

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

TEPELNÁ OCHRANA ELEKTRICKÉHO STROJE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

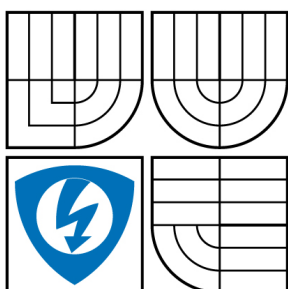
MARTIN NĚMEC

BRNO 2009



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

TEPELNÁ OCHRANA ELEKTRICKÉHO STROJE

ELECTRICAL MACHINE THERMAL PROTECTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

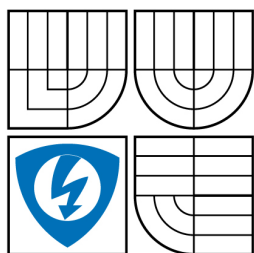
MARTIN NĚMEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ALEŠ MIKULČÍK

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Martin Němec

ID: 72783

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Tepelná ochrana elektrického stroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Podle zvoleného řešení navrhnete tepelnou ochranu pro daný typ elektrického stroje.
2. Provedte měření na vyrobené tepelné ochraně.
3. Vytvořte model elektrického stroje a tepelné ochrany v prostředí Matlab-Simulink.
4. Srovnajte výsledky měřené s modelem a zhodnoťte práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 29.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Aleš Mikulčík

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá v první části návrhem ochrany pro jednofázový motor. Dále pak rozložením teploty v motoru, tato kapitola je důležitá z hlediska volby ochrany s termistorovým čidlem. V následujících kapitolách je popsáno měření parametrů motoru a tvorba simulačního schématu, to je tvořeno v programu Matlab v nástavbě Simulink. V poslední části práce jsou porovnávány hodnoty naměřené a simulované.

Abstract

This bachelor's thesis deals with proposal for thermal protection of single-phase motor. The single part of thesis is devoted to collocation of motor temperature. Knowing this issue is important for thermistor right location. The parameters measuring and the model of simulated scheme are described in following parts. The simulated scheme is created in the Matlab programme, in a programme's superstructure Simulink. At the close of this thesis, there are values measured and simulated compared.

Klíčová slova

tepelná ochrana; motor; oteplovací charakteristika; teplota; model

Keywords

thermal protection; motor; heating curve; temperature; model

Bibliografická citace

NĚMEC, M. Tepelná ochrana elektrického stroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Mikulčík.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Tepelná ochrana elektrického stroje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

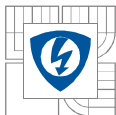
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících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

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

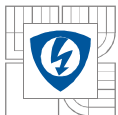
Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Aleši Mikulčíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne Podpis autora



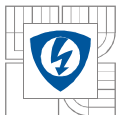
OBSAH

1 ÚVOD	11
2 TEPLA A JEHO VZNIK	12
2.1 ŠÍŘENÍ TEPLA	13
2.2 MĚŘENÍ TEPLA	15
3 KONSTRUKCE ELEKTRICKÝCH MOTORŮ	19
3.1 ŽIVOTNOST ELEKTRICKÝCH STROJŮ	20
4 NÁVRH TEPELNÉ OCHRANY PRO KOMUTÁTOROVÝ MOTOR	21
4.1 KALIBRACE OCHRANY	23
4.2 SEZNAM SOUČÁSTEK	23
5 ROZLOŽENÍ TEPLoty V MOTORU	25
6 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MOTORU A OCHRANY	27
6.1 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA	27
6.2 MĚŘENÍ NA OCHRANĚ	29
7 SIMULACE MOTORU A OCHRANY	33
7.1 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ	33
7.2 TVORBA SIMULAČNÍHO SCHÉMATU	36
8 POROVNÁNÍ SIMULACE A MĚŘENÍ	42
9 ZÁVĚR	44
LITERATURA	45
PŘÍLOHY	46



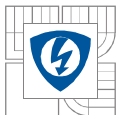
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2-1: Oteplovací křivka</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 2-2: Provedení bolometru</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2-3: Teplotní charakteristika PTC termistoru.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 2-4: Teplotní charakteristika NTC termistoru</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4-1: Schéma zapojení ochranného obvodu.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 4-2: Obrazec DPS ze strany spojů.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 4-3: Osazovací plán pohled ze strany součástek.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 4-4: Označení vývodů tranzistoru</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 4-5: Označení vývodů operačního zesilovače.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 5-1: Motor těsně po rozběhnutí.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 5-2: Motor po ustálení oteplení motoru.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 6-1: Schéma zapojení při měření přechodových charakteristik.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 6-2: Ukázka naměřených hodnot oteplovací charakteristik.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 6-3: Schéma měření příkonu</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 6-4: Schéma zapojení ovládací části</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 7-1: Importování dat pro vytvoření přenosové funkce</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 7-2: Nastavení Process modelu v toolboxu System Identification</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 7-3: Nastavení Zero-Pole.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 7-4: Bloky reprezentující vstupní signál.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 7-5: Výstup signálu ze simulačního schématu</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 7-6: Simulace ochrany.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 7-7: Kompenzace teploty.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 7-8: Celkové simulační schéma.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 7-9: Oteplovací charakteristiky motoru.....</i>	<i>41</i>



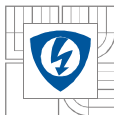
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 2-1: Druhy termočlánků.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 3-1: Třídy používaných izolací vodičů.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 6-1: Příkon ochrany.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 6-2: Příkony komerčních výrobků.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 6-3: Odpínací časy pro štít motoru.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 6-4: Odpínací časy pro statorové plechy (levá strana).....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 8-1: Tabulka hodnot ustálené teploty.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 8-2: Tabulka odpínacích časů ochrany pro štít motoru.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 8-3: Tabulka odpínacích časů ochrany pro statorové plechy (levá strana).....</i>	<i>43</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\Delta\vartheta$ [K]	okamžité oteplení
$\Delta\vartheta_{\max}$ [K]	ustálené oteplení
A [m ²]	ochlazovací povrch
c [JK ⁻¹ m ⁻³]	měrná tepelná kapacita
OZ	operační zesilovač
R [Ω]	odpor při teplotě T
R_0 [Ω]	odpor při teplotě T_0
t [s]	čas
V [m ³]	objem
β [K]	teplotní konstanta
τ [s]	časová konstanta

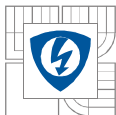


1 ÚVOD

Jako v každém stroji i v elektrickém vzniká při jeho provozu teplo. To znamená velké namáhání pro všechny části stroje. Z toho důvodu může docházet k poruchám stroje, zkratům případně i zničení daného stroje. To je jeden z hlavních důvodů, proč stroje chráníme, tím dalším jsou velké finanční ztráty v průmyslu. Většina elektrických strojů je právě umístěna v průmyslu, a pokud nastane porucha stroje, vznikají značné finanční ztráty jako důsledek zastavení výroby, které jsou daleko vyšší než oprava daného stroje. Dalším důvodem proč používáme tepelné ochrany je prodloužení životnosti elektrického stroje. Ta se zkracuje především díky působení vysoké teploty na izolaci stroje. Hlavní funkcí ochrany je odpojit daný stroj, ještě než dojde k jeho poškození.

Práce se zabývá v první části návrhem ochrany pro jednofázový komutátorový motor. V této části je popsán princip činnosti a úvahy při návrhu ochrany. Dále pak rozložení teploty v motoru s ukázkou snímků z termokamery na konkrétním motoru. Tato kapitola je důležitá z hlediska volby ochrany s termistorovým čidlem. V následujících kapitolách je popsáno měření parametrů motoru a tvorba simulačního schématu, které je tvořeno v programu Matlab v nástavbě Simulink. V poslední části práce jsou porovnávány hodnoty naměřené a simulované.

Cílem práce je navrhnout tepelnou ochranu motoru a aplikovat ji do praktického použití. Následně vytvořit simulaci tohoto systému, abychom mohli již předem předpokládat teplotu motoru a působení ochrany.



2 TEPLO A JEHO VZNIK

Teplu v elektrických strojích vzniká dvěma způsoby:

- průchodem proudu vodičem,
- třením pohyblivých částí.

