímačem teploty a tělesem. Hodnoty těchto nejistot mají stejné znaménko, takže se jejich účinek sčítá.[2]



Obr. 4.1.: Izotermy tělesa a okolí při měření dotykovým snímačem[2]

4.1.1 Termistory

Termistor je teplotně závislý odpor zhotovený z polovodičových feroelektrických keramických materiálů. Keramická technologie umožňuje výrobu termistorů ve tvaru disku, destičky, kapky, válečku, atd.

Výhodami termistoru jsou velká teplotní citlivost, malé rozměry, jednoduchý převod odporu na elektrické napětí nebo proud a možnost přímého měření odporu termistoru na větší vzdálenost. Nevýhodou je nelineární charakteristika.

Termistory se dle struktury dělí na amorfnní a polykrystalické. V závislosti na materiálu má termistor buď velký záporný teplotní součinitel odporu, tzv. negastor (NTC termistor) nebo velký kladný teplotní součinitel odporu tzv. pozistor (PTC termistor)

- Negastory se vyrábějí práškovou technologií z kysličníků kovů jako je kysličník chromu, kobaltu, mědi, železa, manganu atd. Vylisované senzory se zpevňují slinováním za vysokých teplot. Teplotní rozsahy negastorů jsou od -50°C do 150°C .

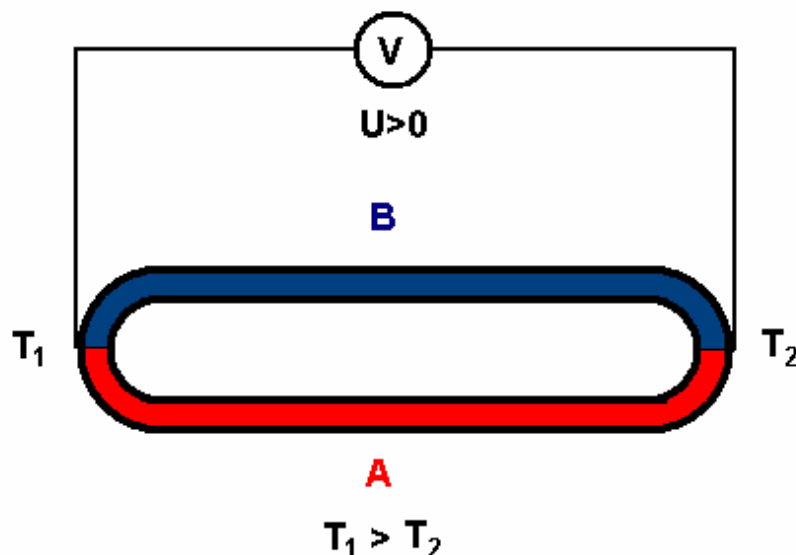
Teplotní závislost odporu termistoru je silně nelineární, proto je třeba do zapojení přidat sériový a paralelní odpor, tím se docílí linearitu vyhovující pro praxi.

- Pozistory jsou termistory s kladným teplotním součinitelem odporu. Vyrábějí se z polykrytalické feroelektrické keramiky. Např. titaničitanu-bornatého. Odpor pozistoru se stoupající teplotou nejprve mírně klesá. Poté dochází k prudkému nárůstu a po nárůstu o několik řádů pak odpor opět mírně klesá.

4.1.2 Termoelektrické detektory

Termoelektrické detektory jsou založeny na Seebeckově jevu *Obr.4.2.*, tj. na jevu převodu tepelné energie na elektrickou. Seebeckův jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii a proto expandují ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Tím vzniká jednostranná převaha nábojů kladných nebo záporných, a proto znaménka absolutních Seebeckových koeficientů souhlasí se znaménkem těch nositelů nábojů, kterých je ve vodiči více.[2]

Seebeckův jev se projevuje u dvou vodičů A a B, u kterých je udržována teplota jejich spojů na rozdílných teplotách $T_1 > T_2$. V obvodu (viz obrázek) se objeví napětí a začne jím protékat proud. Seebeckův jev se tedy projevuje vznikem termoelektrického napětí.

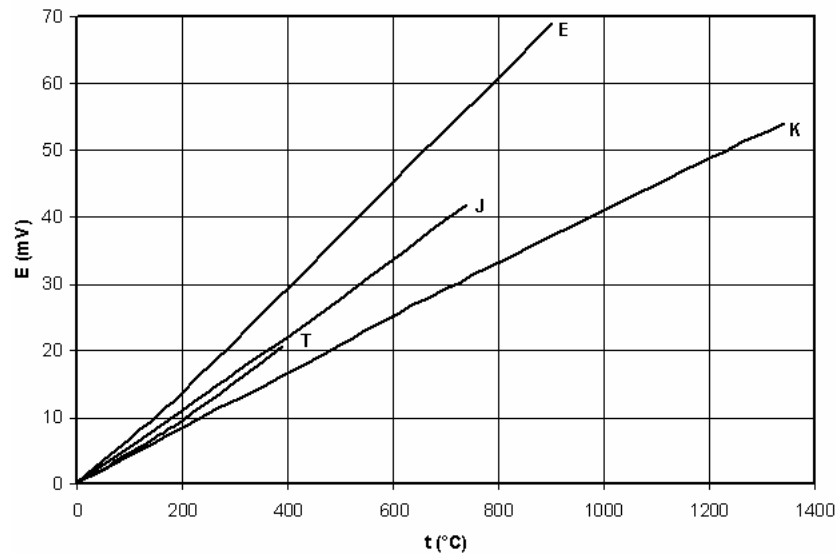


Obr. 4.2.: Seebeckův jev

V technické praxi se Seebeckovy koeficienty označují symboly α a jsou nazývány termoelektrickými koeficienty.

Hodnoty koeficientů jsou často publikovány na základě měření kovu vůči olovu nebo platině. Termoelektrický koeficient má u vodičů hodnoty řádově jednotky až desítky mikrovoltů na stupeň Celsia (nebo Kelvina). U polovodičů dosahuje hodnot vyšších.

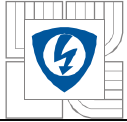
Jednotlivé páry termoelektrických materiálů pro výrobu termoelektrických čidel jsou ve světě normalizovány. Byly vybrány materiály zajišťující přijatelnou nelineární závislost termoelektrického napětí na teplotě pro daný teplotní rozsah, odolnost proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření, dlouhodobou stabilitu charakteristiky $E = f(\Delta t)$. Označení jednotlivých termoelektrických článků se dle doporučení IEC uvádí velkými písmeny. Statické charakteristiky vybraných typů termoelektrických článků jsou na Obr.4.3. [2]



Obr. 4.3.: Charakteristiky vybraných termoelektrických článků[2]

4.1.3 Vlastnosti a použitelnost vybraných termoelektrických článků

- TYP K: jeho složení je NiCr-NiAl (označoval se jako chromel-alumel) a je vhodný pro oxidační a inertní atmosféru, je necitlivý pro neutronový tok, není vhodný pro měření ve vakuu.
- TYP T: jeho složení je Cu-CuNi (měď-konstantan) je nejlepší termoelektrický článek pro nízké teploty kryogenní aplikace, v redukční a oxidační atmosféře, lze ho použít až do teploty 700 °C.
- TYP J: jeho složení je Fe-CuNi (železo-konstantan) je vhodný pro oxidační, redukční i inertní atmosféru a vakuum. V redukční atmosféře ho lze použít bez ochranného krytí.
- TYP N: jeho složení je NiCrSi-NiSiMg (nicosil-nisil), má velmi stabilní charakteristiku až do 1300 °C, je vhodný pro cyklické změny teploty a dále je vhodný pro jadernou energetiku, neboť je odolný vůči neutronovému toku.
- TYP E: jeho složení je NiCr-CuNi (chromel-konstantan), má nejvyšší hodnotu termoelektrického koeficientu, dále je vhodný pro vakuum a středně oxidační atmosféru, kde se dá využít bez ochranného krytí.



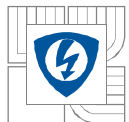
- TYP G: jeho složení je W-WRh a je vhodný pro extrémně vysoké teploty, obvykle se nepoužívá pro rozsahy teplot pod 400°C, je chemicky stabilní a vhodný k použití jak v oxidační tak v interní atmosféře, ve vakuu a ve vodíku.
- TYP R: jeho složení je PtRh13-Pt a je používán pro měření vysokých teplot až do 1780°C, je odolný vůči oxidaci a korozi, ale vždy musí mít ochranu. [2]

4.1.4 Indikátory teploty

Indikátory teploty slouží k přibližnému stanovení teplot těles. Teplota je stanovena na základě znalosti kritické teploty tj. teploty, při níž nastává definovaná změna vzhledu indikátoru. Touto změnou může být buď tvar nebo barva indikátoru. Nejistota měření teploty indikátoru je závislá na skutečnosti, nakolik se liší prostředí pro kalibraci indikátorů měřeného prostředí. Vliv na odchylky teploty má nejen složení atmosféry, ale i tlak. Vliv chemického vlivu prostředí se u některých typů indikátorů řeší uzavřením do průhledné fólie. Důležitým parametrem pro používání indikátorů teplot je rychlost ohřevu. Barevné indikátory se dále člení na vratné a nevratné a s jedním nebo s více barevnými zvraty. Vratný barevný indikátor teploty má po zchladnutí výchozí barvu. Indikátor s více zvraty mění barvu při různých teplotách.



Obr. 4.4.: Indikátor teploty[5]



4.2 Bezdotykové měření teploty

Bezdotykové měření teploty (také označované jako infračervená pyrometrie) je měření povrchové teploty těles na základě vysílaného elektromagnetického záření tělesem a přijímaného senzorem (detektorem) záření vlnové délky od 0,4 μm do 25 μm . Rozsah pokrývá oblast viditelného spektra od 0,4 μm do 0,78 μm , oblast blízkého červeného spektra od 0,78 μm do 1 μm , oblast krátkovlnného infračerveného spektra od 2 μm do 3 μm , oblast středovlnného infračerveného spektra od 3 μm do 5 μm a konečně oblast dlouhovlnného infračerveného spektra od 5 μm do 25 μm . Elektromagnetické záření s vlnovou délkou od 2 μm do 25 μm se označuje jako tepelné záření. Uvedené rozsahy pokrývají měření teplot v rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.2.1 Termovize

Termovizní systémy se dělí na:

- termovizní systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu
- termovizní systémy s maticovým detektorem

Opticko-mechanický rozklad obrazu se realizuje snímáním jednotlivých bodů objektu řízenou optickou osou. Okamžité zorné pole termovize se postupně zaměřuje na všechny body (plošky) měřeného objektu. Dráha rozkladu se provádí pohyblivými optickými částmi kamery (otočné hranoly nebo zrcadla). Výroba těchto systémů pro civilní účely už skončila.

Pro termovizní kamery se nyní používají chlazené a nechlazené maticové mikrobolometrické a kvantové (QWIP) FPA detektory (1 D-řádkové a 2D-plošné). Chlazení FPA matice se provádí Stirlingovým chladičem (hermeticky uzavřený chladičící systém se dvěma písty s plynným heliem pracující na principu kompresorové mikrochladičky) nebo termoelektrickým chladičem. Zpracování signálů je realizováno přímo na čipu prostřednictvím multiplexorů a 14bitových A/D převodníků v každé řádce matice. Programové vybavení dodávané k termovizím umožňuje kromě základního nastavení parametrů různé způsoby zpracování signálu, jako je vykreslení teplotního profilu v libovolném místě obrazu, vyhodnocení střední a maximální hodnoty teploty ve zvolené oblasti obrazu, vyhodnocení teploty v libovolném místě na obraze, barevné zobrazení zvolených izoterm, nastavení různých hodnot emisivít na zobrazeném objektu, změnu barevné palety aj. V termovizní technice se používají dvě hlavní pásma vlnových délek, krátkovlnné (2 μm až 5 μm) a dlouhovlnné (7 μm až 13 μm). Prostřednictvím amplitudového diskriminátoru videosignálu lze u termovize nastavit pro libovolné rozmezí teplot libovolnou barvu nebo alespoň zvolit některou z volitelných barevných palet. Je nutno si uvědomit, že termovize pracuje v neviditelném spektru záření, kde žádné barvy neexistují, takže přiřazení barev je umělé.

Termovize je základním měřicím zařízením pro infračervenou diagnostiku. Na základě znalosti rozložení teplotního pole diagnostikovaného objektu lze kontrolovat funkce zařízení, jejichž činnost je spojena s vývinem nebo absorpcí tepla. Lze tak lokalizovat různé materiálové vady, opotřebením způsobené třením (např. u ložiska) a jiné takové defekty vnitřních dílů objektu, které ovlivňují rozložení povrchové teploty.

V energetice je možné např. diagnostikovat pod vysokým napětím za provozu izolační stavy izolátorů, spojovacích svorek kontaktů, stavy vypínačů aj., v elektrotechnice sledovat teplotu pláště elektromotoru atd. Existují dvě metody, které umožňují diagnostikovat i defekty uvnitř materiálu, a to jsou: Pulzní termografie a lock-in termografie.[2]

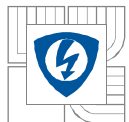


4.2.2 Výhody bezdotykového měření teploty

- zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt
- možnost měření teploty na rotujících nebo pohybujících se objektech
- měření teploty z bezpečné vzdálenosti (elektrická zařízení, hutní objekty aj.)
- možnost měření velmi rychlých změn teploty
- možnost měřit a dále číslicově zpracovat teploty celých povrchů těles (tomografie, termovize)

4.2.3 Nevýhody bezdotykového měření teploty

- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa
- nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty prostupnosti prostředí mezi čidlem a objektem
- nejistoty měření způsobené nepřesnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt



5 ASYNCHRONNÍ MOTOR

5.1 Princip činnosti

Asynchronní motory jsou střídavé, prakticky vždy trojfázové. Malé motory mohou být i jednofázové.

Funkce motoru je založena na točivém magnetickém poli v jeho vzduchové mezeře. Toto pole je buzeno trojfázovým vinutím rozloženým v drážkách statoru. Jednotlivé fáze vinutí jsou proti sobě prostorově posunuty o 120° elektrických. Vinutí se napájí ze souměrné soustavy trojfázových napětí, takže jím protéká souměrná soustava proudů navzájem časově posunutých o 120° . Ta vytváří magnetické pole stálého prostorového tvaru otáčející se synchronní rychlostí.

$$n_1 = \frac{f_1}{p} \quad (7)$$

kde f_1 , značí kmitočet napájecího (statorového) napětí a p počet pólových párů vinutí. Vloží-li se do tohoto pole podobné vinutí rotoru se stejným počtem pólů, které se může otáčet a které je spojeno nakrátko, bude se v něm indukovat napětí s kmitočtem

$$f_2 = (n_1 - n) \cdot p \quad (8)$$

(je-li n rychlost otáčení rotoru) a vinutím bude protékat souměrná soustava proudů (obdobná statorové) téhož kmitočtu f_2 , vzniká točivý moment

$$M = \frac{(K \cdot U_i \cdot I_{1s} \cdot \cos j)}{w} \quad (9)$$

úměrný indukovanému napětí U_i ve vinutí stojícího rotoru, statorovému proudu I_1 a účinníku $\cos \varphi$ a nepřímo úměrný uhlové rychlosti rotoru $w = 2 \cdot p \cdot f$, K znamená konstrukční konstantu uspořádání. Poměr

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1} \quad (10)$$

je skluz, udávající poměrnou změnu rychlosti otáčení rotoru vůči synchronní rychlosti otáčení magnetického pole.[1]



Obr. 5.1.: Asynchronní motor

5.2 Konstrukční uspořádání AS motoru s klecovým rotorem

Motor v provedení s klecovým rotorem bývá také nazýván motorem s rotorem či kotvou nakrátko.