Průchodem proudu vodičem vznikají Jouleovy ztráty, které mají za následek vznik tepla. Příčinou těchto ztrát jsou pružné srážky nosičů náboje s jinými nosiči, atomy nebo krystalovou mřížkou. Velikost ztrát resp. vzniklého tepla závisí na hodnotě proudu, který prochází danou látkou a na její rezistivitě. Čím větší je protékající proud, tím více nosičů látkou prochází a je i větší počet srážek. Látka s větší rezistivitou klade větší odpor průchodu proudu a opět nastává více srážek. Vzniklé teplo se rozdělí na dvě složky, jedna z nich se odvede přes povrch vodiče do okolí a druhá zůstane ve vodiči a nadále zvyšuje jeho teplotu. Tento děj lze vyjádřit rovnicí

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Delta \vartheta dt + c V d(\Delta \vartheta) \quad (1)$$

z této rovnice lze vyjádřit vztah pro okamžité oteplení

$$\Delta \vartheta = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \left(1 - e^{-\frac{\alpha_0 A}{cV} t}\right) = \Delta \vartheta_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (2)$$

Pokud tento děj vyneseme do grafu, dostaneme exponenciálu, která se blíží hodnotě ustáleného oteplení s danou časovou konstantou. Tato časová konstanta udává dobu, za níž těleso dosáhne 63,2% ustáleného oteplení. Maximálního oteplení dosáhne za předpokladu, že neexistuje odvod tepla z povrchu tělesa.

Časová konstanta je doba, za kterou by přechodový děj dosáhl maximální hodnoty, pokud by narůstal stále stejnou rychlostí jako na počátku děje.

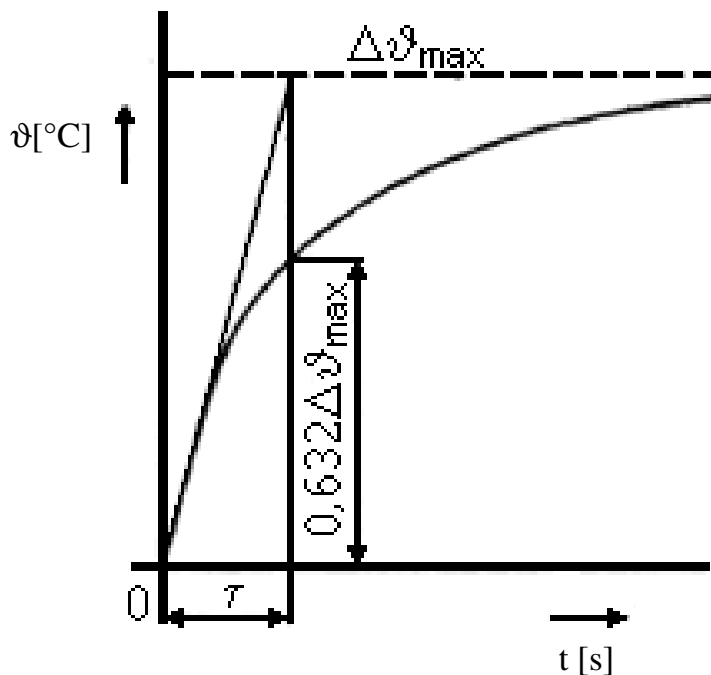
Hodnota 63,2% vyplývá z definice časové konstanty. Pokud do rovnice 3 dosadíme za čas t velikost časové konstanty, dostaneme následující vztah

$$\Delta \vartheta(\tau) = \Delta \vartheta_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}\right) = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{-1}) = \Delta \vartheta_{\max} \cdot 0,632 \quad (3)$$

Z této rovnice je patrné, že za uplynutí doby rovné časové konstantě vzroste teplota na hodnotu 63,2%.

Pro určení časové konstanty lze použít tři metody:

- metoda tečny v počátku,
- metoda využívající definici časové konstanty,
- logaritmování vztahu.



Obrázek 2-1: Oteplovací křivka[4]

Důvodem vzniku tepla v elektrických strojích jsou jejich ztráty. V běžné praxi se uvažuje, že až 90% ztrát se přemění na teplo. Ztráty můžeme rozdělit podle jejich vzniku následovně:

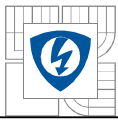
- ztráty ve vinutí – závisí na odporu vinutí a kvadrátu proudu jím procházejícího,
- ztráty v magnetickém obvodu – pod tímto pojmem jsou obsaženy ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní,
- mechanické ztráty – obsahují ztráty způsobené třením v ložiscích, třením kartáčů o komutátor, ztráty třením rotujících částí o vzduch,
- dodatečné ztráty – do této skupiny patří ztráty na komutátoru, ztráty vyššími harmonickými atd.

2.1 Šíření tepla

Tento děj lze popsat také jako přenos energie, která je ve formě tepla, v prostoru a v čase. Šíření tepla je samovolný a nevratný proces, jenž probíhá v nehomogenním tepelném poli z míst teplejších do míst s nižší teplotou.

Sdílení tepla nastává třemi způsoby:

- vedením (kondukcí),
- prouděním (konvencí),
- zářením (radiací).



2.1.1 Sdílení tepla vedením

Pro tento způsob přenosu tepla je nutná přítomnost hmoty, je však jedno jestli kapalná, plynná nebo pevná fáze. Základním principem je výměna vnitřní energie mezi mikročásticemi uvnitř hmoty. Aby docházelo k výměně vnitřní energie mezi částicemi, musí nastávat srážky částic. Při srážce se mění kinetická energie na vnitřní energii. Z tohoto je patrné, že množství přeneseného tepla závisí nejen na vnitřní struktuře hmoty, ale i na množství vnitřních nosičů energie a pravděpodobnosti jejich srážky. Z těchto poznatků vyplývá, že ne všechny materiály mají stejnou schopnost vést teplo. Materiály s větším počtem vnitřních nosičů energie (volných elektronů), např. kovy, lépe vedou teplo než materiály, kde volné elektrony prakticky nejsou, např. izolanty.

2.1.2 Sdílení tepla prouděním

Při tomto šíření tepla jde principiálně o přenos hmoty, na které je teplo vázané. Sdílení tepla prouděním může existovat ve všech skupenstvích, ovšem pro proudění u pevných látek je zapotřebí poměrně velká energie na přesun látky. V běžné praxi se nejčastěji setkáváme s prouděním u kapalin a plynů. Ty pak svým pohybem prostřednictvím hmoty přenáší teplo. Rozeznáváme dva typy proudění:

- přirozené,
- nucené.

2.1.3 Sdílení tepla zářením

Tento typ sdílení tepla se liší od předchozích tím, že zde není zapotřebí přítomnost hmoty. Princip sdílení tepla zářením je následující. Těleso o velké teplotě vyzařuje tepelnou energii prostřednictvím elektromagnetických vln, které se dále šíří. Pro šíření vln v prostředí platí zákony optiky. Při dopadu záření na jiné těleso resp. hmotu se vlny buď absorbují, odráží nebo prochází hmotou. Každé těleso, které má teplotu větší než je absolutní nula, je generátorem elektromagnetického záření, ale zároveň i příjemcem záření od jiných těles. Existuje několik zákonů pro přenos tepla zářením:

- Snellův,
- Lambertův,
- Stefan-Boltzmannův,
- Planckův,
- Wienův,
- Kirchhoffův.

2.2 Měření tepla

V běžné praxi je velikost tepla nejen obtížně měřitelná, ale má i pro mnohé nízkou vypovídající hodnotu. Proto se častěji měří teplota. Měření teploty lze rozdělit na kontaktní a bezkontaktní způsoby.

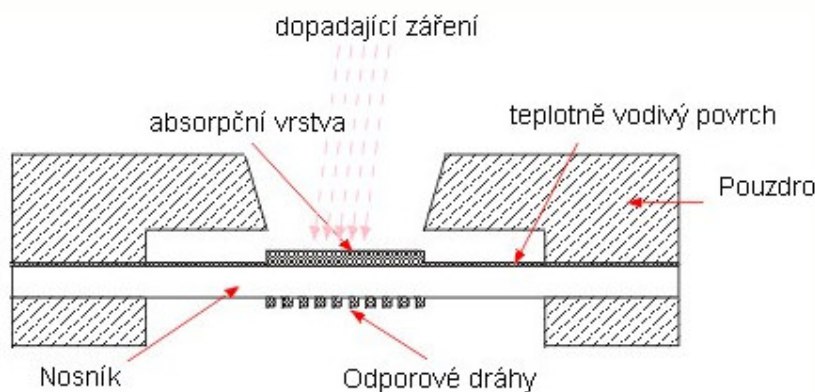
2.2.1 Bezkontaktní měření

Pro bezkontaktní měření lze použít termokameru, která pro měření teploty využívá neviditelného infračerveného záření. Výstupem z termokamery je teplotní pole ve formě obrázku, nejčastěji formát sat. Ten je určen k ukládání a výměně dat, která obsahují systémy založené na jádře ACIS. Trojrozměrná tělesa jsou ukládána ve formě hraničních modelů, tímto dosáhneme zkrácení doby zobrazení a zmenšení velikosti. V současné době téměř všechny kamery používají IR senzory ve formě čipu (bolometry).

2.2.1.1 Bolometr

Bolometry pracují na principu pyrometrie, která spočívá v měření celkového vyzářeného tepelného výkonu pomocí infračerveného záření. Velmi častá je integrace bolometrů na čip v uspořádání do matice. Integrované obvody se stovkami až tisíci bolometry označujeme jako mikrobolometry.

„Princip bolometrického detektoru infračerveného záření je znám od 80. let 19. století a princip činnosti je jednoduchý, dá se říct, že je vzdáleně podobný kovovým odporovým sensorům teploty. Elektrický odpor bolometru se zde také mění v závislosti na jeho teplotě, která však závisí na množství absorbovaného dopadajícího infračerveného záření. Množství dopadajícího záření může být tedy určeno ze změn odporu bolometru. Aby však byla změna teploty bolometru úměrná pouze absorbovanému infračervenému záření, musí být vlastní bolometr tepelně izolován od svého okolí.“[9]



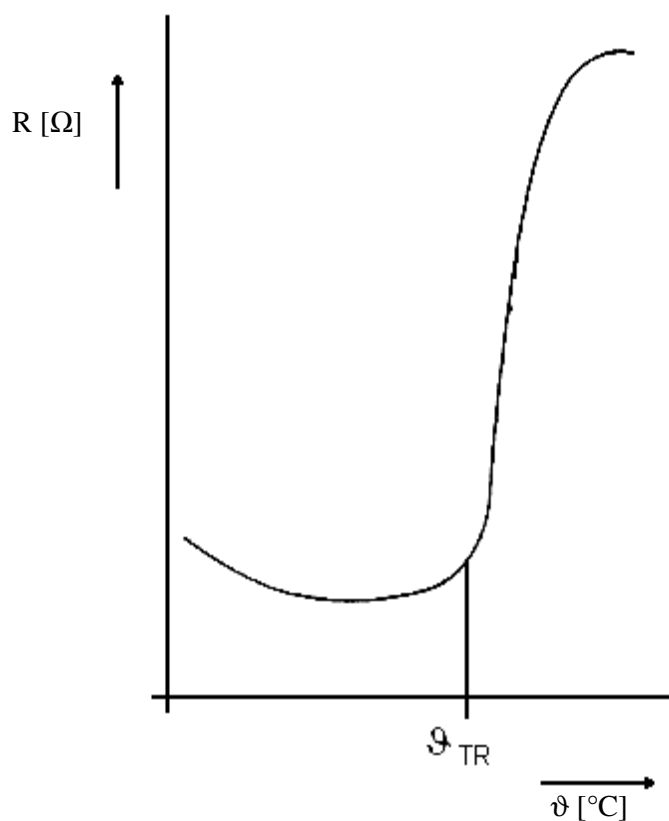
Obrázek 2-2: Provedení bolometru

2.2.2 Kontaktní měření

Při měření kontaktním způsobem se využívají následující čidla ve spojení s vhodným převodníkem, který převede hodnotu naměřenou na čidle na teplotní údaj.

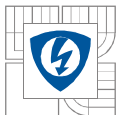
2.2.2.1 PTC termistor

Termistory PTC (pozistory) zvětšují svůj odpor s rostoucí teplotou, mají kladný teplotní součinitel odporu. Průběh teplotní charakteristiky není jednoznačný. V první části pozistor vykazuje velmi malý záporný teplotní součinitel, po překročení Curieho teploty velký kladný teplotní součinitel a v nejvyšších teplotách opět záporný teplotní součinitel, ovšem tato část rozsahu se již nepoužívá. Dochází zde k nevratným změnám vlastností termistoru. Vyrábějí se z polykrystalické keramiky, např. z titaničitanu barnatého (BaTiO_3), spékáním přesně řízených práškových směsí obvykle do tvaru malého disku.



Obrázek 2-3: Teplotní charakteristika PTC termistoru [6]

θ_{TR} ... teplota přechodu



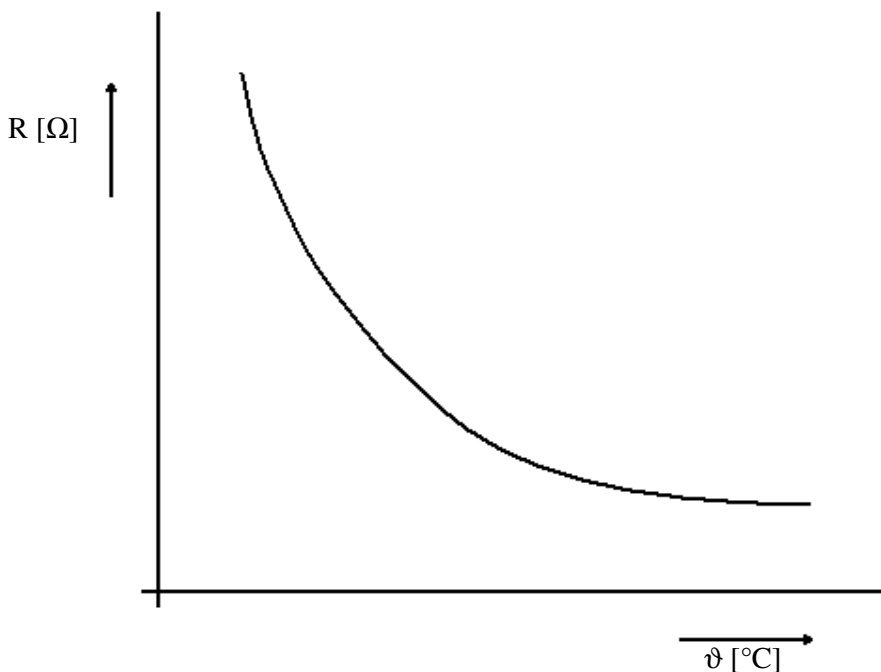
2.2.2.2 NTC termistor

Termistory NTC (negastory) zmenšují svůj odpor s rostoucí teplotou, z čehož plyne, že mají záporný teplotní součinitel odporu. Vyrábějí se práškovou technologií z oxidů kovů, např. mangan, kobalt, měď, titan, železo a nikl. Negastory mohou pracovat v poměrně velkém rozsahu teplot cca -200°C až 1000°C , záleží na použitých oxidech a jejich poměru při výrobě.

Odpor v závislosti na teplotě můžeme určit pomocí vztahu:

$$R = R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (4)$$

kde R_0 [Ω]...odpor při teplotě T_0
 R [Ω]...odpor při teplotě T
 β [K]...teplotní konstanta, závislá na materiálu

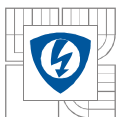


Obrázek 2-4: Teplotní charakteristika NTC termistoru [6]

2.2.2.3 Termočlánek

Termočlánek je založen na principu termoelektrického jevu. Což znamená vznik napětí, který nastává při teplotních rozdílech mezi dvěma rozdílnými kovy nebo polovodiči. Vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia.

Termočlánek je složen ze dvou vodivých materiálů. Ty jsou spojeny na jednom konci, který se nazývá měrný spoj. Zbylé dva konce tvoří referenční spoj. Mezi volnými konci můžeme



naměřit napětí, které je dáno materiálem termočládku a rozdílem teplot mezi referenčním a měrným spojem.

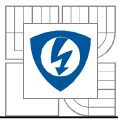
Materiál na výrobu termočládků musí mít stabilní údaje při dlouhodobém provozu a být odolný proti chemickým a mechanickým vlivům. Jako ochrana termočládku se používá keramická ochrana (korund) a dále je obalen ochranným pláštěm z kovu NiCr nebo Ni.

Termočlánek, který je používán pro provozní měření by měl být pravidelně kontrolován v intervalu 1 až 1,5 roku. Pro zjištění stavu termočládkového snímače lze s výhodou využít měření jeho elektrického odporu. Nízká hodnota odporu obecně indikuje uspokojivý stav, zatímco vysoký odpor může signalizovat konec životnosti termočládku.