Rotorové vinutí je tvořeno klecí - tyčemi z mědi nebo hliníku, někdy také z mosazi, spojenými po obou stranách zkratovacími kruhy ze stejného materiálu. Drážky bývají polouzavřené a různého tvaru, což má vliv na průběh točivého momentu motoru v závislosti na rychlosti otáčení a na jeho záběrový moment.

Má-li mít motor s klecí nakrátko větší záběrový moment, zhotovuje se jeho klec jako odporová, obvykle z materiálu s horší elektrickou vodivostí (např. z mosazi). Jinou možností je zeslabení nebo střídavé prořezání spojovacích kruhů (nesmí se však přerušit). Motor s odporovou klecí zabírá většinou s maximálním momentem, má však zhoršenou účinnost. Proto se použití těchto motorů omezuje na případy s krátkodobým zatěžováním (výtahy, jeřáby apod.).[1]

5.3 Motor s kroužkovým rotorem

Stator motoru s kroužkovým rotorem má nosnou kostru, do níž je vložen magnetický obvod. Ten je sestaven z dynamoplechů ve tvaru mezikruží (obvykle tloušťky 0,5mm), vzájemně izolovaných buď lakem nebo vrstvou difundovaného izolantu.

Izolace plechů potlačuje ztráty vířivými proudy vznikajícími ve vodivých materiálech ve střídavém magnetickém poli. Magnetický obvod je v kostře uchycen lištami nebo svorníky a axiálně stažen po vnitřním povrchu má podélné drážky pro založení vinutí.

Vinutí statoru je bubnové, což znamená, že je tvořeno cívkami, jejichž obě aktivní strany leží na povrchu válcové plochy vnitřního povrchu statoru. Jsou od sebe vzdáleny přibližně o jednu pólovou rozteč. Cívky velkých motorů se obvykle zhotovují z měděného dynamopásu izolovaného skelnou izolací, u menších a malých motorů z vodiče kruhového průřezu izolovaného smaltem.

Drážky, do nichž se vinutí zakládá, mohou být otevřené, polouzavřené nebo uzavřené.

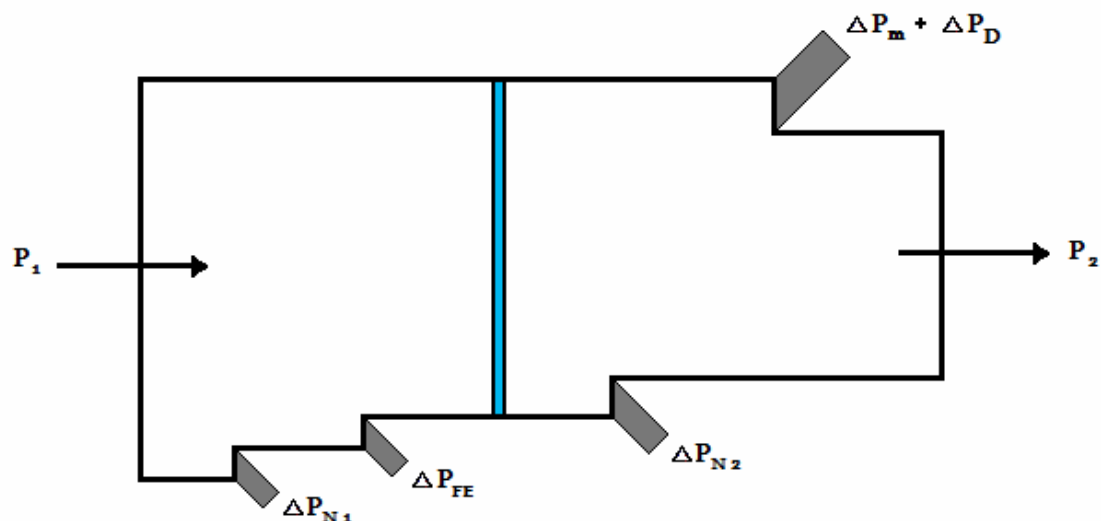
- Otevřené drážky se zpravidla používají u velkých strojů na vyšší napětí, neboť umožňují dokonalé izolování cívek v přípravcích mimo stroj. Nevýhodou otevřených drážek je vznik nehomogenit magnetického pole v místě otevření, čímž narůstají ztráty v magnetickém obvodu. Pro potlačení těchto nepříznivých vlivů je třeba volit větší vzduchovou mezeru mezi statorem a rotorem.
- Polouzavřené drážky přicházejí v úvahu pro menší a malé stroje. Cívky se buď navíjejí strojově nebo ručně přímo do drážek vyložených izolací, nebo se navíjejí předem a do drážek se vsypávají.
- Uzavřené drážky se vyskytují prakticky pouze u speciálních motorů. Umožňují zmenšit proud potřebný pro vybuzení magnetického pole motoru. Nevýhodou je vysoká cena navíjení a možnost porušení izolace vodiče.

Podle počtu cívkových stran v drážce se rozlišuje vinutí jednovrstvé a dvouvrstvé.

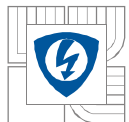
- Dvouvrstvé vinutí se používá nejčastěji. V každé drážce jsou uloženy dvě cívkové strany, zpravidla nad sebou, takže každá cívka má jednu aktivní stranu v horní a druhou v dolní vrstvě.
- Jednovrstvé vinutí je podobné dvouvrstvému, rozdíl spočívá v tom, že aktivní strany cívek, které u dvouvrstvého vinutí ležely v jedné drážce, leží u jednovrstvého vinutí ve dvou sousedních drážkách.[1]

5.4 Rozdělení toku výkonu

Jak je zobrazeno na Obr.6.4.: Příkon P_1 , který se odebírá ze sítě, z části kryje činné ztráty ve vinutí satoru ΔP_{N1} a ztráty v magnetickém obvodu motoru ΔP_{FE} . Většina příkonu však prochází přes vzduchovou mezeru do rotoru. V této části motoru jsou ztráty elektrického původu reprezentovány činnými ztrátami ve vinutí rotoru ΔP_{N2} . Od tohoto výkonu je nutné ještě odečíst vlastní mechanické ztráty stroje ΔP_{Mech} a ztráty dodatečné ΔP_D , poté je již možné odečíst na hřídeli motoru výkon P_2 .[5]



Obr. 5.4.: Tok výkonu v asynchronním motoru[6]



5.5 Výpočet jednotlivých ztrát

Činné ztráty ΔP_N jsou dány odporem vinutí, který roste se zvyšující se teplotou. Tyto ztráty lze pak vypočítat podle vztahu $\Delta P_N = R \cdot I_{ef}^2$ [W]. (11)

Kde R je odpor vinutí v $[\Omega]$ a I_{ef} je efektivní hodnota proudu v [A].

Ztráty vířivé ΔP_V způsobuje indukování napětí v materiálu. Toto napětí je úměrné časové změně toku, který materiálem prochází. Tyto ztráty lze vypočítat podle vztahu $\Delta P_V = f^2 \cdot B^2$. (12)

Kde B je magnetická indukce [T] a f je kmitočet magnetování [Hz].

Hysterézní ztráty jsou závislé na kvalitě materiálů a na ploše hysterézní smyčky. Lze je vypočítat ze vztahu $\Delta P_H = B^2 \cdot f$ (13)

Mechanické ztráty jsou způsobeny třením v ložiskách a třením otáčejících se částí stroje o vzduch. Na tyto ztráty nemá vliv zatížení stroje, ale pouze rychlost otáčení, případně hustota vzduchu. Pro ventilační ztráty (pokud je stroj vybaven ventilátorem) platí stejné podmínky jako pro mechanické ztráty. Tyto ztráty se u velkých strojů mohou podílet na ztrátě výkonu od 0,5 do 1% jmenovitého výkonu.

5.6 Chlazení elektrických strojů

Vlivem ztrát v elektrických strojích vzniká tepelná energie, která v případě, že nebude odváděna, vzroste na hodnoty, při kterých může dojít ke zničení stroje. Proto se pro stroje konstruuje chlazení, které tomuto zničení předejde. Způsoby chlazení stroje se dají rozdělit na:

- stroje s přirozeným chlazením
- stroje s vlastním chlazením
- stroje s cizím chlazením

5.6.1 Stroje s přirozeným chlazením

Tyto stroje jsou konstruovány tak, že nemají žádný nucený odvod tepla, mají pouze tzv. pasivní chladič, což zpravidla bývá žebrovaní na povrchu motoru. Používá se u motorů malých výkonů, které nejsou přetěžovány, a motorů které jsou používány pouze v přerušovaném chodu. Celý pohon pak musí být navržen tak, aby se motor stačil ochladit. Výhodou tohoto typu chlazení je, že nám odpadají ztráty ventilační a s nimi spojená větší hlučnost motoru. Nevýhodou je, pokud by byl motor v chodu delší dobu, než pro jakou je konstruován, pak by teplota uvnitř motoru stále rostla, a pokud by nebyla přítomna teplotní ochrana, došlo by ke zničení stroje.



5.6.2 Stroje s vlastním chlazením

U tohoto typu chlazení bývá zpravidla ventilátor v radiálním nebo axiálním provedení umístěn přímo na hřídeli motoru. Princip tohoto chlazení je založen na nuceném oběhu vzduchu z povrchu motoru, případně ze vzduchové mezery. U radiálního ventilátoru vzduch vstupuje do ventilátoru vodorovně s osou a opouští ventilátor kolmo na osu. U axiálního provedení proudí vzduch ve směru osy otáčení oběžného kola. Tento typ se používá pro větší objemy chladícího plynu. Tento způsob chlazení se ve velké míře používá u středních i velkých typů motorů.

5.6.3 Stroje s cizím chlazením

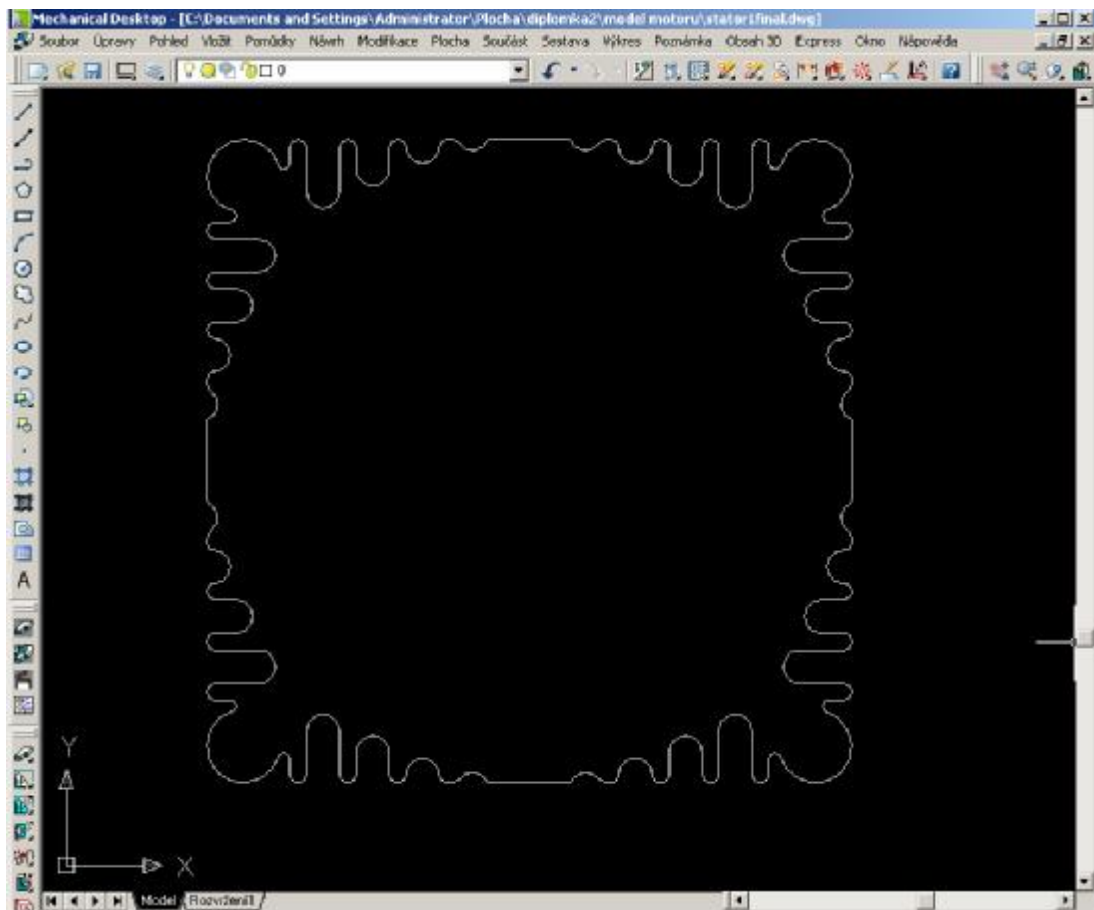
Tento způsob chlazení se používá pro velké výkony motorů, např. pro velké synchronní generátory. Jako chladící médium je zde použita převážně voda. Princip chlazení spočívá v tom, že v obalu statoru jsou vytvořeny kanálky, kde pomocí čerpadla cirkuluje chladící kapalina a stroj ochlazuje. Další možností chlazení kapalinou je, že stroj má dutý rotor a v něm cirkuluje chladící kapalina. Kapalinové chlazení je účinnější než předchozí typy. Je ale konstrukčně náročné, tudíž drahé. Další riziko je spojené s nutností cirkulace kapaliny, která je zpravidla nucená a zajišťuje ji čerpadlo. V případě, že dojde k poruše na této části zařízení a oběh kapaliny ustane, dojde poměrně rychle k prudkému nárůstu teploty, a to může vést ke zničení celého stroje. Proto se musí oběhová čerpadla zálohovat.

6 3D-MODEL MOTORU

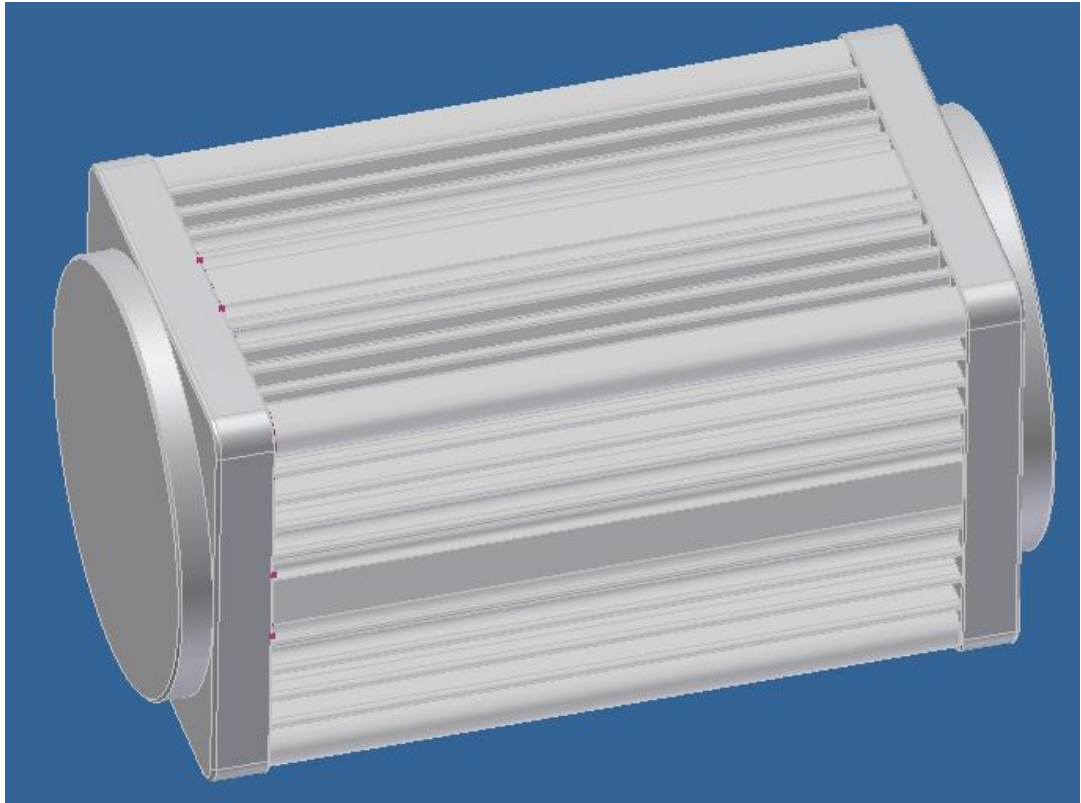
Pro vytvoření simulace šíření tepla na povrchu asynchronního motoru (*Obr.6.3.*) v programu LabView bylo nutné stator tohoto motoru nakreslit v 3D modelu (*Obr. 6.2.*).