Typy termočládků

Typ	Teplotní rozsah	Materiál
Typ B	0 - 1700 °C	PtRh6-PtRh30
Typ C	0 - 2300 °C	WRh-WRh
Typ D	0 - 2300 °C	WRh-WRh
Typ E	-200 - 950 °C	Cr-kontantan
Typ G	0 - 2300 °C	WRh-WRh
Typ J	0 - 750 °C	Fe-CuNi
Typ K	-200 - 1250 °C	Cr-Al
Typ N	-270 - 1300 °C	nicrosil-nisil
Typ R	0 - 1450 °C	PtRh-Pt
Typ S	0 - 1400 °C	Pt-PtRh10

Tabulka 2-1: Druhy termočládků



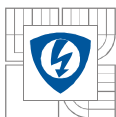
3 KONSTRUKCE ELEKTRICKÝCH MOTORŮ

Pro lepší pochopení a vyřešení problému spojeného s oteplováním elektrických strojů vhodné znát i jejich konstrukci a vlastnosti. Tato kapitola se nebude zabývat konstrukcí všech elektrických strojů, ale pouze komutátorového motoru, který byl k dispozici při tvorbě této práce.

Tento motor je konstrukčně velmi podobný motoru stejnosměrnému, který má následující konstrukci. „Stator je tvořen dvěma cívkami s jádrem. Protože při průchodu proudem cívkou vzniká magnetické pole, působí tyto cívky jako dva elektromagnety. Rotor se skládá z hřídele, na němž jsou rotorové plechy, ve kterých je v drážkách uloženo vinutí (cívky) rotoru. Vinutí statoru a rotoru je zapojeno do série. Protože se ale rotor otáčí, nemohou být propojeny drátem, k tomu slouží zařízení zvané komutátor (proto sériový komutátorový motor). Komutátor je váleček tvořený lamelami z vodivé slitiny mědi, které jsou odděleny slídou. Na tyto lamely jsou naletovány vývody rotorového vinutí. Na statoru jsou upevněny takzvané kartáče. Ty jsou tvořeny uhlíky, které jsou upevněny v drážkách a přitlačovány pružinou ke komutátoru.

Díky tomu, že má univerzální motor zapojeno vinutí statoru a rotoru do série, můžeme ho připojit na stejnosměrný i na střídavý proud. Při napájení střídavým proudem pracuje stejně jako stejnosměrný motor, neboť, i když protéká vinutím rotoru a statoru proud pokaždé jiné polarity, na vodiče působí vždy síla stejného směru, protože vinutí jsou v sérii, a tak se v nich polarita proudu mění současně.

Tyto motory mají přece jen několik odlišností od stejnosměrných motorů. Protože vinutím protéká střídavý proud, musí být stator i rotor složen z elektroplechů, aby se snížily ztráty způsobené vířivými proudy (podobně jako u transformátoru se nepoužívá plné jádro, ale listové). Protože vinutí motoru klade střídavému proudu odpor (daný impedancí). Dochází k fázovému posunu proud a napětí, a proto není jalový výkon motoru nulový. Kvůli jeho zmenšení jsou tyto motory vyráběny s menším počtem závitů budícího vinutí. Otáčky těchto motorů jsou velmi závislé na jeho zátěži. Pokud by takovýto motor běžel naprázdno, bez zátěže, roztočil by se tak rychle, že by mohlo dojít i k jeho poškození. Proto jsou tyto motory pevně spojovány s nějakou zátěží. V případě vysavače je to ventilátor. Otáčky motoru jdou snadno regulovat změnou efektivního napětí.“[3]



3.1 Životnost elektrických strojů

Životnost elektrických strojů je vysoce závislá na izolaci jejich vinutí. Překračování teploty povolené pro jednotlivé druhy izolací vinutí se rapidně snižuje životnost stroje. Pokud bychom provozovali stroj, s trvale zvýšenou pracovní teplotou třeba jen o 10°C zkrátíme jeho životnost na cca 50%.

„Při návrhu běžného zařízení se předpokládá, že za obvyklých podmínek vydrží izolace 20 let. Trvanlivost materiálů používaných na izolaci závisí na mnoha činitelích, jako je teplota, elektrické a mechanické namáhání (chvění, otřesy, vliv rozdílné tepelné roztažnosti), škodlivé účinky okolí (vlhkost, nečistoty, chemikálie), apod. Nejdůležitější z těchto činitelů je teplota. Pro malé a některé střední stroje se používá na vinutí smaltovaných vodičů profilovaných nebo kulatých. Vodiče bývají dvakrát opředeny bavlnou. Pro vyšší teploty se k opředení používá skelného vlákna.“[2]

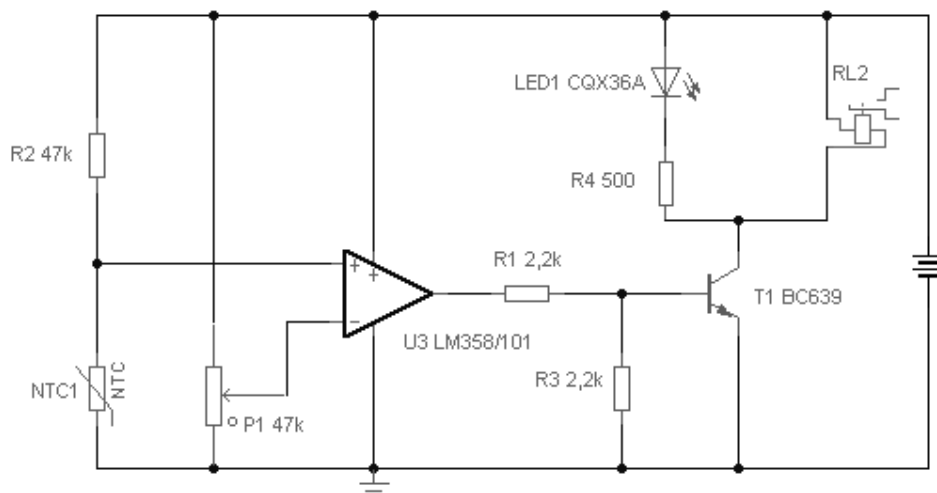
Rozeznáváme sedm tříd izolace

Y	do 90°C	bavlna, hedvábí, vlákniny z regenerované celulózy, papír
A	do 105°C	polyesterová pryskyřice, bavlna, hedvábí
E	do 120°C	tvrzený papír, pryskyřice
B	do 130°C	skleněné vlákniny
F	do 155°C	vrstvená lísková slída
H	do 180°C	skleněné vlákniny
C	nad 180°C	slída, keramika, skla

Tabulka 3-1: Třídy používaných izolací vodičů

4 NÁVRH TEPELNÉ OCHRANY PRO KOMUTÁTOROVÝ MOTOR

Při výběru typu ochrany bylo nutné zvážit pracovní podmínky motoru, jeho výkon a zatížení. Jelikož nebyl známý ani jeden z požadavků, bylo jasné použití ochrany, která nebude záviset na proudu, ale bude vyhodnocovat přímo teplotu motoru. To by bez pochyby splňovalo například termistorové relé, které pracuje na principu porovnávání teploty stroje s nastavenou hodnotou. Ovšem dalším požadavkem byla vlastní výroba ochrany a z tohoto důvodu, po zvážení všech možností, byl vybrán následující obvod, který bude motor chránit. Obvod pracuje jako teplotní vypínač, který odpojí motor od sítě, jakmile vzroste jeho teplota nad nastavenou mez.

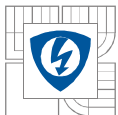


Obrázek 4-1: Schéma zapojení ochranného obvodu

Obdobné schéma zapojení lze najít na internetových stránkách [7]. Obvod na obr. 3-1 používá jiný operační zesilovač a tranzistor, je vynechána dioda ze zdroje na kolektor tranzistoru a odpor R4 je menší.

Jak je vidět ze schématu obvodu pracuje na bázi komparátoru. Odpor R2, termistor a potenciometr, který složí pro nastavení požadované teploty, tvoří dva odporové děliče. Jejich výstupní napětí porovnává operační zesilovač zapojený jako komparátor. Pokud je napětí na výstupu z děliče, který je tvořen potenciometrem, menší než na neinvertujícím vstupu, je na výstupu skoro celé napájecí napětí. Velikost napětí na výstupu udává poměr odporů zapojených v děliči. To znamená, že pokud je podíl odporů R₂ a termistoru větší než poměr na potenciometru, je na neinvertujícím vstupu vyšší napětí. V opačném případě je na výstupu téměř nulové napětí. Jestliže je na výstupu operačního zesilovače skoro celé napájecí napětí, dojde k otevření tranzistoru, rozsvícení kontrolní diody a sepnutí relé. V praxi to znamená, že pokud teplota nepřekročí nastavenou hodnotu je relé sepnuté.

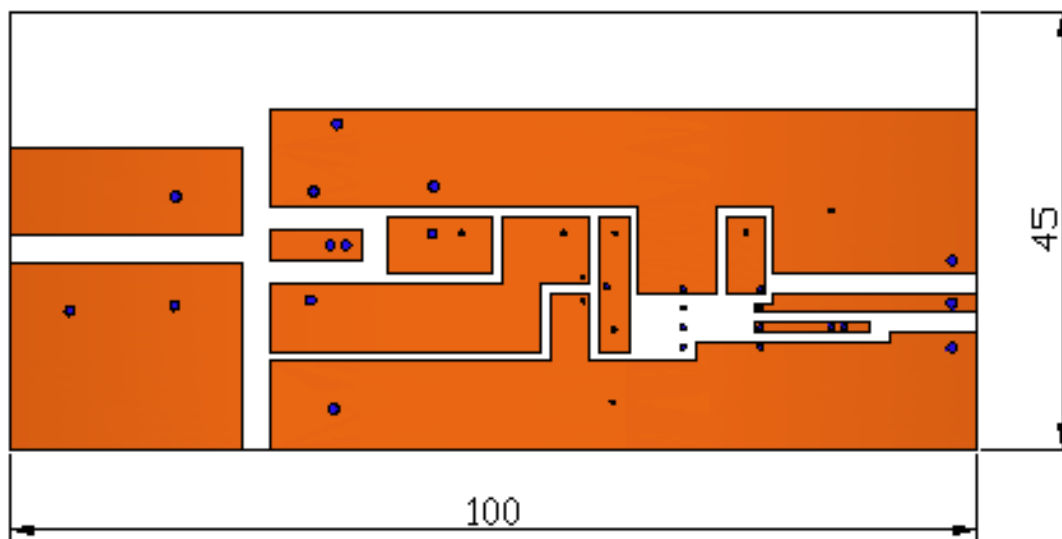
Jako komparátor byl vybrán integrovaný obvod LM 358, který byl vybrán z důvodu velikosti jeho napájecího napětí, rozměrů a počtu operačních zesilovačů v něm vestavených (integrované obvody pouze s jedním OZ jsou dražší a méně dostupné). Tranzistor BC639 byl použit proto, že



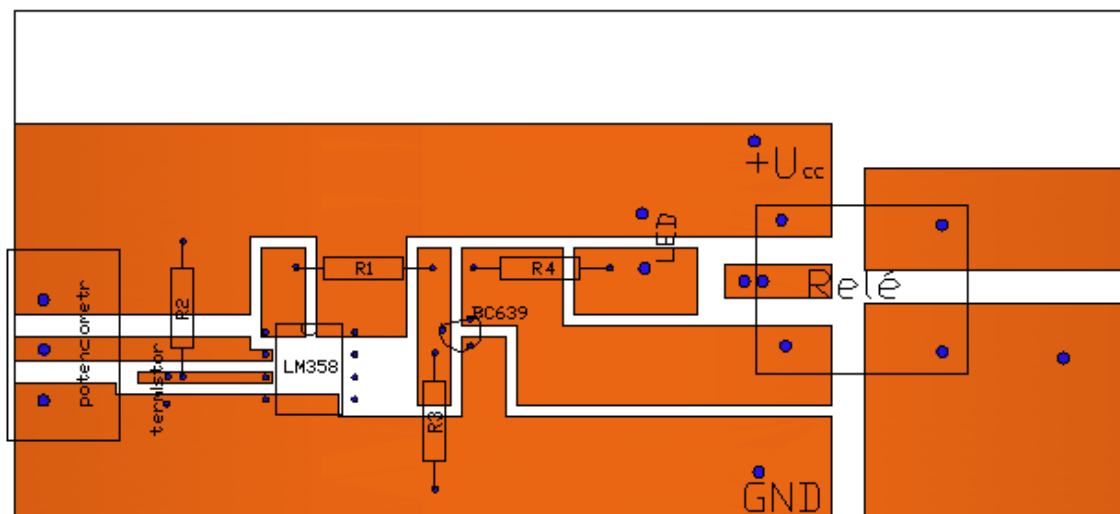
je velmi univerzální a snese i krátkodobé přetížení. Jelikož není možné přivést na bázi tranzistoru přímo výstupní napětí z operačního zesilovače, bylo nutné předřazení napěťového děliče, který dostatečně sníží napětí na bázi tranzistoru. Použití děliče s dělicím poměrem 1:1 je dostatečné, výsledné napětí na bázi tranzistoru je, při napájecím napětí 6V, necelé 3V (v obvodu jsou ztráty, proto se na výstup komparátoru nedostane celé napájecí napětí), což tranzistor bez poškození vydrží. Dalším členem v obvodu je čidlo teploty (NTC termistor), při jeho volbě bylo zapotřebí dbát na dostatečný teplotní rozsah použitelnosti a také na strmost poklesu jeho odporu. Pokud by byla příliš malá, docházelo by v obvodu ke kmitání komparátoru. To je dáno tím, že napětí přiváděné na jeho vstupy by bylo v poměrně velkém rozsahu teplot pro komparátor nerozlišitelné. Z toho důvodu byla zvolena i velikost jeho odporu 47k Ω při 25°C. Posledním prvkem obvodu, který je nutné dobře zvážit, je relé. Nejen z pohledu zařízení, které jím budeme spínat, ale i z pohledu ovládacího napětí a proudu. Pokud zvolíme relé s velmi vysokým ovládacím napětím, zřejmě nebude správně spínat, nebo nesepe ne vůbec, v opačném případě hrozí spálení ovládací cívky. Co se týká potřebného proudu k sepnutí respektive odporu cívky, který je udáván v katalogu, není vhodné volit relé s velmi vysokým odporem cívky, protože by mohlo docházet ke kmitání kotvičky relé i ve stavu, kdy by mělo být vypnuté. To z toho důvodu, že přes tranzistor i ve vypnutém stavu protéká saturační proud, který by mohl způsobit přitah kotvičky, ale ne její udržení.

Pro napájení ochrany je použitý napájecí adaptér s výkonem 5W. Jelikož je použito relé s ovládací cívkou na 5V, nastavíme na zdroji napájecí napětí 6V. I snížené napětí oproti předpokládaným 12V neovlivňuje funkci operačního zesilovače, pro jeho napájení 6V dostačuje.

Jelikož je navržený obvod velmi jednoduchý, nebyl pro návrh desky plošných spojů použit žádný software, ale byla navržena ručně.



Obrázek 4-2: Obrazec DPS ze strany spojů



Obrázek 4-3: Osazovací plán pohled ze strany součástek

4.1 Kalibrace ochrany

Před použitím ochrany v praxi bylo nutné ji kalibrovat a vyznačit na stupnici hodnoty pro nastavení jednotlivých teplot. Jak je vidět ve schématu zapojení, teplotu nastavujeme pomocí potenciometru. Ten se při kalibraci ukázal jako dostatečný pro ovládání.

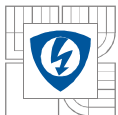
Kalibrace probíhala tak, že čidlo ochrany společně s čidlem teploměru byly přiloženy na zdroj tepla. Pro jednotlivé teploty (20°C, 40°C, 60°C, 80°C) byla vždy ochrana nastavena na vypnutí a daná teplota byla vyznačena na stupnici. Rozsah použitelných teplot ochrany je cca od -10°C až po 135°C.