Pro náčrt řezu motoru jsem zvolil program AutoCAD, který byl pro mne uživatelsky vhodnější pro vytvoření 2D náčrtu (*Obr. 6.1.*).

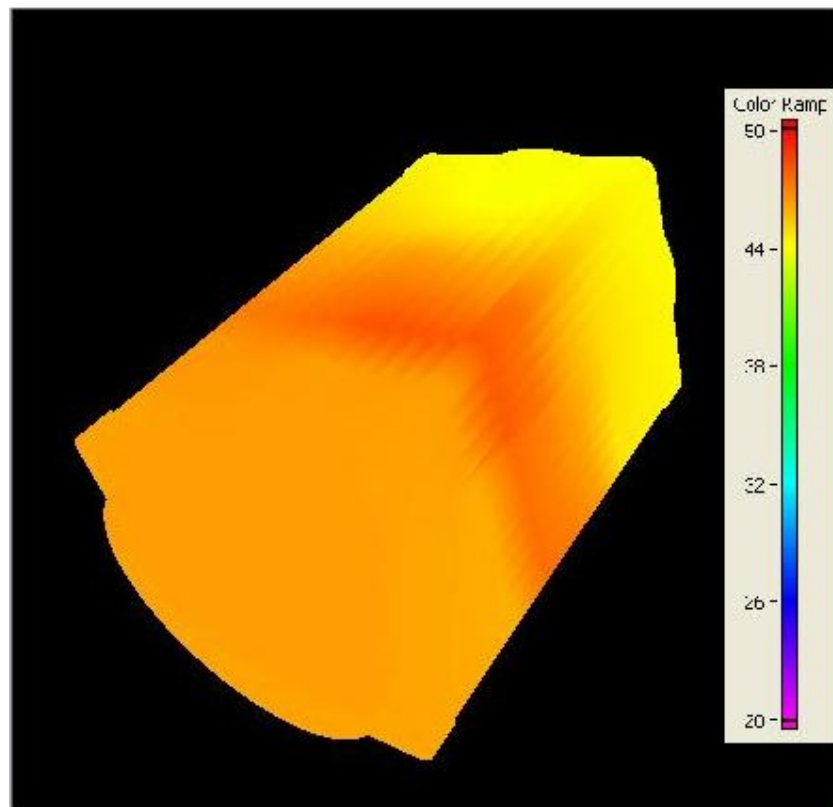
Samotné vytvoření 3D modelu bylo vytvořeno v programu Autodesk Inventor, do kterého jsem importoval 2D náčrt řezu těla motoru a čela. Pak už stačilo „vytáhnout“ objekty do třetího rozměru podle změřené délky, jednotlivé díly spojit, a tam kde bylo třeba zkosit nebo zaoblit hrany. Nakonec pro soustavu bylo třeba vybrat vhodnou barvu, která se co nejvíce podobala reálnému vzhledu (hliník leštěný-tmavý).



Obr. 6.1.: 2D- řez motoru



Obr. 6.2.: 3D-model motoru



Obr. 6.3.: 3D-model motoru v LabView

7 LAB VIEW

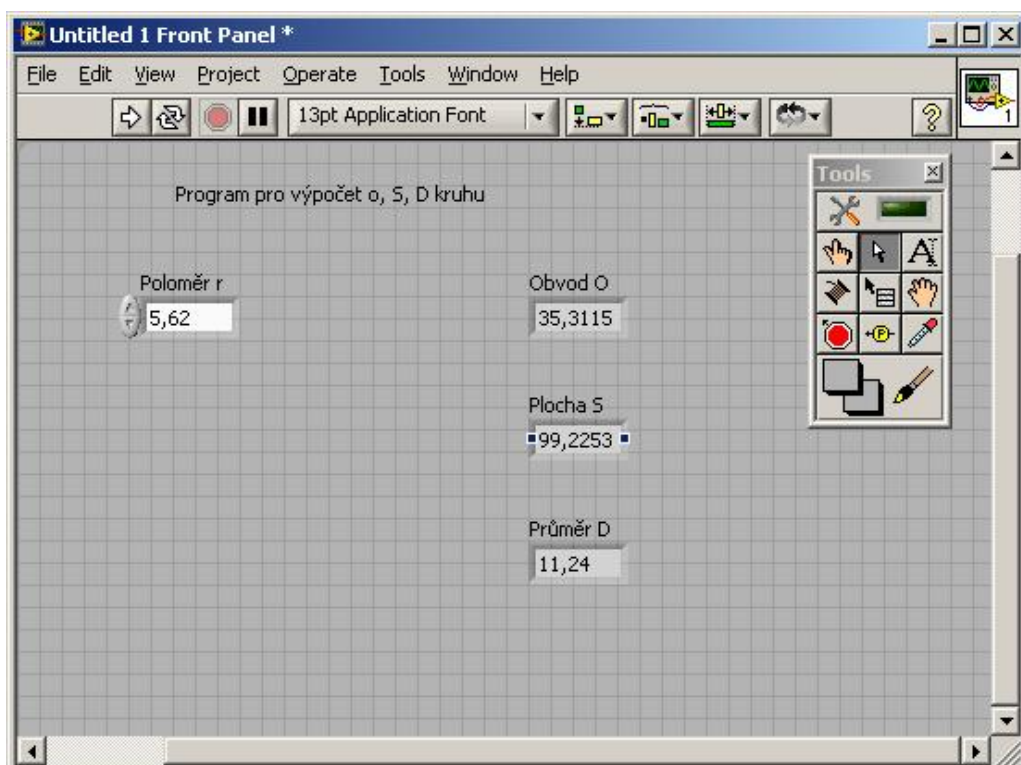
7.1 Představení programu

Vývojové prostředí LabView (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) čili „laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů“ je produktem americké firmy National Instruments, která je průkopníkem a největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace, technické disciplíny, která zažívá veliký rozvoj v oblasti vývoje, výzkumu, školství a průmyslu.

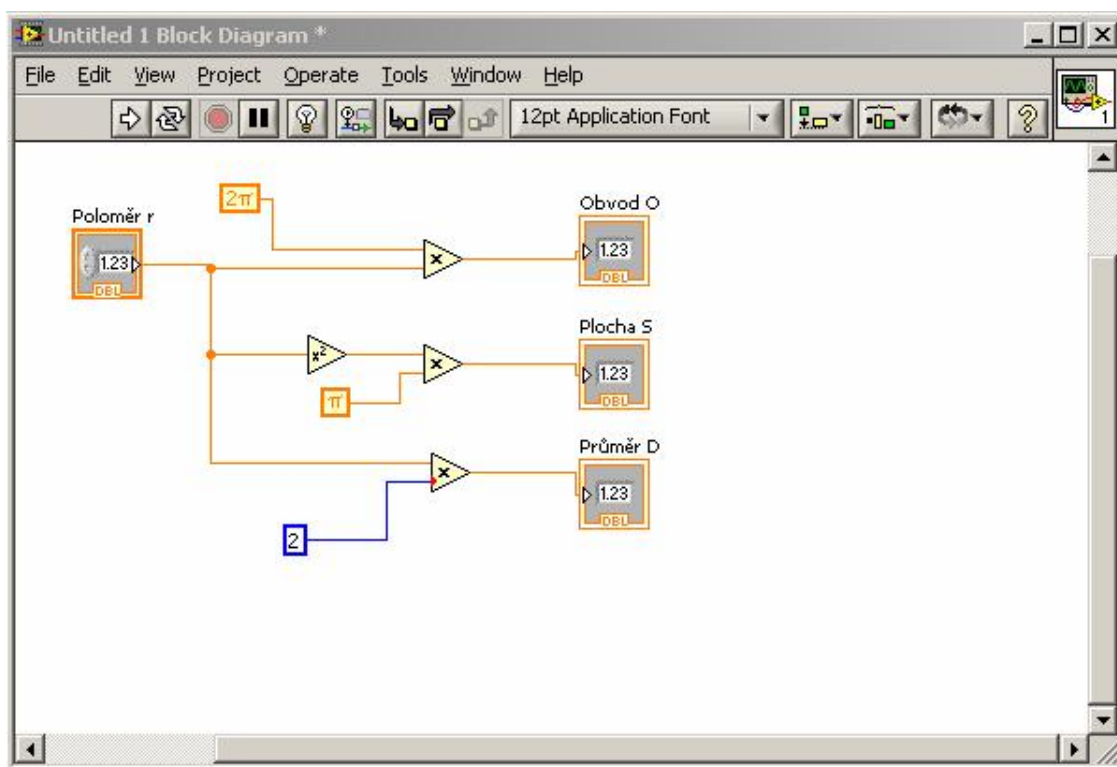
Prostředí LabView, někdy nazývané též jako G-jazyk (tedy „grafický jazyk“), je vhodné nejen k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů různé složitosti, ale také k programování složitých systémů, jako je třeba robot. Dá se říci, že prostředí LabView nemá omezení své použitelnosti.

Hlavním cílem virtuální instrumentace je nahradit prostorově, finančně a mnohdy i časově náročné využití technických prostředků (hardware) řešením virtuálním za přispění programových prostředků a zejména pak grafickými a vizuálními prostředky a zprostředkovat tak uživateli maximální názornost. Toto řešení umožňuje rychlé navrhování nových aplikací i provádění změn v konfiguraci, což je u realizace skutečnými nástroji za pomoci reálných součástek často velice nákladné nebo přímo nemožné.

Programy, se kterými se v LabView pracuje, se nazývají virtuální instrumenty. Toto označení se také objevuje v příponě souboru, resp. programu (VI).[3]



Obr. 7.1.: Front panel

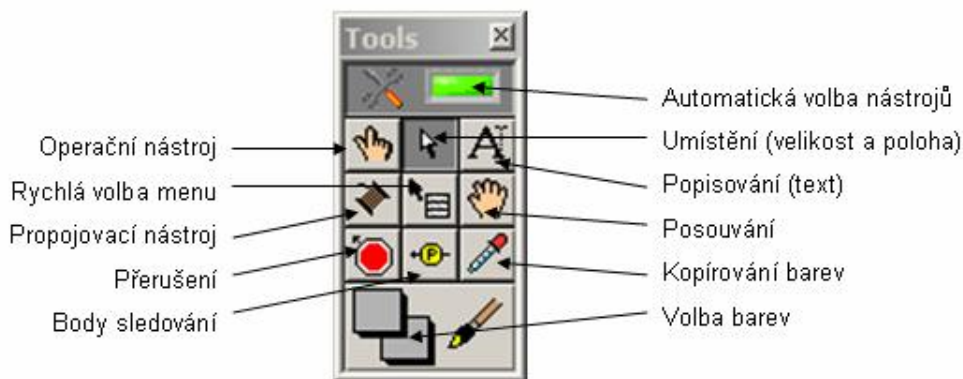


Obr. 7.2.: Blokový diagram

7.2 Popis vybraných panelů

7.2.1 Paleta Tools

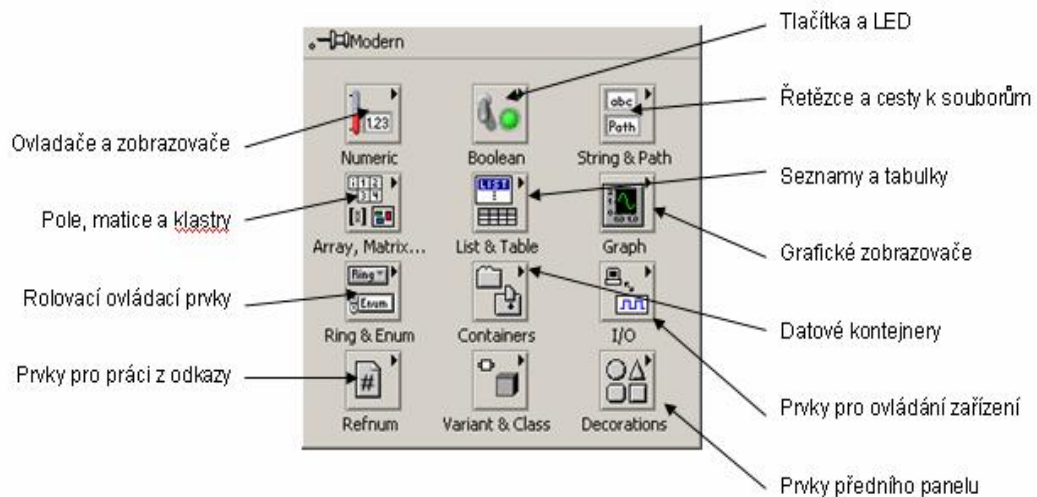
Jedná se o paletu nástrojů, kterou vyvoláme např. stiskem tlačítka <Shift> a pravého tlačítka myši. Pokud je aktivována automatická volba nástrojů program nabízí automaticky, při pohybu kurzoru, možnosti použití nástrojů. Pokud je tato možnost vypnuta je nutné vybírat jednotlivé nástroje ručně výběrem z palety. Jednotlivé prvky jsou popsány na Obr. 7.3.



Obr. 7.3.: Paleta Tools

7.2.2 Paleta Controls

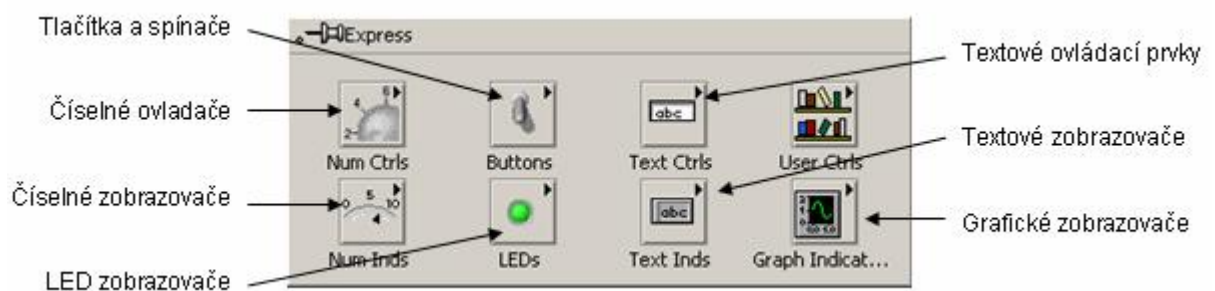
Paletu Controls vyvoláme stisknutím pravého tlačítka v čelním panelu. Skládá se z ikon které jsou popsány na Obr.7.4. Tyto ikony obsahují další subpanely. Výběr jednotlivých prvků uskutečníme stiskem levého tlačítka myši a přetažením bloku do čelního panelu, případně dvojklikem.