Použité přístroje

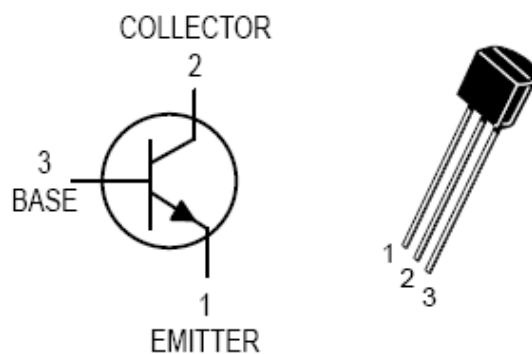
- multimetr UT33C
- jednoploténkový vaříč

4.2 Seznam součástek

- rezistory: 2x2,2kΩ, 47kΩ, 500Ω
 - klasické metalizované rezistory 0,6W, rozteč vývodů 12mm
- termistor: 47k Ω
 - zatížení 0,45W, rozsah teplot -55 až 125°C
- relé: RAS0515
 - napětí cívky 5V, odpor cívky 69Ω
- potenciometr: 50kΩ
 - zatížení 0,5W, lineární závislost odporu

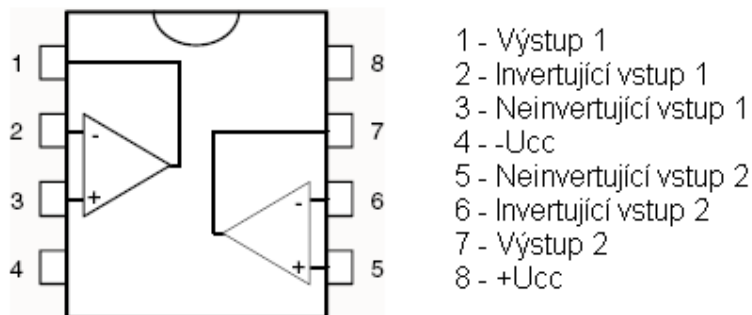


- tranzistor: BC 639
 - univerzální NPN tranzistor, pouzdro TO-92



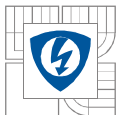
Obrázek 4-4: Označení vývodů tranzistoru [5]

- operační zesilovač: LM 358
 - napájecí napětí $\pm 16V$ nebo $32V$



Obrázek 4-5: Označení vývodů operačního zesilovače [5]

- led: zelená, 5mm



5 ROZLOŽENÍ TEPLoty V MOTORU

Znát rozložení teploty v motoru je zapotřebí především proto, abychom mohli správně umístit NTC termistor od navržené ochrany.

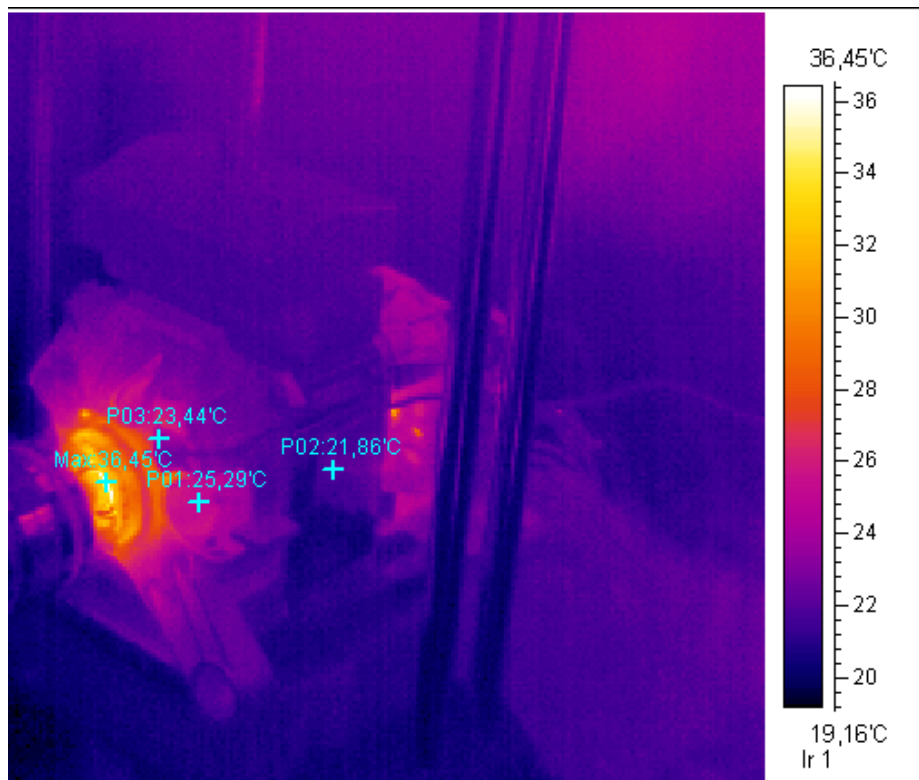
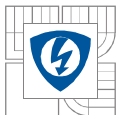
Jelikož motor není homogenní těleso, tak se i teplo v něm šíří různou rychlostí a v každém místě nejsou stejné ochlazovací podmínky. S těmito faktory úzce souvisí i samotné rozložení a šíření teploty v motoru.

Je zřejmé, že největší teplota bude nejspíše ve vinutích a samozřejmě na svorkovnici motoru. Naopak nejmenší teplota bude na statorovém železe. Taktéž je pravděpodobné, že vinutí a rotor se budou zahřívat rychleji než ostatní části.

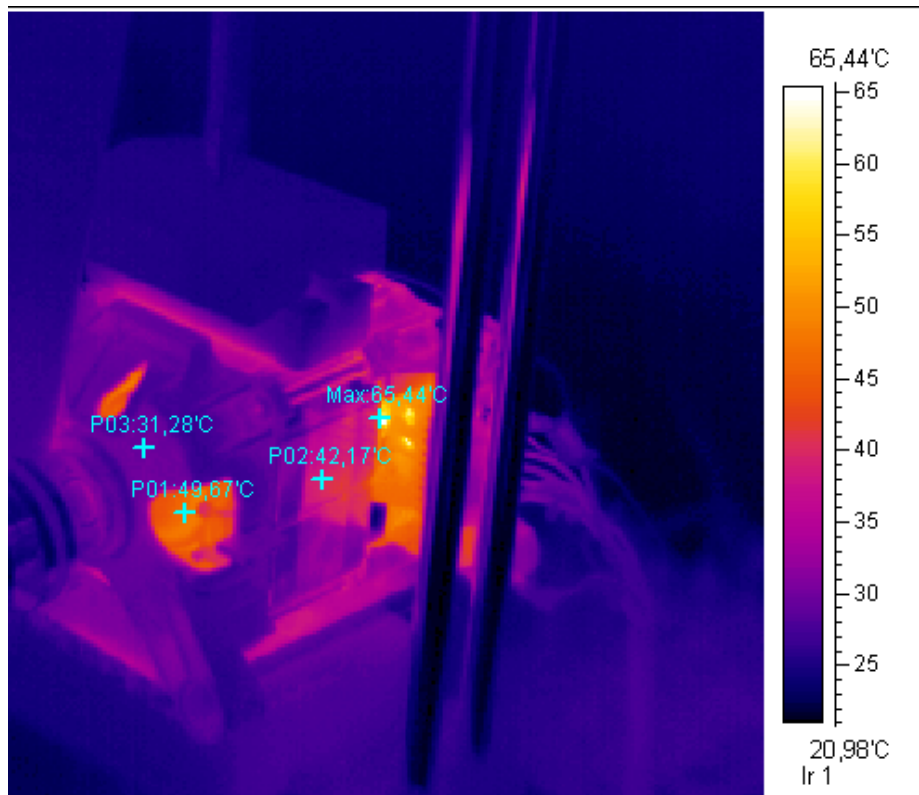
Na následující sérii obrázků je komutátorový jednofázový motor, který byl připojen na vířivou brzdu, během provozu naprázdno a zatížení 0,3Nm. První snímek byl pořízen spuštěním motoru naprázdno a druhý po ustálení teploty motoru při zatížení 0,3Nm. Snímky byly pořízeny termokamerou SH-68.

Jak si na obrázcích můžeme všimnout, nejméně se otepluje štít u hřídele motoru, která je připojena přes spojku k vířivé brzdě. Vlivem této spojky vzniká značný proud vzduchu, který následně tento štít ochlazuje. Po ustálení oteplení můžeme vidět, že největší teplota je v oblasti svorkovnice. Vnitřní prostor motoru je v podstatě o několik stupňů teplejší než jeho povrch. To lze odvodit například z bodů P01 (rotor) a P02 (statorové plechy), kdy již těsně po spuštění má rotor větší teplotu než statorové plechy. To je způsobeno především tím, že povrch motoru má větší ochlazovací plochu a také lepší koeficient přestupu tepla.

Z těchto poznatků je vhodné zvolit pro umístění čidla ochrany místo, které je co nejbližší rotoru a svorkovnice, protože v této části vzniká největší teplota.



Obrázek 5-1: Motor těsně po rozběhnutí



Obrázek 5-2: Motor po ustálení oteplení motoru

6 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MOTORU A OCHRANY

Z důvodu použití prototypového motoru, bylo zapotřebí všechny nutné údaje změřit, případně dopočítat.

6.1 Přejchodová charakteristika

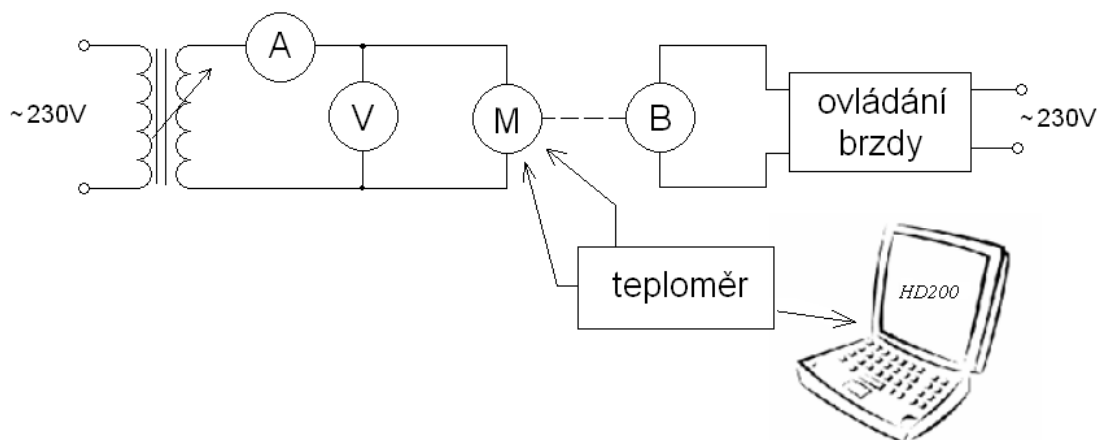
Pro simulaci motoru a ochrany bylo zapotřebí změřit na motoru přechodovou charakteristiku, jako odezvu teploty na jednotkový skok momentu.

Měřicí systém obsahuje následující komponenty

- komutátorový motor
- vířivá brzda VUES Brno – v. č. 01722, 3,3kW, 2A
- diferenční teploměr Extech HD200
- termokamera SH-68
- voltmetr Metra – tp. 1,5
- ampérmetr Metra – tp. 1

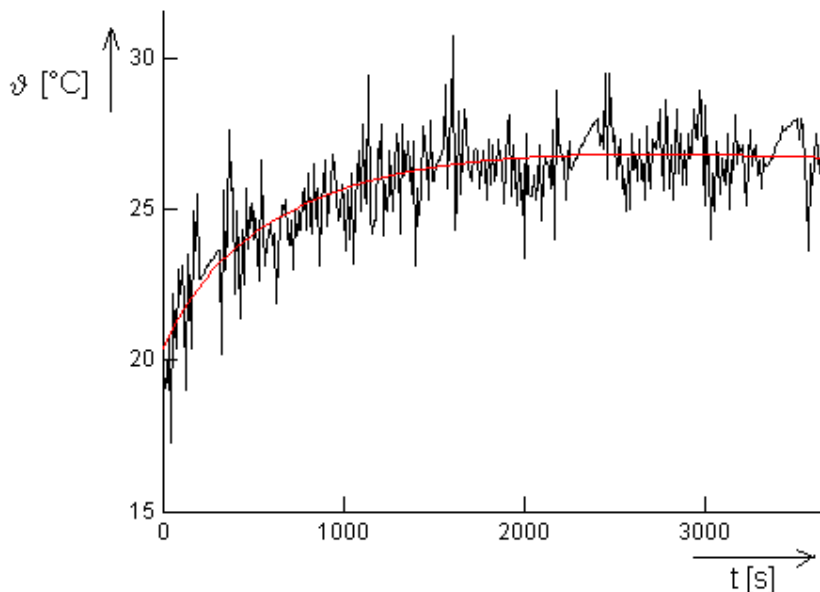
Motor, který je vidět na snímcích z termokamery, byl připojen na vířivou brzdou, pomocí které byl zatěžován. Pro měření teploty motoru byl použit diferenční teploměr HD200, který byl vybaven dvěma termočlánky typu K s rozsahem teplot -200°C až 1372°C . Motor byl nejprve pomocí autotransformátoru spuštěn naprázdno a byla měřena teplota na určitých místech (statorové plechy a štít motoru). Po ustálení teploty jsme motor zatížili momentem $0,3\text{Nm}$ a pokračovali dále v měření teploty. Opět po ustálení teploty byl motor zatížen dalším momentem tentokrát $0,5\text{Nm}$, stejný postup byl aplikován pro zatížení $0,8\text{Nm}$.

Díky měření motoru nejprve naprázdno bylo dosaženo přechodového jevu, který umožnil pomocí MATLABu vymodelovat simulaci, která umožňuje simulovat sepnutí a vypnutí motoru v určitém čase. Měření při zatížení bylo nutné z toho důvodu, abychom v simulaci mohli zadávat i jednotlivá zatížení.



Obrázek 6-1: Schéma zapojení při měření přechodových charakteristik

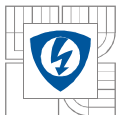
Během měření se vyskytlo rušení, které bylo způsobeno vibracemi stroje. Toto rušení ustupovalo s narůstajícím zatížením a snižujícími se otáčkami. Z toho důvodu bylo nutné naměřené hodnoty vhodně proložit. Proložení si realizuje sám MATLAB při tvorbě přenosové funkce (viz. kap. 6.1). Na následujícím obrázku jsou vidět měřené hodnoty pro běh stroje naprázdno a jejich proložení. Černou barvou jsou měřené hodnoty a červenou je proložení grafu.



Obrázek 6-2: Ukázka naměřených hodnot oteplovací charakteristiky

Jak je vidět na obrázku, průběh teploty splňuje teoretické znalosti o exponenciálním nárůstu teploty. K ustálení teploty dochází cca po 35 minutách běhu motoru.

Při měření naprázdno dosahovaly statorové plechy na obou stranách teploty cca 37°C, přičemž teplota okolí byla 20°C. Vrchní část štítu dosahovala při běhu naprázdno teploty 30,5°C. Z tohoto si můžeme velmi snadno určit oteplení jednotlivých částí. Statorové plechy se ohřály cca o 17°C a štít motoru o 10,5°C. Po zatížení momentem 0,3Nm se teplota všech měřených bodů zvětšila, a to u statorových plechů na hodnotu 42°C a u štítu motoru na hodnotu 33,6°C. Při zatížení 0,5Nm byla velikost teploty na pravé straně statorových plechů 45,8°C, na levé straně 45,3°C a na štítě cca 36°C. Při maximálním měřeném zatížení (0,8Nm) byla teplota statorových plechů cca 50°C a štít dosáhl teploty 40°C.



6.2 Měření na ochraně

Abychom mohli ochranu porovnat s vytvořeným modelem a výrobky na trhu, bylo nutné na ní provést některá základní měření. Těmi byly měření příkonu a čas odpojení motoru při jeho zatížení určitým momentem.

6.2.1 Příkon

Prvním měřením na sestavené ochraně bylo zjištění příkonu. Příkon byl měřený při sepnutém a rozepnutém relé.

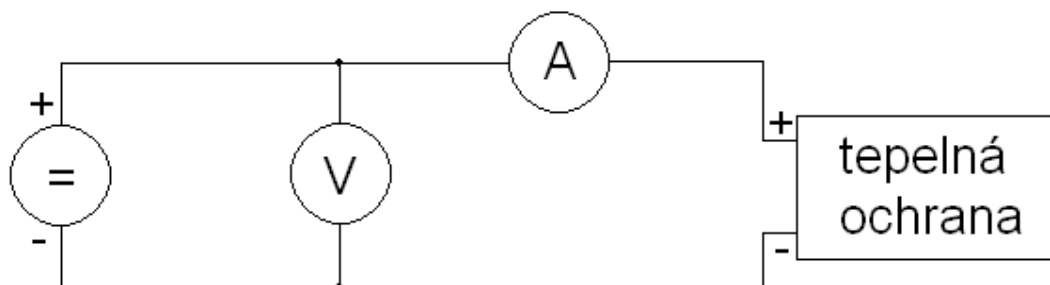
	U [V]	I [mA]	P [mW]
Sepnutý stav	5,73	84,8	485,91
Rozepnutý stav	7,44	1,11	8,25

Tabulka 6-1: Příkon ochrany

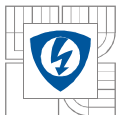
Příkon byl určený vzhledem k stejnosměrnému napájení změřením napájecího napětí a proudu. Z těchto hodnot byl následně dopočítán výkon pomocí vztahu

$$P = U \cdot I \quad (5)$$

Z naměřených hodnot můžeme vidět, že příkon je velmi malý. V sepnutém stavu necelých 0,5W. Rozdíl mezi odebíraným výkonem v sepnuté a vypnutém stavu je dán spotřebou ovládací cívky relé a LED diody s předřazeným odporem. Dále si můžeme všimnout, že použitý zdroj má dost „měkkou“ zatěžovací charakteristiku.