Obr. 7.4.: Paleta Controls

7.2.3 Subpaleta Express

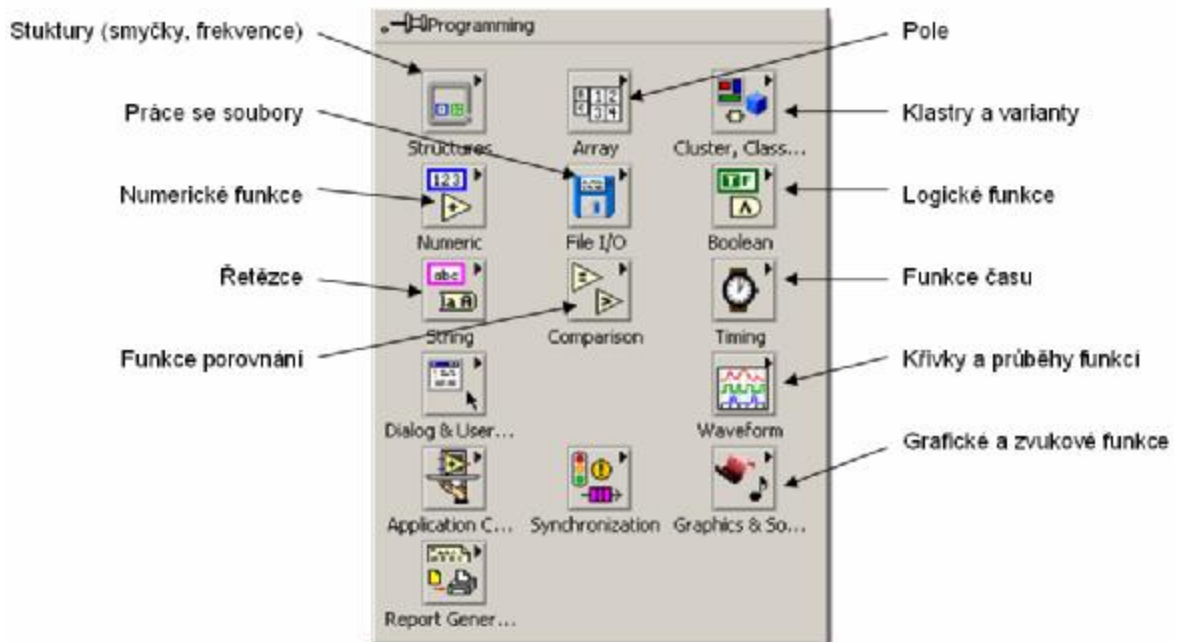
Tato paleta je součástí palety Controls, obsahuje výběr často používaných bloků při tvorbě běžných VI.



Obr. 7.5.: Subpaleta Express

7.2.4 Paleta Function

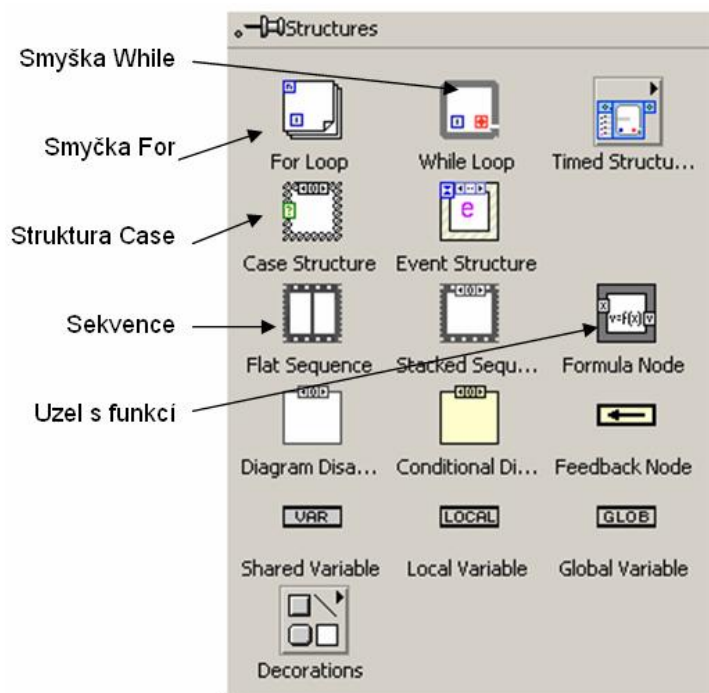
Paletu vyvoláme stisknutím pravého tlačítka myši v blokovém diagramu. Objeví se nám paleta s prvky, jež jsou popsány na Obr.7.6. Tyto funkce tvoří „hardwarovou“ část programu, jsou zde zastoupeny matematické operace, booleovské operace, struktury, smyčky, časování a další funkce nezbytné k vytvoření funkčního programu.



Obr. 7.6.: Paleta Function

7.2.5 Subpaleta Structures

Tato subpaleta obsahuje důležité programovací struktury, bez kterých se složitější programy neobejdou. Jedná se o grafické obdoby cyklů.



Obr. 7.7.: Subpaleta Structures

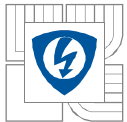


- Smyčka `for`: Její použití je výhodné tam, kde je předem znám počet opakování cyklu. Toto číslo se připojí ke smyčce ve formě konstanty N a cyklus se provede právě N -krát.
- Smyčka `while`: Tato smyčka je závislá na testovací podmínce, cyklus se provádí donekonečna, dokud není do smyčky přivedená podmiňovací hodnota booleovského typu (`true/false`). Tyto hodnoty je možné nastavit. Ukončovací podmínka však musí být uvnitř smyčky.
- Struktura `case`: Jedná se o podmíněný příkaz. Na základě vstupních logických hodnot se provedou funkce uvnitř struktury. Tato struktura má více rámců tzn., že například program pro podmínku „`true`“ vykoná jinou funkci než pro podmínku „`false`“.

7.3 Práce v LabView

Základní postup při práci s programem vysvětlím na jednoduchém příkladu, který při zadání poloměru r vypočítá a zobrazí obvod kružnice, plochu a průměr.

Po spuštění programu zahájíme programování například volbou v základním menu *File>New VI*, poté se objeví prázdný front panel *Obr.7.1*. Blokový diagram zobrazený na *Obr.7.2* vyvoláme např. kombinací `<Ctrl+E>`. Nejprve do programu vložíme zobrazovací vstupní a výstupní bloky, to provedeme ve front panelu klepnutím na pravé tlačítko myši v záložce *Express>Numeric Controls*, kde vybereme *NumCtrl*. Poklepáním pravým tlačítkem myši přejmenujeme „numeric“ na „Poloměr r “. Nyní vložíme blok pro zobrazení výsledků, opět pravým tlačítkem myši ve front panelu a ze záložky *Express>Numeric Indicators* vybereme *Num Ind*. Blok si pro jednoduchost ještě dvakrát zkopírujeme a přejmenujeme na „Obvod O “, „Plocha S “ a „Průměr D “. Pokud se nyní přepneme do blokového diagramu, zjistíme, že se zde vytvořily kopie námi vložených bloků. Zbývá tedy vytvořit žádané matematické operace, ty provedeme v blokovém diagramu. Pravým tlačítkem myši vyvoláme menu *Express>arithmetic&comparison >Express Numeric* a z matematických operátorů vybereme *Multiply* (násobení). Protože tento operand budeme potřebovat třikrát, jednoduše si jej zkopírujeme. Dále použijeme ze stejné palety ještě funkci *square* (druhá mocnina). Nyní si do výpočtů vložíme matematické konstanty, ty najdeme v *Express>arithmetic&comparison >Express Numeric>Math Conctans*. Budou se nám hodit následující konstanty `const`, `2p a p`. Nyní bloky uchopením myši vhodně poskládáme a „vodivě“ propojíme, k tomu slouží *Connect Wire* (propojovací drát). Jeho ikonka se zobrazí, pokud se kurzorem přiblížíme k vstupu nebo výstupu jednotlivých bloků, nebo jej najdeme v paletě *View>Tools* (grafické změny provedené v blokovém panelu se neprojeví ve front panelu a naopak). Nyní se opět přepneme do front panelu, kde za číslo „poloměr r “ dosadíme vlastní číselné hodnoty z klávesnice a na horní liště stiskneme tlačítko *Run*, ve všech výstupních blocích se nám zobrazí vypočítané hodnoty.



8 MĚŘENÍ OTEPLENÍ NA ASYNCHRONNÍM MOTORU POMOCÍ PROGRAMU LABVIEW

8.1 Přepočítání termoelektrického napětí na teplotu

Z Obr.4.3 se může zdát, že vztah mezi termoelektrickým napětím a teplotou je dán lineární funkcí, ve skutečnosti však je tato funkce jen vzdáleně lineární. Proto je třeba zvolit správný matematický přepočítání, který zajistí dostačující přesnost měření. Pro přepočítání termoelektrického napětí na teplotu je podle literatury [2] nevhodnější užít užší interval teplot, než jaký je rozsah teplot termočlánku, a to s ohledem na teoretický předpoklad měření. Pro matematickou korekci přepočítání je vhodné užít inverzního polynomu. Pro náš případ (termočlánek typu K s rozsahem 0-500°C) je použit polynom 9. stupně.

Pro zrychlení výpočtu je pak vhodné upravit polynom dle příkladu:

$$t = b_0 + b_1 E + b_2 E^2 + b_3 E^3 + b_4 E^4 = b_0 + E[b_1 + E(b_2 + E(b_3 + E b_4))] \quad (14)$$

8.2 Provedení přepočítání v programu

Jak už bylo popsáno v odstavci 8.1 je pro termočlánek typu K užít polynom 9. stupně, který má koeficienty viz. tab.8-1. Výsledná rovnice, která byla použita pro výpočet v programu LabView je ve tvaru:

$$t = b_0 + E[b_1 + E(b_2 + E(b_3 + E(b_4 + E(b_5 + E(b_6 + E(b_7 + E(b_8 + E b_9)))))))] \quad (15)$$

typ	K
rozsah	0°C-500°C
b0	0,0
b1	2,508355E-2
b2	7,860106E-8
b3	-2,503131E-10
b4	8,315270E-14
b5	-1,228034E-17
b6	9,804036E-22
b7	-4,413030E-26
b8	-1,2607281E-22
b9	3,13533611E-26
Nejistota měření	±0,05°C

Tabulka 8-1 Koeficienty polynomu

8.3 Měřicí karta USB 6251

Rozhraní mezi senzorem teploty a digitální formou signálu jdoucího do PC tvoří měřicí karta *Obr.8.1*. Ta kromě převodu analogového signálu na digitální pomocí A/D převodníku zajišťuje i vzorkování signálu. Karta je k PC připojena USB portem a má samostatné napájení. K nastavení měřících kanálů a frekvence vzorkování slouží DAQ asistent viz. kapitola 8.5.1.



Obr. 8.1.: Měřicí karta USB 6251 [8]

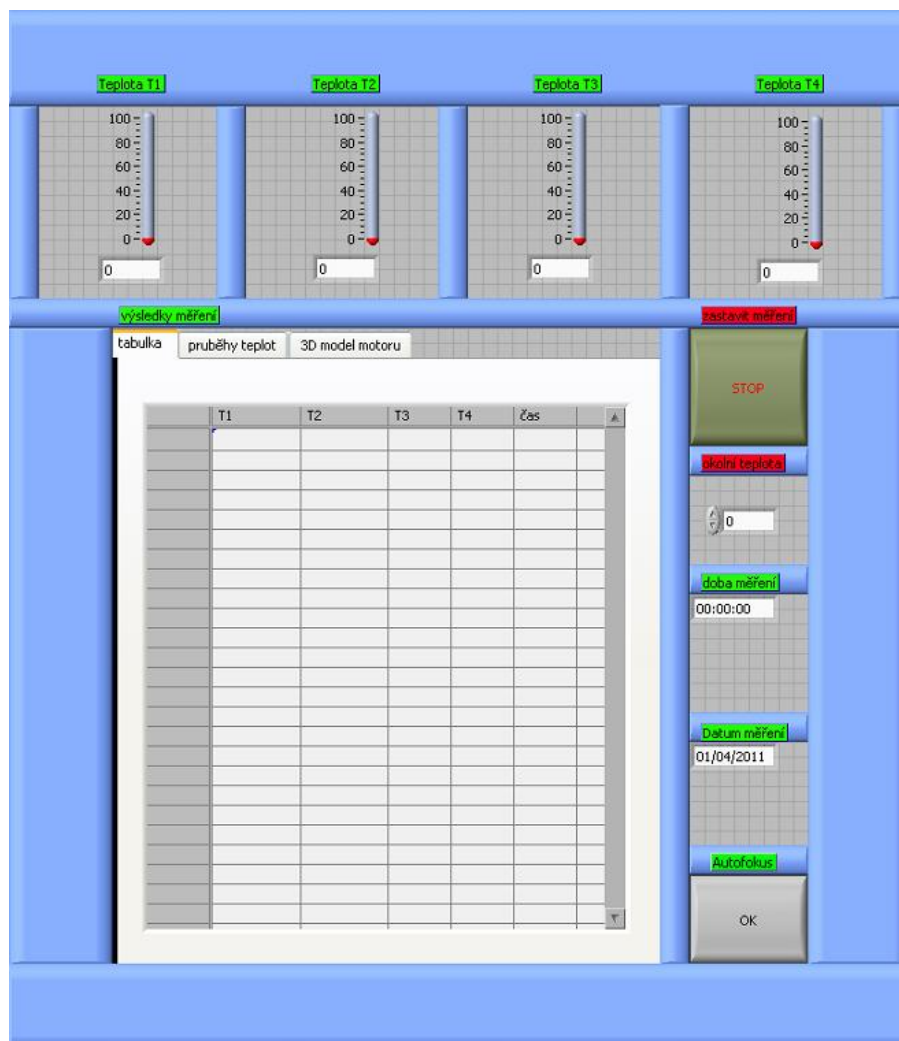
Karta obsahuje 16 analogových vstupů a 24 digitálních vstupů/výstupů, které se připojují pomocí dvou svorkovnic zobrazených na *Obr.8.2*.



Obr. 8.2.: Svorkovnice pro připojení měřených vstupů[8]

8.4 Čelní panel virtuálního měřicího přístroje

Čelní panel zobrazený na *Obr.8.3.* je vytvořen tak, aby přehledným způsobem zobrazoval právě měřené hodnoty a zároveň tvořil záznam již naměřených hodnot. Po spuštění programu se v horní části programu zobrazují aktuální hodnoty teplot čtyř termočlánků. Pro lepší vizuální orientaci v teplotních rozsazích jsou zde umístěny „teploměry“, které odrážejí velikost teplot. Jsou pro náš typ měření v dostačujícím rozsahu 0°-100°C. Historii naměřených hodnot můžeme sledovat v tabulce, která je umístěna v rámečku „výsledky měření“. V tomto rámečku jsou umístěny další záložky, mezi kterými je možné se během měření přepínat. Záložka „průběhy teplot“ zobrazuje aktuální změny naměřených hodnot jednotlivých kanálů v čase. Jednotlivé průběhy kanálů jsou barevně odlišeny. V další záložce „3D model motoru“ je umístěn trojrozměrný obraz motoru, na kterém jsou před měřením označeny čtyři body měření, které odpovídají fyzickému (reálnému) umístění čidel na měřeném motoru. Naměřené hodnoty teplot jsou zde reprezentovány barevnými odstíny podle barevné palety a uživatel tak má vizuální přehled o rozložení teplotního pole ve čtyřech zkoumaných bodech. K věrnému přehledu rozložení teplotního pole je zapotřebí velké množství čidel. Platí, že čím více čidel, tím většího rozlišení dosáhneme. Program LabView rozkládá barevnou paletu po celém modelu a ne pouze v měřených bodech, pro věrnější zachycení rozložení teploty je tak vhodné použít více čidel a rozmístit je po celém motoru.



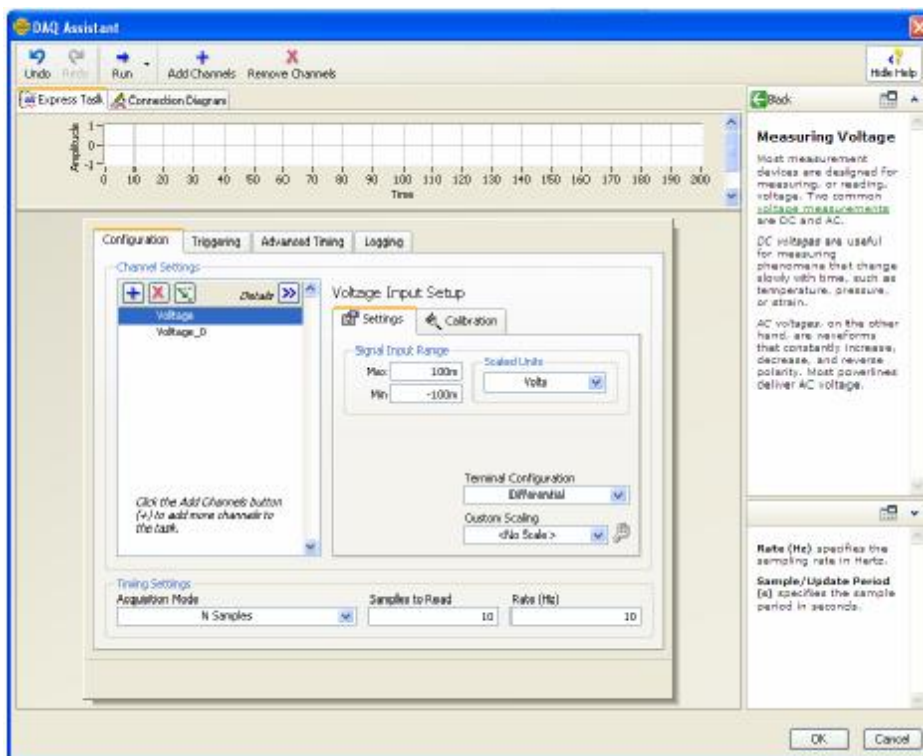
Obr. 8.3.: Čelní panel virtuálního měřicího přístroje

Po ukončení měření je k dispozici export obrázků do jiných programů. Obrázky mohou být ve formátu (.emf, .bmp, .eps). U všech grafických zobrazovačů se export provede kliknutím pravým tlačítkem myši na zobrazovač a výběrem položky *Export Simplified Image* v zobrazeném pop-up menu. Potom už jen stačí vybrat požadovaný formát a zadat cestu uložení do souboru.

Vpravo od rámečku „výsledky měření“ jsou další ovládací, nastavovací a informační prvky programu. Kromě tlačítka *STOP* (zastavení programu) a zobrazení času a data měření je tu důležité políčko „okolní teplota“. Zde je nutné před začátkem měření zadat hodnotu okolní teploty, případně pokud by došlo ke změně teploty během měření, je možné a vhodné tuto teplotu změnit. Podle teorie probrané v kapitole 4.1.2 termočlánek prostřednictvím termoelektrického napětí měří pouze rozdíl teplot mezi „studeným“ a „teplým“ koncem termočláneku, proto je nutné do výpočtu zahrnout teplotu okolí, k jejíž velikosti se naměřený rozdíl přičítá a vzniká správná hodnota teploty. Dále je zde tlačítko „Autofokus“ toto tlačítko nám automaticky nastavuje polohu 3D modelu do původně nastavené polohy, která byla nastavena při importování modelu do programu. Tlačítko je výhodné použít v případě, že se obsluze při natáčení modelu model ztratí nebo natočí v nežádoucím směru.

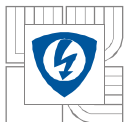
8.5 Popis blokového schématu

8.5.1 Nastavení DAQ Assistantu



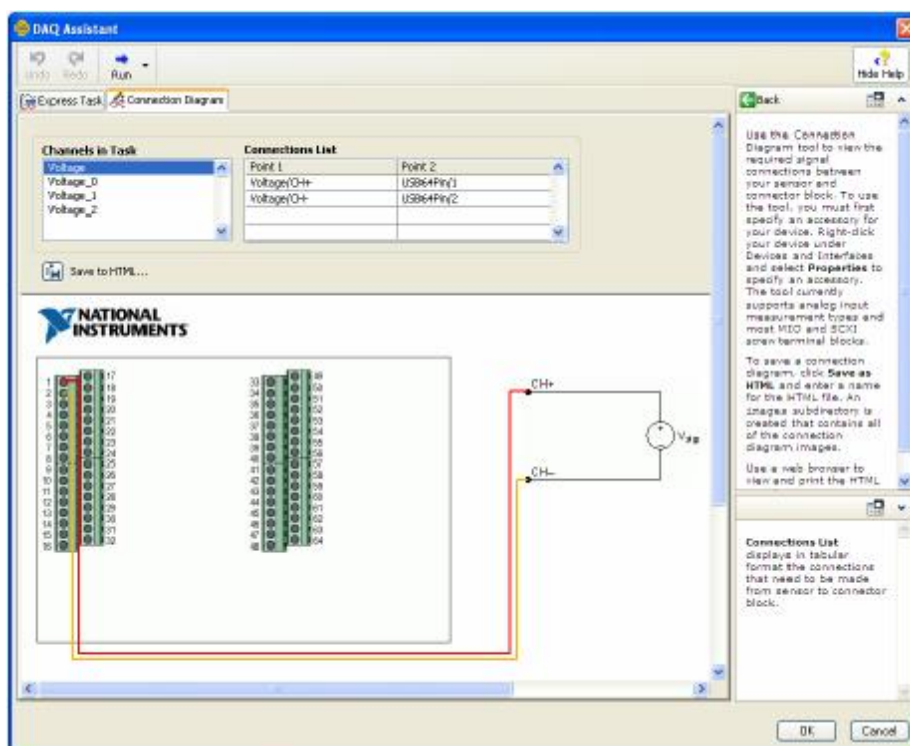
Obr. 8.4.: Nastavení DAQ Assistantu

Nastavení DAQ Assistantu (dále jen DAQ) je jedním z nejdůležitějších úkonů před měřením. Nastavuje se zde počet měřících kanálů, měřené veličiny, rozsahy měření a vzorkovací frekvence. Nastavení DAQ assistantu je možné pouze po připojení zapnuté měřící karty. Po přidání bloku DAQ do blokového diagramu si software kartu automaticky inicializuje. Poklepáním na jeho ikonu se zobrazí okno nastavení DAQ na Obr.8.4. Pro přidání jednotlivých kanálů klikneme na



ikonu přidat („plus“) a nastavíme v záložce *Scaled Units* typ vstupního signálu, v našem případě budeme měřit napětí (*Voltage*). Je zde také vhodné nastavit přibližný rozsah vstupního signálu. V našem případě bude velikost vstupního napětí v řádu desítek milivolt, to je dáno typem termočládku a rozsahem měřených hodnot. Je vhodné nastavit rozsah signálu do co možná nejmenšího intervalu, aby byla zajištěna vysoká míra přesnosti.

Obdobně postupujeme i při přidávání dalších tří signálů. Nyní je nutné se ujistit, že jsou k jednotlivým kanálům správně připojené měřicí termočládky. Nákres správného fyzického zapojení zobrazíme po označení kanálu kliknutím na záložku *Connection Diagram*. Na *Obr.8.5.* je ukázka správného zapojení prvního měřicího kanálu pro měření napětí.



Obr. 8.5.: Schéma připojení vstupních signálů

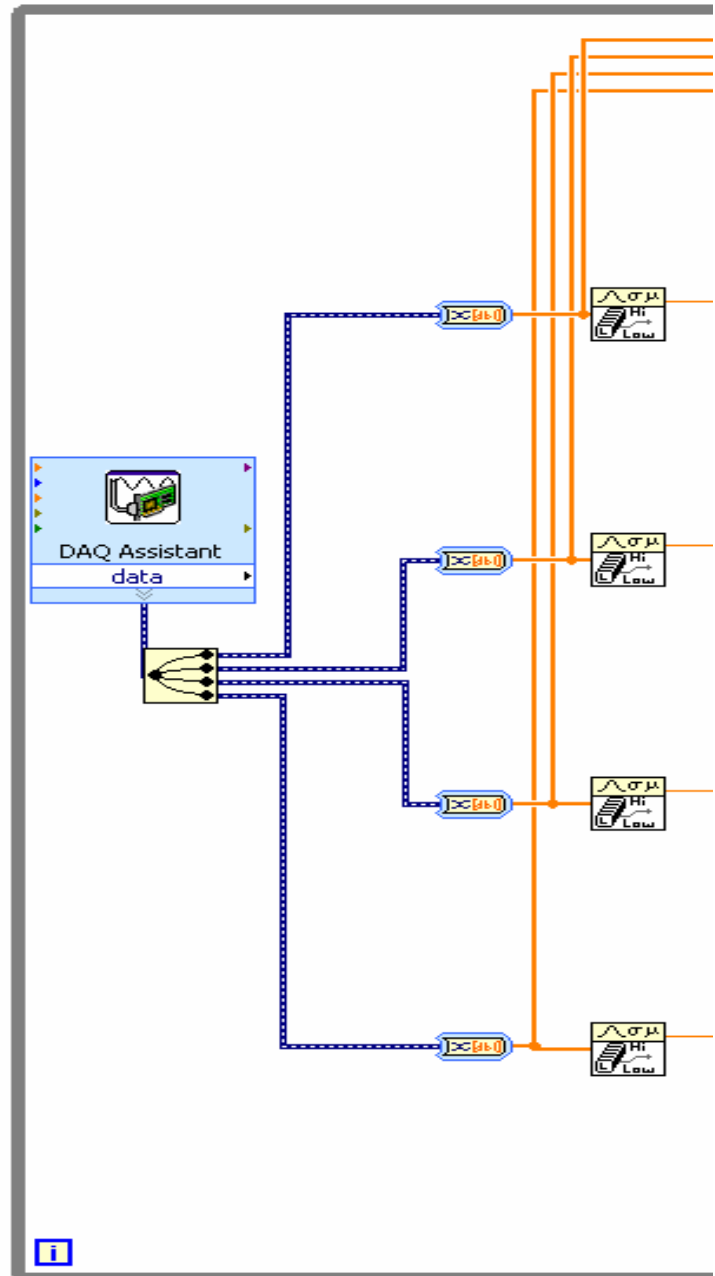
Další důležité nastavení v DAQ je nastavení smplovací frekvence a frekvence odčítání vzorků. Zde se podle praktických zkušeností osvědčilo zvolit hodnoty nižší, než jsou hodnoty přednastavené v programu. To bylo podmíněno skutečností, že při velkých smplovacích frekvencích je počet parazitních (zarušených) signálů velký. Pro měření teploty však není potřebný velký počet vzorků za čas, protože tepelná kapacita motoru je velká a teplota se s časem mění pozvolna. Podle Shannon-Kotělnikovova teorému [7] musíme zajistit, aby vzorkovací frekvence byla alespoň dvojnásobná, než je nejvyšší frekvence měřeného signálu. Po ukončení nastavení DAQ a potvrzením tlačítka *ok* se nastavení uloží a ikona DAQ je použitelná jako zdroj signálů pro virtuální měřicí přístroj v blokovém digramu.

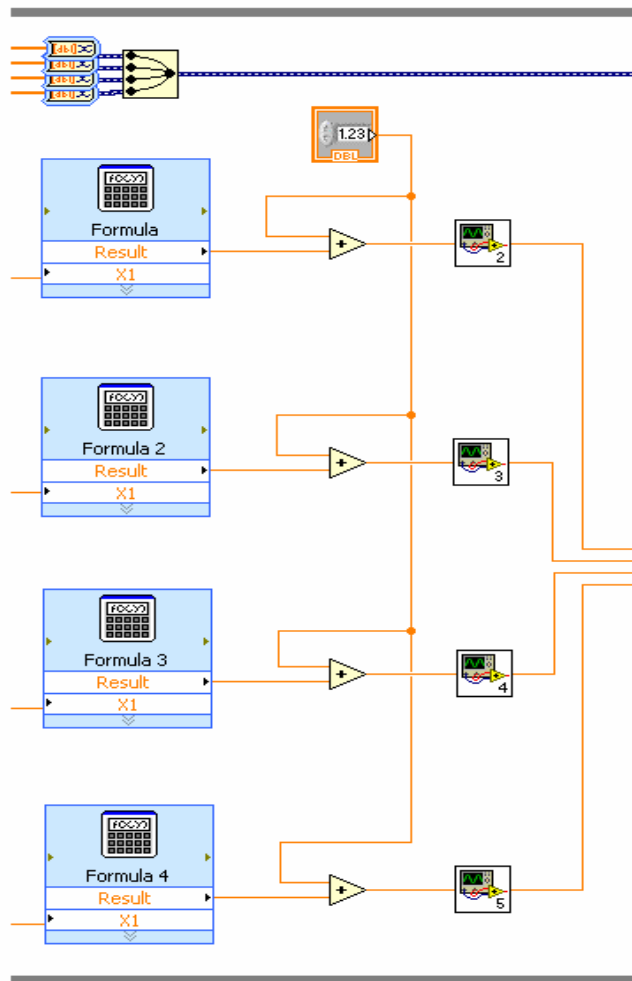


Obr. 8.6.: Ikona DAQ v blokovém digramu

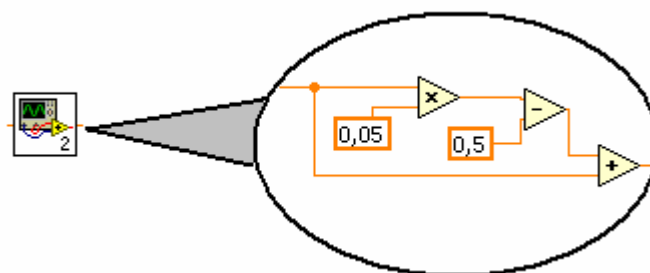
Blokové schéma je funkční částí programu. Jsou zde užity důležité výpočty, ale také podmínky a smyčky, bez kterých by činnost programu nebyla možná. Toto blokové schéma řešeného měření teploty je zde podle funkčnosti rozděleno do tří částí a níže jsou všechny prvky ve schématech popsány.

První část schématu by se dala označit jako vstupní. Vstup signálu je z termočlánku do PC veden přes měřicí kartu, pro níž je v blokovém schématu použit blok *DAQ Assistant*. Pro měření byly použity čtyři větve termočlánků. Signálem je termoelektrické napětí, které se pomocí rozbočovače rozdělí do čtyř paralelních větví. Tento signál je před přepočtem na teplotu vhodné nejprve upravit, k tomuto účelu nám poslouží blok *Median*, který z několika po sobě jdoucích hodnot vypočítá střední hodnotu, tím dosáhneme zpřesnění výpočtu a částečně tím redukuje počet vzorků. Převod z dynamického typu dat tekoucích z *DAQ Assistantu* (modré kanály) na datový typ *Array* (oranžové kanály) zajišťuje blok *Convert from dynamic*, který se při propojování vytvoří automaticky. V této části blokového schématu jsou vidět odbočky ze všech větví. To jsou hodnoty informativního charakteru, které budou zpracovány v další části programu.





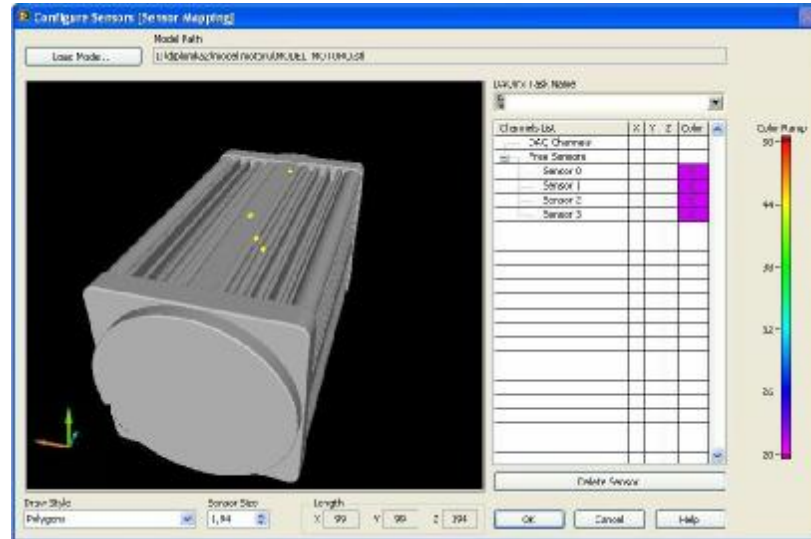
Jako další je výpočetní část schématu. Zde je užita rovnice (15), která je vložena do bloku *Configure Formula*, jedná se o polynom 9. stupně, který nahrazuje nelinearitu použitého termočláнку typu *K*. Jako proměnná *X* je zde přivedeno termoelektrické napětí jednotlivých termočláneků. Protože vypočtená teplota je pouze rozdíl teplot mezi „studným“ a „teplým“ koncem termočláнку, je tedy nutné, zde přičíst konstantu teploty okolí, kterou před začátkem měření zapíšeme do programu. Případně můžeme během výpočtu tuto konstantu měnit (předpokládá se, že teplota okolí před začátkem měření je přibližně stejná jako teplota měřeného objektu). Poslední funkce pro výpočet je tvořena blokem subVI, jenž obsahuje lineární korekci popsanou v kapitole 8.6. a v podobě blokového schématu je zobrazena na Obr.8.7. Ta koriguje naměřený průběh hodnot do správných mezí. Odtud už jako výsledné hodnoty teplot měřeného objektu hodnoty putují k dalšímu zpracování.



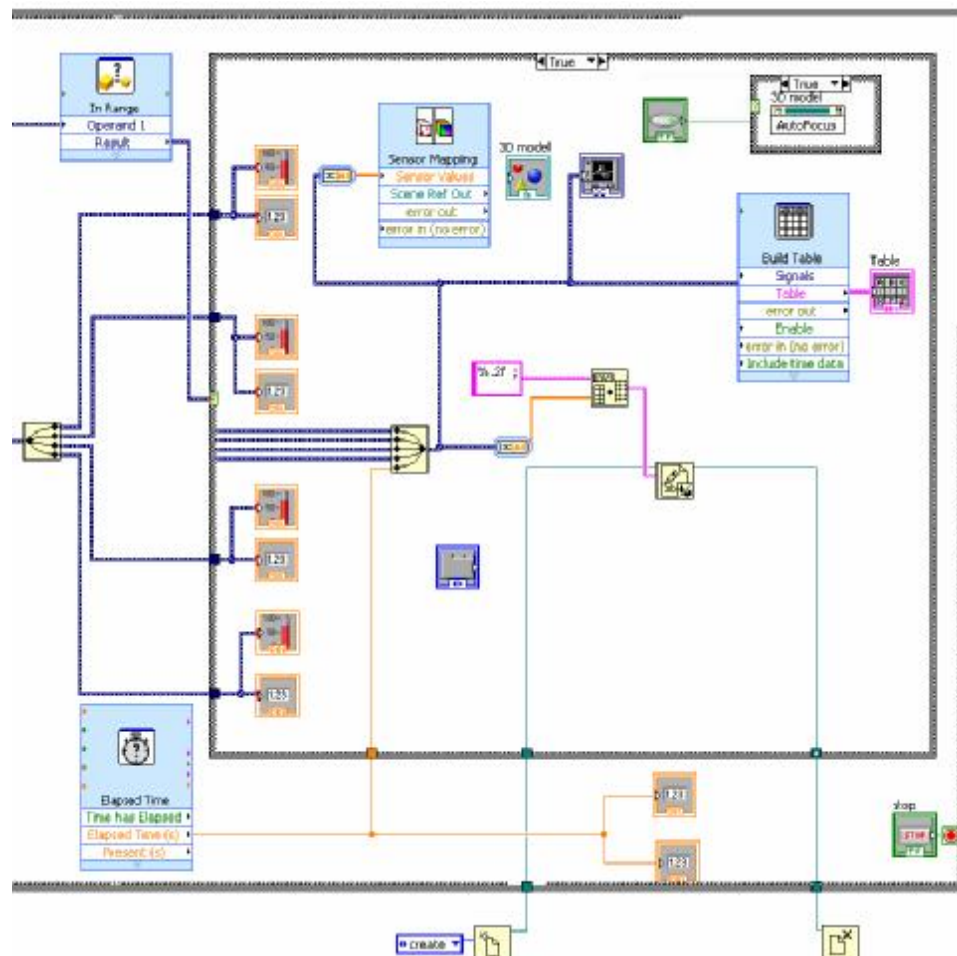
Obr. 8.7.: SubVI

Poslední blok se skládá z grafických výstupů a z ukládání naměřených hodnot do tabulky a do souboru. Kromě toho, že jsou zde číselně a graficky zobrazeny hodnoty teplot jednotlivých termočláneků, jsou zde díky grafickému prostředí 3D Picture zobrazeny jednotlivé hodnoty teploty na vytvořeném 3D modelu pomocí barevné palety. Aby mohl být 3D model zobrazen, je třeba jednotlivé signály nejprve sloučit a přivést do bloku *Sensor Mapping*, do kterého je předem importován 3D model motoru a jsou na něm umístěny měřené body Obr.8.8. Zde je také vhodné natočit model do polohy, která bude sledována, a zvolit rozsah teplot měření pro barevnou paletu. Aby byly teplotní rozdíly barevně odlišitelné, je vhodné volit co nejužší interval teplot, což při

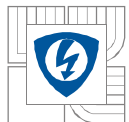
tomto typu měření nebylo možné. Naměřená data včetně časové složky jsou v průběhu měření postupně zapisována do tabulky, použitím bloku Build Table, v němž je předem nastaven počet sloupců.



Obr. 8.8.: Rozmístění teplotních čidel na 3D modelu motoru



Obr. 8.9.: Grafické výstupy

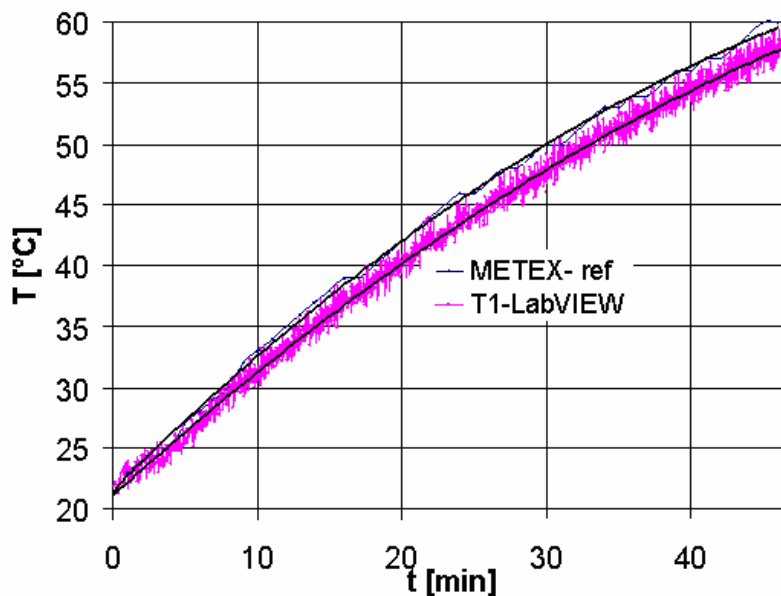


Při spuštění měření se otevře dialogové okno s možností zápisu do souboru. Po zadání cesty a názvu se soubor vytvoří a jsou do něho ukládány hodnoty z měření. Podle nastavení jsou tyto hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa a oddělena symbolem „;“ data jsou ukládána ve sloupcích pro snadný převod například do programu Excel pro další zpracování.

Jako generátor času byl použit blok Elapsed Time, který slouží nejen jako zdroj časových hodnot k naměřeným hodnotám, ale i hodnot doby měření a data měření. Je zde umístěna funkce Autofokus, která je umístěna v podmínkové smyčce, jejíž ovládání provádí obsluha stisknutím tlačítka na ovládacím panelu programu. Tato funkce slouží k automatickému vyhledání uloženého 3D modelu a jeho zobrazení v zobrazovacím okně. Zmíněná funkce je pro obsluhu nezbytná, protože funkce zobrazující 3D model nemá pro zobrazení modelu žádné automatické prvky, a je proto v některých případech nutné použít posouvání a změnu velikosti a model hledat ručně, což je nepohodlné a zdlouhavé. Celá část diagramu pro zobrazování a ukládání hodnot je uzavřena v podmínkové smyčce case structure, která slouží k potlačení chybně vypočítaných hodnot vzniklých vlivem rušení. Podmínka zda se zápis/zobrazení hodnot ve smyčce zapíše/zobrazí je definována v bloku In Range. Tento blok má na vstupu neupravené hodnoty termoelektrického napětí z měřicí karty a porovnává je s intervalem hodnot, který je do tohoto bloku napsán. Jedná se o hodnoty předpokládaného termoelektrického napětí při měření pomocí termočlánků typu K v rozmezí teplot od 0° do 100°C. Pokud je tedy hodnota termoelektrického napětí větší nebo menší, předpokládá se, že se jedná o chybu měření způsobenou rušením a hodnoty, které ve výsledku dosahují řádově vyšších hodnot, se nezobrazí a ani se neprovede jejich zápis. Celé blokové schéma je ve smyčce typu While, která slouží k opakování algoritmu uvnitř smyčky po dobu platnosti zadané ukončovací podmínky. Jako ukončovací podmínka cyklu je zde tlačítko stop.

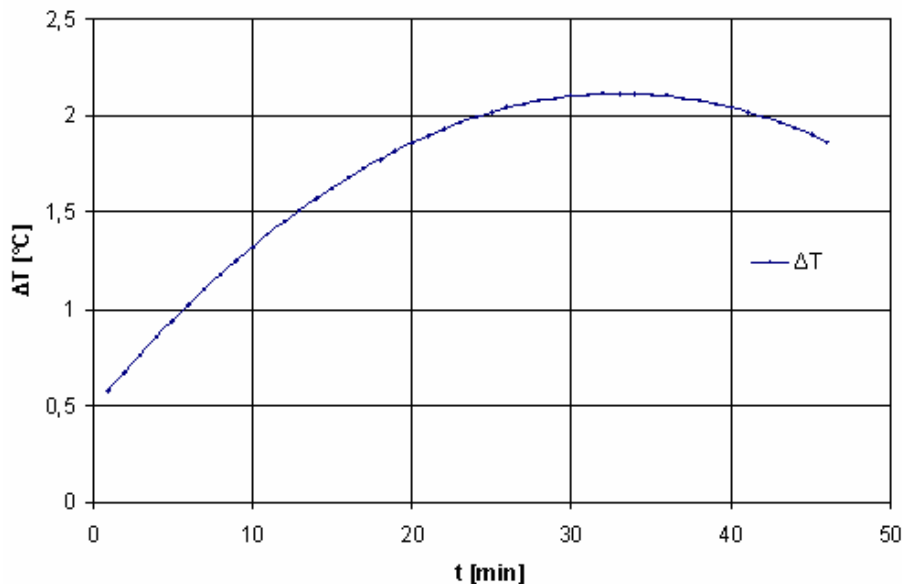
8.6 Korekční křivka

Měřením oteplení na asynchronním motoru prostřednictvím LabView za současného použití vzorce (15) pro přepočítání termoelektrického napětí na teplotu a následným porovnáním těchto hodnot s referenční hodnotou měřenou digitálním multimetrem METEX s termočlánkem, byly naměřeny charakteristiky zobrazené na Obr.8.10.



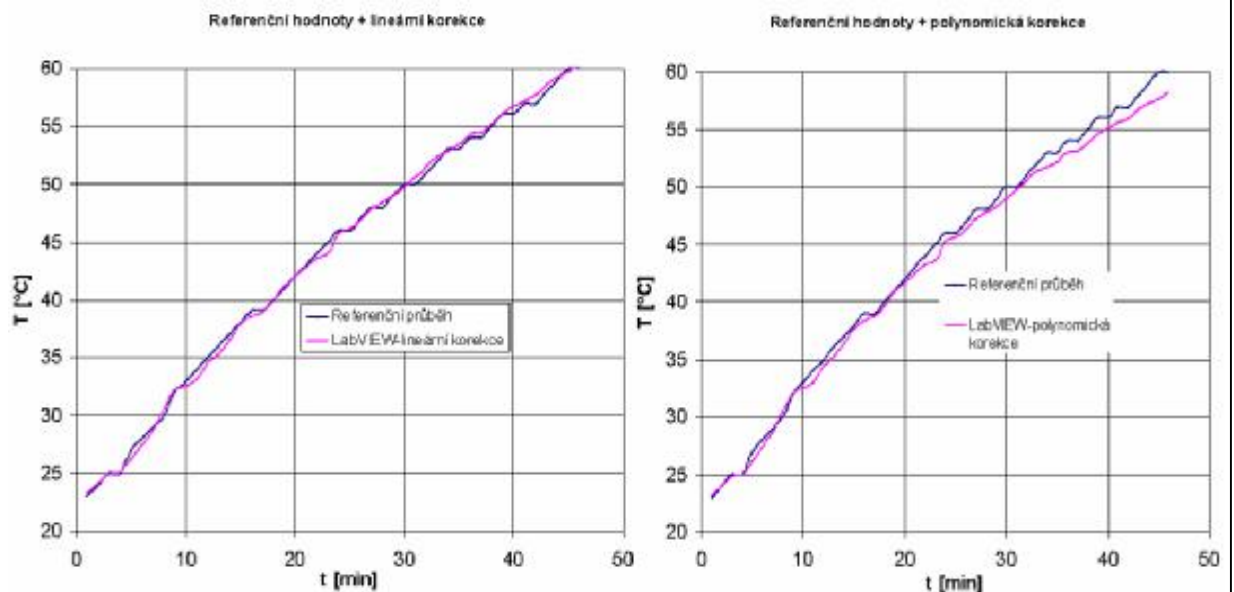
Obr. 8.10.: Měření oteplení na asynchronním motoru

Z obrázku je patrné, že se na měřeném teplotním rozsahu se vzrůstající teplotou rozdíl mezi oběma charakteristikami mění. Proto jsem do výpočetní části programu zahrnul korekci, jež tuto skutečnost minimalizuje. Pro určení teplotního rozdílu jsem v programu Excel nejprve z naměřených charakteristik vypočítal rovnice regrese, do kterých jsem dosadil měřený čas, a zjistil tak optimální exponenciálně rostoucí hodnoty teplot. Tyto hodnoty jsem v následujícím kroku od sebe odečetl a získal tak rozdíl teplot obou charakteristik. Tento rozdíl je zobrazen na následujícím obrázku.

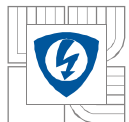


Obr. 8.11.: Rozdíl teplot referenčních a naměřených

Jak je z tohoto obrázku patrné nejedná se o ideálně lineární funkci, dala by se však zlinearizovat. Proto jsem pro korekční křivku navrhl jak polynomickou, tak lineární funkci. Při použití těchto korekcí a následného přepočítání naměřených hodnot jsem dospěl ke dvěma charakteristikám zobrazených na Obr.8.12. v porovnání s referenčním průběhem.



Obr. 8.12.: Korekční křivky



Pokud by se dané korekce vyjádřili číselně, jako přesnější by vyšla lineární korekce s odchylkou $\pm 0,8^\circ\text{C}$, což na teplotním rozsahu 60°C dělá chybu 1,3% oproti polynomičké korekci, jejíž chyba byla 2,5%. Do výpočtu tedy byla použita lineární korekce o číselné hodnotě:

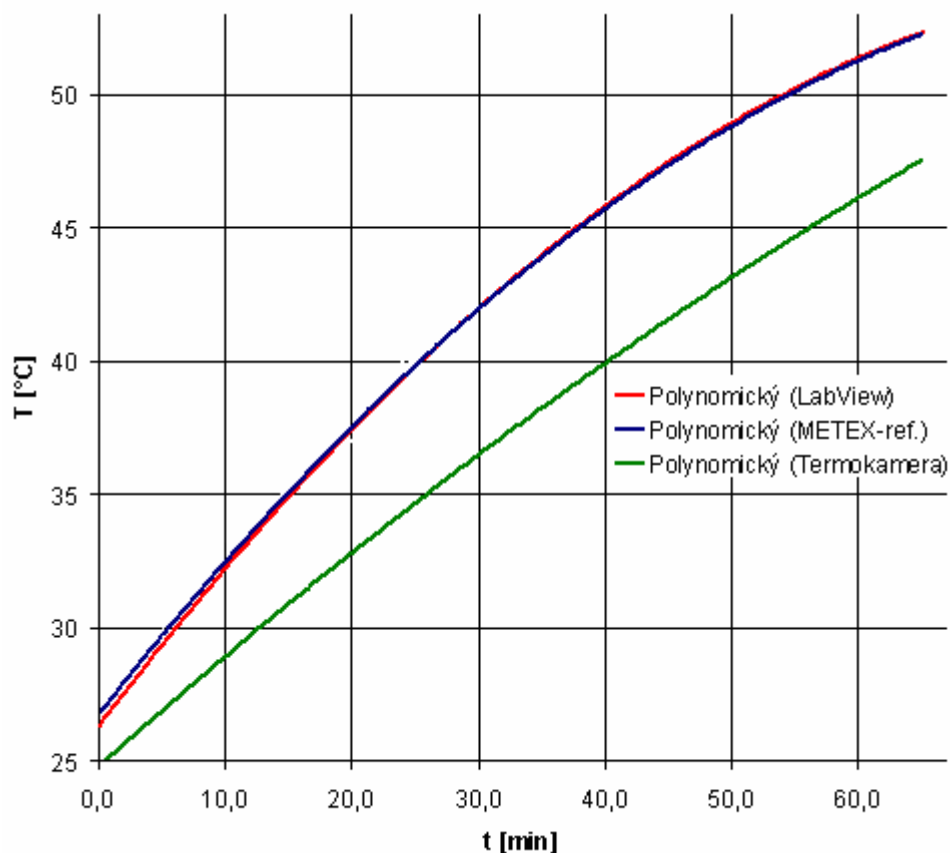
$$\Delta T = 0,05 \cdot T - 0,5 \quad (16)$$

kde T je teplota naměřená.

Hodnota ΔT se v následujícím kroku výpočtu přičte k hodnotě T a vzniklá hodnota je tak naměřená hodnota lineárně zkorigovaná.

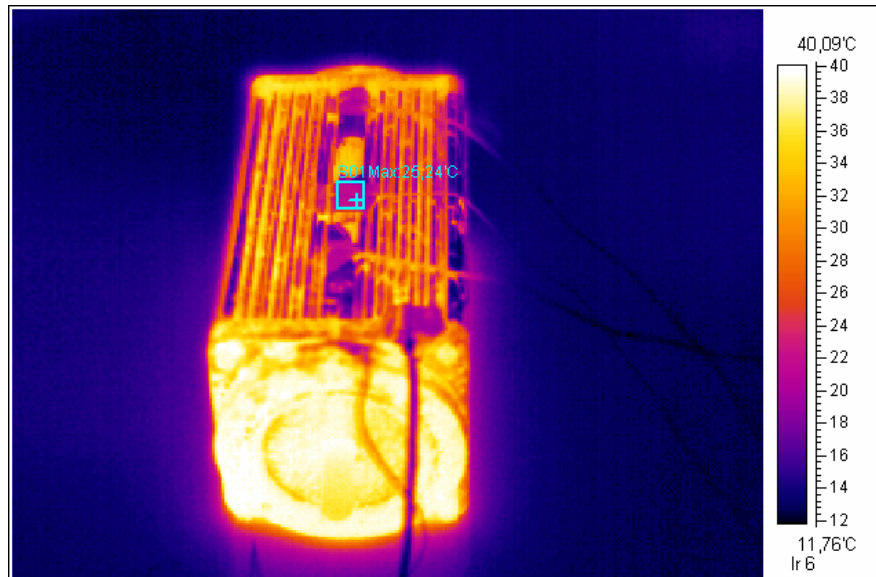
8.7 Výstupy měření

Při další zkoušce měření teploty pomocí LabView bylo provedeno oteplovací měření na asynchronním motoru, navíc byla současně měřena teplota referenčním termočlánkem, který byl připojen k digitálnímu multimetru METEX. Pro doplňkové měření byla použita termokamera SH-68/HY-6800. Na *Obr.8.13.* jsou zobrazeny již vhodně proložené naměřené průběhy teplot snímané jednotlivými zařízeními. Všechny zobrazené teploty byly měřeny ve stejném místě, aby nedocházelo k chybě měření způsobené rozdílnými teplotami různých částí motoru. Z obrázku je vidět, že lineární korekce doplněná do výpočetní části programu prakticky smazala rozdíly teplot mezi referenčním měřením pomocí digitálního multimetru s termočlánkem METEX a virtuálním měřicím přístrojem vytvořeným v programu LabView využívajícího jako čidla teploty také termočlánky. Hodnoty naměřené termokamerou vyšly podle teorie nižší. V další části jsou důvody chyby měření analyzovány.



Obr. 8.13.: Naměřené hodnoty po vhodném proložení

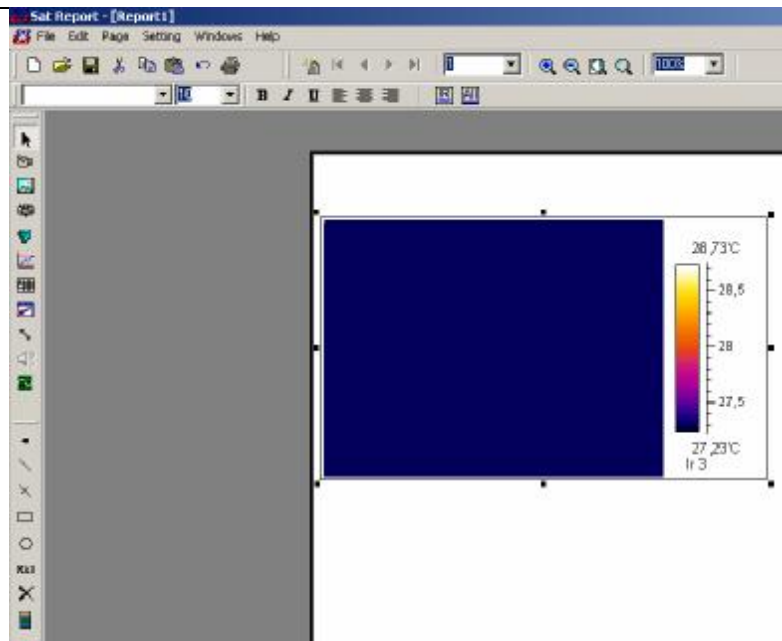
V případě termovizních snímků byla provedena zónová analýza z důvodu omezení chyb, které by vznikly při použití bodové analýzy. Tato chyba vzniká díky relativně velkému rozlišení kamery tím, že se analyzuje pouze jeden bod (pixel) z termovizního snímku, který může mít výrazně rozdílnou hodnotu než body okolní. Reálné vzdálenosti jsou přitom zanedbatelně malé, tudíž hodnoty teplot jsou přibližně stejné. V tomto případě s výhodou použijeme zónovou analýzu, která z vybrané plochy zobrazí předem nastavenou hodnotu teploty, buď průměrnou nebo maximální. Příklad užití této analýzy je na následujícím obrázku.



Obr. 8.14.: Využití zónové analýzy v programu SrS

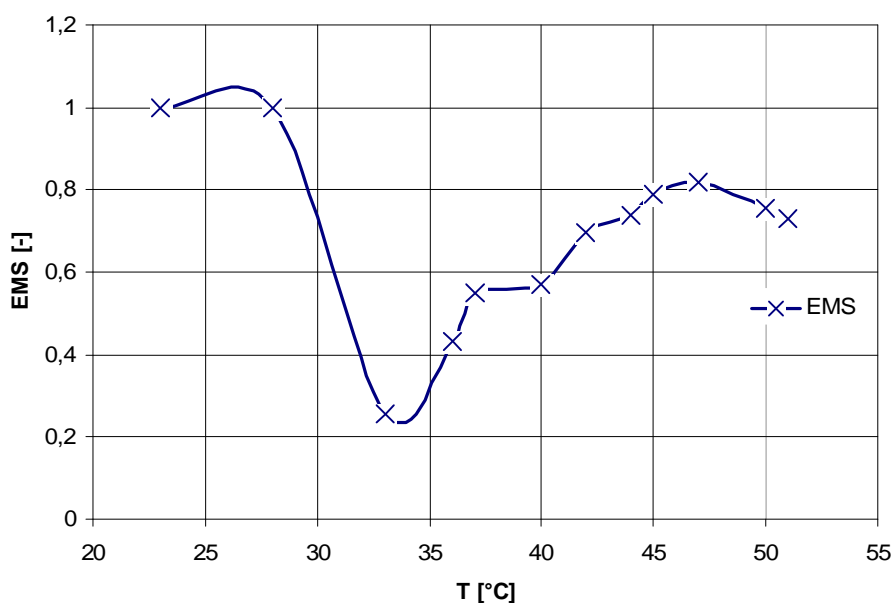
8.7.1 Zpracování naměřených hodnot z termokamery

Protože škála teplot zaznamenaných termokamerou má díky vlivu emisivity a dalších vlivů, jako jsou např. parazitní teplotní odrazy, prostupnost okolního prostředí, atd., malou vypovídací schopnost. Je proto vhodné tyto hodnoty před vyhodnocováním nejprve upravit v programu Sat report Standard (dále jen SrS) Obr.8.15: . Tento program je určen pro práci se snímky pořízenými termokamerou, které jsou ukládány ve formátu .SAT. Program SrS má k dispozici veškeré nastavení termokamery a je vybaven stejnými typy analýz. Díky těmto funkcím se při měření termokamerou nemusíme zabývat jejím nastavením (Obr.8.17.), ale pouze musíme dbát na kvalitní zaostření snímku. Veškeré nastavení a případnou volbu některé z analýz pak provedeme dodatečně po měření v programu SrS.



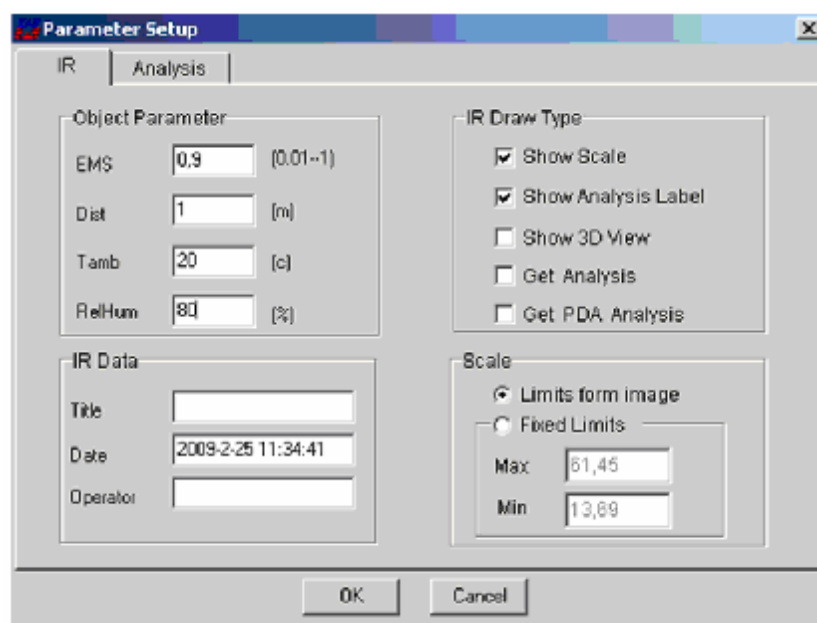
Obr. 8.15.: Program Sat report Standard

Jedinou, ovšem zásadní neznámou, je zde hodnota emisivity. Tuto hodnotu lze sice jednoduchým způsobem zpětně zjistit, pokud známe skutečnou (referenční) teplotu měřeného bodu, ovšem díky povrchové nehomogenitě materiálu (motoru) ji nelze aplikovat na celý měřený povrch. Navíc je tato hodnota silně nelineární v závislosti na teplotě. Tyto skutečnosti vedou k závěru, že pro přesné měření na tomto konkrétním motoru je použití termokamery vyloučené a dokonce i rozložení teploty na motoru je zavádějící díky nehomogennímu povrchu motoru. Proto byla alespoň v programu SrS zjištěna závislost emisivity materiálu na teplotě. Tato závislost je zobrazena na Obr.8.16.



Obr. 8.16.: Závislost emisivity na teplotě

Z obrázku je patrné, že měření oteplení nelze správně provádět při nastavení konstantní hodnoty emisivity. Navíc při zjišťování prvních dvou hodnot emisivit z programu SrS u termovizních snímků pořízených před měřením a chvíli po zahájení měření, byly zjištěny hodnoty emisivit větší než jedna. Podle teorie probrané v kapitole 2.5 dosahuje emisivita hodnot nacházejících se v intervalu (0-1). Pokud tedy dosáhla emisivita hodnot větších než jedna, je v tomto případě na vinně parazitní tepelné záření od okolních zdrojů (měřicí karta, obsluha atd.). Teplotní záření od ostatních zdrojů se odráží od měřeného objektu (hliníkový povrch) a je vyhodnocováno senzory. To se nejviditelněji projeví právě při začátku měření, kdy je teplota povrchu motoru stejná, jako je teplota okolí. Za těchto podmínek by měl obrys motoru splynout s okolím a nebyť tak rozeznán. Na termovizním snímku je však motor patrný a to díky již zmíněným teplotním odrazům. Hodnoty získané termokamerou jsou tak vyšší než reálné, tudíž emisivita roste nad max. hodnotu jedna. Pokus o částečné nahrazení termovizního snímku byl realizován v grafickém prostředí LabView.



Obr. 8.17.: Nastavení parametrů měření

Termokamera má poměrně velké rozlišení (FPA senzor 320x240) a ke každému pixelu (bodů) je přiřazen odstín barvy z barevné palety podle naměřené teploty, proto je vizuální efekt mnohem čitelnější, než je tomu u grafického výstupu v LabView. Tam o rozlišení rozhoduje počet senzorů, v našem případě čtyři, model je tak rozdělen do čtyř teplotních zón. Na vizuálním vjemu se také podílí nastavení barevné palety zobrazující teplotu, ta je v tomto případě nastavena na rozsah 20-80°C, a protože rozdíly teplot mezi jednotlivými čidly jsou poměrně malé, není velký rozdíl ani v barevném podání.

Na první pohled se tedy může zdát, že termokamera má větší vypovídací schopnost o rozložení teploty na povrchu motoru oproti programu LabView, avšak nesmíme zapomenout na emisivitu materiálů, která hraje zásadní roli v měření termokamerou. Díky jejímu vlivu jsou naměřené výsledky bez pomocných dotykových měření a programové analýzy prakticky nepoužitelné.

9 SHRNU TÍ

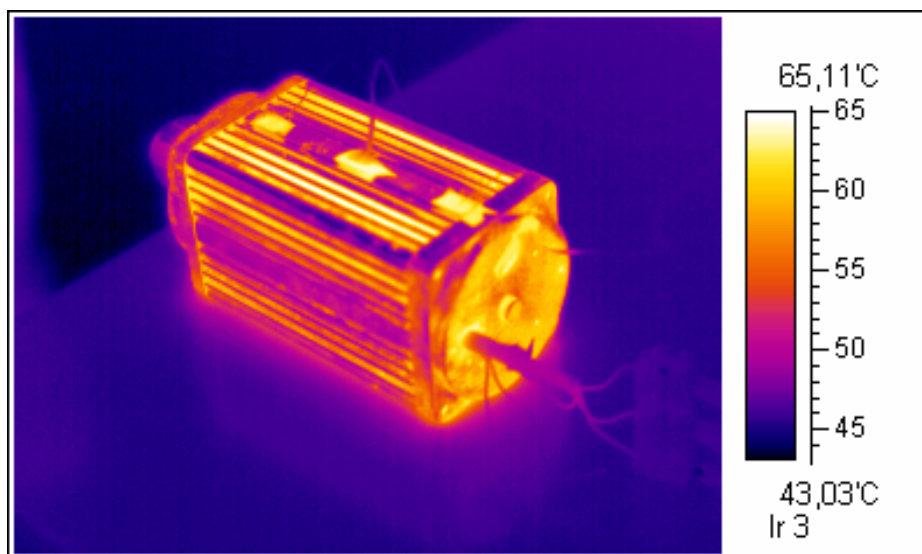
Teplotní analýzu asynchronního motoru jsem provedl dvěma dotykovými metodami za použití termočlánků a jednou bezdotykovou metodou za použití termokamery. V následující části se pokusím všechny použité metody zhodnotit, co se týče přesnosti, použitelnosti a nároků na obsluhu.

Jako referenční měřicí zařízení byl použit multimetr METEX, jemuž jako čidlo sloužil termočlánek. Termočlánek jsou obecně v podobných měřicích aplikacích hojně používány a jejich použití definuje norma ČSN-EN 60584-1. Měřicí zařízení METEX bylo zkalibrováno, proto jeho hodnoty byly brány jako správné (referenční). Způsob tohoto měření (dotykové) zanášel do měření chybu v podobě teplotního odporu na rozmezí čidla a měřeného přístroje. Tento způsob měření lze s výhodou použít pro jednokanálové měření, při kterém je interval ručního odečítání hodnot takový, aby obsluha stihla tyto hodnoty zaznamenávat. Pokud ovšem chceme současně zapisovat hodnoty z více čidel, pak je nutné k měření přizvat další obsluhu. Navíc bychom k měření pro každé čidlo potřebovali vlastní multimetr, což by bylo nevhodné. Pro rychlé, dlouhodobé a vícekanálové měření je tento způsob tedy nevhodný.



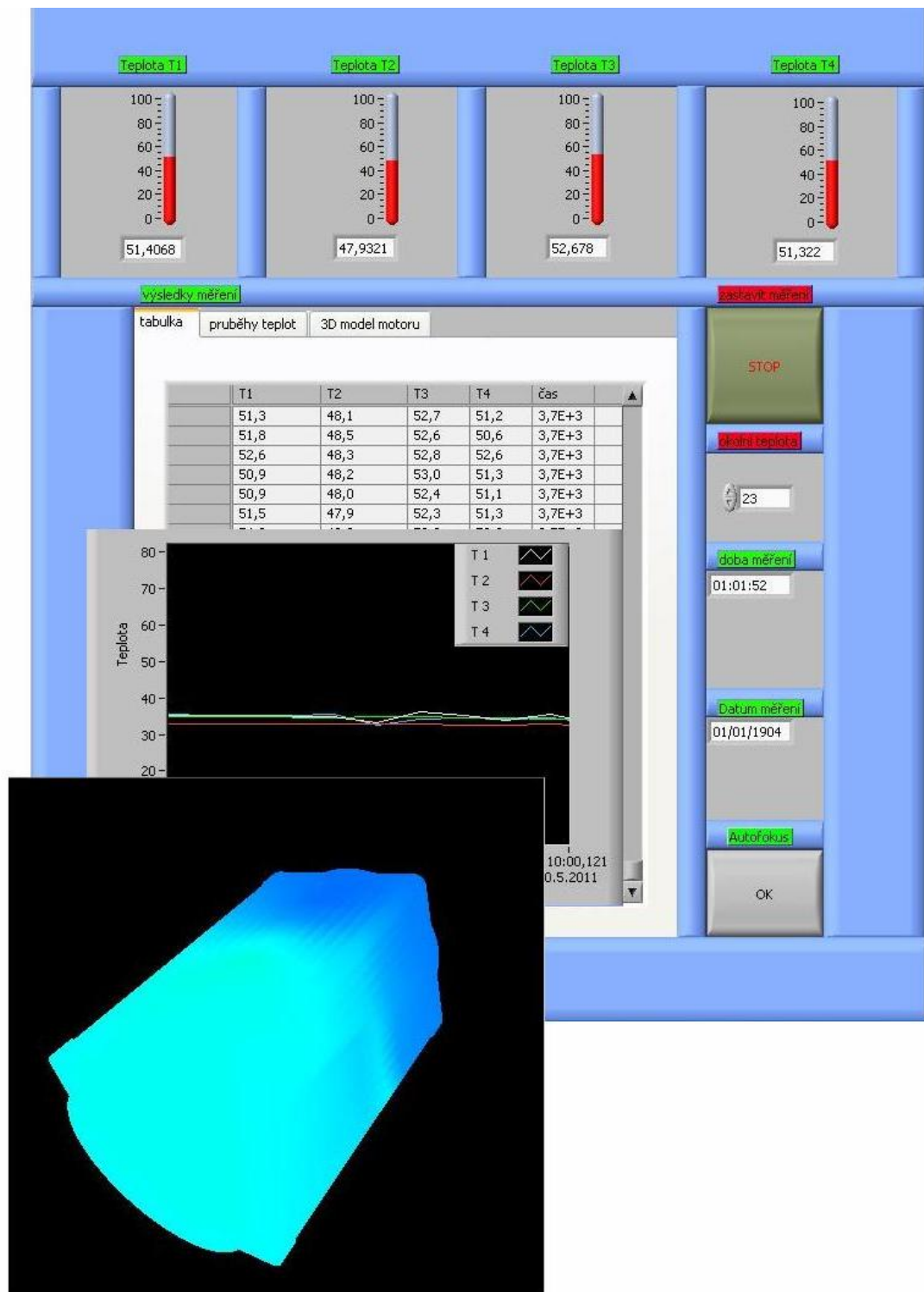
Obr. 9.1.: Digitální multimetr METEX [9]

Teplotní analýza s pomocí termokamery je neinvazivní, poměrně rychlé měření, které zobrazuje rozložení teplotního pole na celém povrchu měřeného zařízení (motoru). Jedná se o zachycení teplotního záření maticovým senzorem a následného přepočtu na teplotu. Pro správný přepočet je nutné znát konstanty měření, a to zejména emisivitu měřeného materiálu, vzdálenost měření, vlhkost prostředí a teplotu okolí. Dále je nutné se vyvarovat měření lesklých předmětů z důvodu parazitních odrazů teplotního záření z jiných tepelných zdrojů. I za splnění těchto podmínek při tomto konkrétním měření nedosáhneme přesných výsledků, a to zejména kvůli nelineární závislosti emisivity na okolní teplotě a nehomogenitě povrchu měřeného motoru. Obsluha má zde za úkol v daných intervalech zaostřovat a ukládat termovizní snímky. Tyto úkony je nutné provádět ručně. Nároky na obsluhu jsou zmírněny předpokladem, že se nastavení konstant měření provede dodatečně v programu SrS a není nutno hodnoty upravovat před každým uložením snímku. Za tohoto předpokladu ovšem musí být měření doplněno jiným (dotykovým) typem měření, kvůli zjištění správné teploty. Díky výše zmíněným důvodům je termovize jako nástroj pro tepelnou analýzu tohoto typu motoru nevhodný.

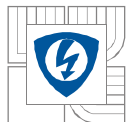


Obr. 9.2.: Ukázka teplotní analýzy pomocí termovize

Teplotní analýza s využitím možností programu LabView využívá jako senzory teploty termočlánky, jejichž signály v podobě termoelektrického napětí jsou v měřicí kartě převedeny do digitální podoby a dále zpracovávány v programu LabView. Nevyužívá tak řadu dalších obvodů, které se spolu s termočlánky používají např. pro potlačení rušení atd. Všechna opatření jsou ale provedena programově, tak aby bylo dosaženo srovnatelné přesnosti měření. Oproti výše zmíněným způsobům má měření pomocí virtuálního měřicího přístroje následující výhody. Současně je možné získávat data až z šestnácti samostatně připojených termočlánků a podle nastavení DAQ Assistantu volit interval odečítání hodnot. Výpočet je zde zapsán v bloku a lze jej tedy dodatečně upravovat (např. při použití jiného typu termočlánku). Hodnoty jsou přehledně zobrazovány a zapisovány do tabulky a posléze ukládány do souboru. Je tedy možnost tyto hodnoty dále zpracovávat. Obsluha se po spuštění měření nemusí o nic starat a pouze kontroluje naměřené hodnoty a, až dosáhne objekt požadované teploty nebo vyprší časový interval oteplovací zkoušky, měření ukončí. Do výpočtu lze přidávat výpočtové korekce, případně další zobrazovací a pomocné funkce podle přání uživatele a vzniklých podmínek při měření.



Obr. 9.3.: Grafické výstupy virtuálního měřícího přístroje



10 ZÁVĚR

Oteplovací charakteristika jako teplotní zkouška patří k základním výstupním měřením u většiny typů motorů. Běžné měření je doprovázeno množstvím chyb a nejistot způsobených obsluhou, které mají za následek nepřesné měření a mohou vést k špatnému posouzení teplotního stavu motoru. Těchto chyb je možno se vyvarovat pomocí částečně automatizovaného měření, které zajistí možnost nastavení odečítací frekvence a pokud máme současně připojeno více čidel, jsou tyto hodnoty odečteny ve stejném nebo zanedbatelně malém rozdílovém čase.

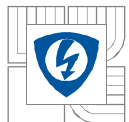
Práce tedy byla zaměřena na vytvoření takového způsobu měření. Jako nástroj byl využit program LabView, v němž byl vytvořen virtuální měřicí přístroj. Jako rozhraní mezi čidly teploty a digitálním signálem jdoucím do PC byla s výhodou využita měřicí karta od firmy National Instruments USB 6251, která disponuje až šestnácti analogovými vstupy.

Při tvorbě samotného programu bylo nutné postupovat tak, aby byla zachována co největší přesnost měření, která byla dána přepočtem termoelektrického napětí na teplotu. Ovládání a nastavování programu bylo jednoduché a grafické výstupy přehledné a srozumitelné. Bylo také žádoucí naměřené hodnoty uchovávat v souboru pro další zpracování.

Na základě těchto požadavků jsem vytvořil program, který přepočítává termoelektrické napětí na teplotu a zobrazuje její číselnou hodnotu. Samotný přepočet je proveden pomocí inverzního polynomu devátého stupně rovnice (15), jehož užití udává norma. Po provedení pokusného měření jsem na základě naměřených výsledků provedl ještě korekční výpočet, jež jsem zahrnul do výpočetní části programu. Při opětovném srovnávacím měření již naměřené hodnoty pomocí LabView a referenčního teploměru byly téměř totožné viz. *Obr.8.13*. Po zvládnutí přepočtu termoelektrického napětí na teplotu a jeho provedení v programu jsem se zabýval grafickými možnostmi programu. Kromě číselných zobrazení jednotlivých kanálů, zápisu do tabulky a grafu závislosti jednotlivých teplot na čase, je v programu využita funkce pro zobrazení rozložení teploty na 3D modelu měřeného motoru. Pro tento případ jsem nejprve musel vytvořit v programu Autodesk Inventor model měřeného motoru v měřítku. Po nahrání modelu v požadovaném formátu do funkčního bloku byly na model umístěny virtuální body měření, které odpovídaly fyzickému umístění čidel na motoru. V průběhu měření tak bylo možné pozorovat rozdíly teplot reprezentované barevnou paletou mezi jednotlivými čidly. Model motoru bylo možné během měření natáčet do zvolené polohy.

Jelikož se jedná o měření napětí v řádech milivoltů, je toto měření náchylné na rušení. Jelikož měření bylo provedeno bez použití kompenzačního vedení a obvodových prvků, které se obvykle při tomto typu měření využívají a jež tyto a další chyby korigují, byla částečná korekce omezení zobrazení a zápisu chybových hodnot vzniklých rušení provedena přímo v programu LabView.

Celkově tak vznikl virtuální měřicí přístroj, jež je schopen na požadovaném rozsahu měřit teplotu na více bodech současně a zároveň disponuje pro uživatele jednoduchým ovládáním a dostatečnými grafickými výstupy. Program byl během jeho realizace používán v laboratořích předmětu BVNP, kde byl využit pro měření teplotních charakteristik vysokonapěťového odpínače. Díky své jednoduchosti a variabilitě může být použit pro teplotní měření nejen ve školních laboratořích ale i např. na zkušebnách.



LITERATURA

- [1] ROUBÍČEK, Ota. Elektrické motory a pohony. 1. Praha : BEN, 2004. 192 s.
- [2] KREIDL, Marcel. Měření teploty : senzory a měřicí obvody. 1. Praha : BEN, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [3] VLACH, Jaroslav; HAVLÍČEK, Josef; VLACH, Martin. Začínáme s LabVIEW. 1. Praha : BEN, 2008. 248 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [4] FUKÁTKO, Jaroslav; FUKÁTKO, Tomáš. Teplo a chlazení v elektronice 2. 1. Praha : BEN, 2006. 120 s. ISBN 80-7300-199-3.
- [5] Excolo.cz [online]. 2008 [cit. 2011-05-16]. Indikátory teploty. Dostupné z WWW: <<http://www.excolo.cz/prodej/meridla/indikatory>>.
- [6] ONDRŮŠEK, Čestmír. Elektrické stroje. 107 s. Vysoké učení technické v Brně. Skripta
- [7] Cs.wikipedia.org [online]. 2009 [cit. 2011-04-17]. Shannonův teorém. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Shannonův_theorem>.
- [8] Sine.ni.com [online]. 2009 [cit. 2011-04-27]. High-Speed M Series Multifunction DAQ for USB. Dostupné z WWW: <<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-20/lang/en>>.
- [9] ghvtrading.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-30]. METEX INSTRUMENTS. Dostupné z WWW:<http://www.ghvtrading.cz/merici-pristroje/provozni/digitalni-multimetry/m3890d.html>>.