Obrázek 6-3: Schéma měření příkonu



Z následující tabulky, která obsahuje výrobky s obdobným principem funkce, můžeme vidět, že jejich spotřeba je také poměrně malá. Pokud vezmeme v úvahu vybavenost těchto ochran, je možné tvrdit, že spotřeba komerčních výrobků a ochrany použité v této práci je téměř srovnatelná.

Název	P [W]
Elko TER-7	1,5
Kriwan INT 69	2,4
BMR MTR01	1,2
Tele-Haase TDT4X	1,5

Tabulka 6-2: Příkony komerčních výrobků

6.2.2 Časy odpojení motoru

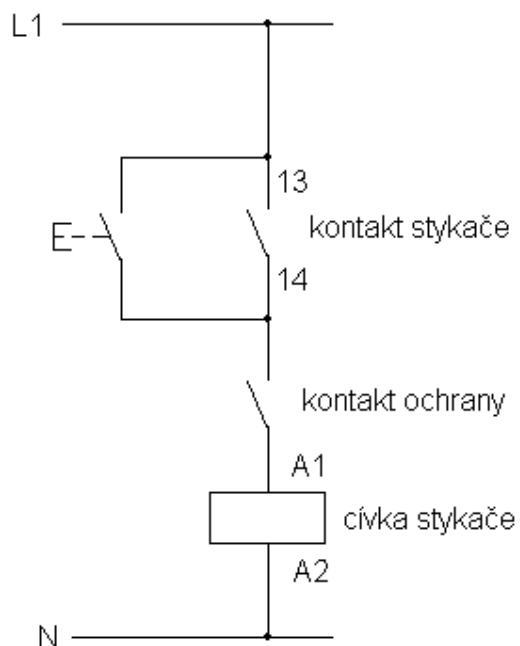
Časem odpojení motoru je myšlen čas od spuštění motoru do zapůsobení ochrany. Toto měření bylo provedeno proto, aby byla ověřena funkčnost a následně mohla být porovnána přesnost reálné ochrany s modelem.

Čidlo ochrany bylo společně s čidlem teploměru zapojeno postupně na dvě místa nejprve na štít motoru a pak na statorové plechy. Odpínací časy byly měřeny pro různá zatížení motoru. Při prvním měření byl motor zatěžován postupně od běhu na prázdko po moment 0,8Nm a v druhém případě byl rovnou zatížen momentem 0,8Nm. Při měření na štítu motoru byla teplota okolí 21°C a při měření na statorových plechách byla 20°C.

Jelikož relé použité v obvodu ochrany by nevydrželo proud, který odebíral motor, byl pro spínání použit stykač. Pro zapojení ovládací části byl použit i jeho pomocný kontakt. Silová část zapojení zůstala prakticky stejná jako při měření přechodových charakteristik, pouze byl před motor zapojen silový kontakt stykače.

Pomocí tohoto zapojení jsme docílili dvou efektů

- Pokud ochrana odpojí motor, tak po jeho zchladnutí nedojde k samovolnému spuštění, které by bylo nežádoucí.
- Odstranění proudových rázů při kmitání relé. Jelikož se motor poměrně pomalu zahřívá, tak dochází při určité teplotě ke kmitání relé. To je způsobeno téměř stejnými poměry napěťových děličů, které na vstup komparátoru přivádějí napětí pro něj nerozlišitelné. Ten následně kmitá a to se projevuje i na relé.



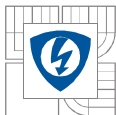
Obrázek 6-4: Schéma zapojení ovládací části

Použité přístroje

- diferenční teploměr Extech HD200
- stykač ABB – ESB 24-40
- stopky

M_z [Nm]	ϑ [°C]	t [s]
0	21,3	75
0	22,6	178
0	29,0	1195
0	30,2	2022
0,3	32,5	3924
0,3	33,0	4117
0,3	33,2	4147
0,5	37,7	5209
0,5	38,8	5590
0,8	44,5	6650
0,8	46,7	7025

Tabulka 6-3: Odpínací časy pro štít motoru



M_z [Nm]	ϑ [°C]	t [s]
0,8	25,5	135
0,8	28,5	241
0,8	33,0	405
0,8	35,0	499
0,8	37,5	634
0,8	39,5	744
0,8	41,5	869
0,8	43,5	1016
0,8	44,0	1143
0,8	45,0	1228
0,8	47,5	1764

Tabulka 6-4: Odpínací časy pro statorové plechy (levá strana)



7 SIMULACE MOTORU A OCHRANY

Pro vytvoření modelu je použit software MATLAB, konkrétně jeho toolbox System Identification a nástavba Simulink.

MATLAB je sofistikovaný program pro vědeckotechnické výpočty, modelování, simulace a analýzu a zpracování signálů. Zřejmě nejdůležitější součástí MATLABu je jeho výpočetní jádro, které nám dovoluje řešit složité výpočty především s maticemi, ale je možné použít mnoho dalších datových typů např. vícerozměrná pole reálných nebo komplexních čísel.

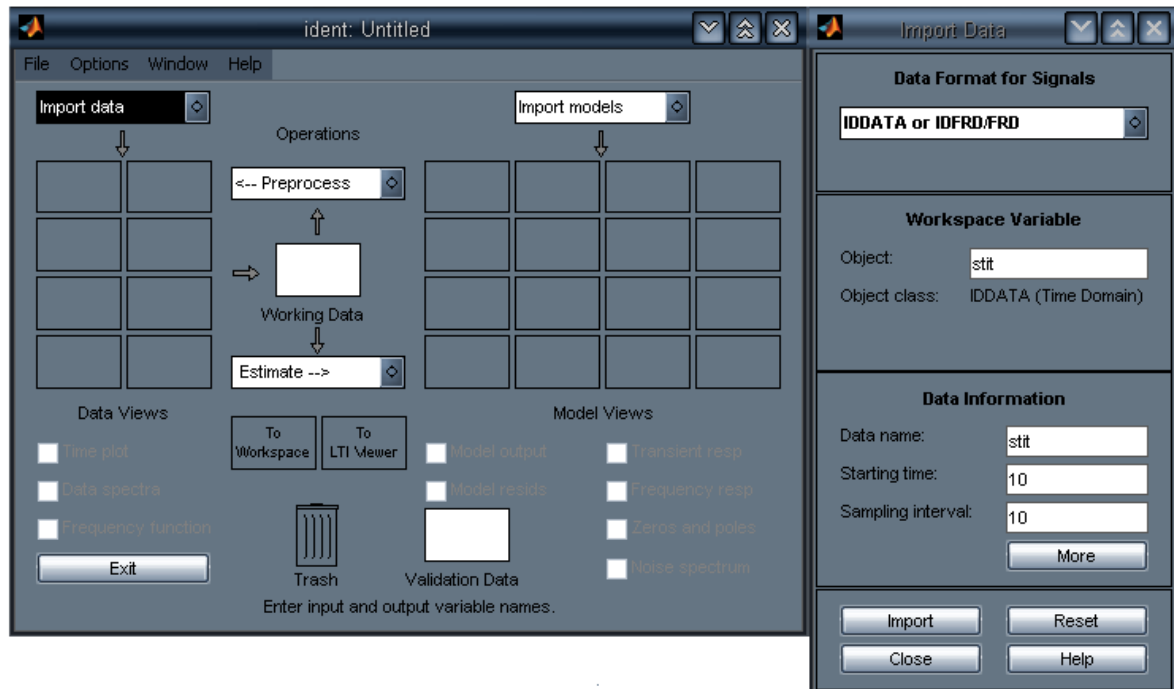
Simulink je nástavba MATLABu, které je určena pro modelování a simulace dynamických systémů. Pro své výpočty diferenciálních rovnic využívá algoritmy MATLABu. Tento program nám dovoluje poměrně snadno a efektivně sestavovat modely složitých dějů, které ovšem musíme umět popsat pomocí rovnic.

Již zmiňovaný toolbox System Identification nám dovoluje sestavit matematický model diferenciálního systému pouze z naměřených vstupních a výstupních veličin. To nám velmi ulehčí práci při modelování systémů, u kterých by bylo téměř nemožné vytvořit model za pomocí diferenciálních rovnic.

7.1 Identifikace parametrů

Z naměřených hodnot přechodové charakteristiky jsme pomocí MATLABu konkrétně toolboxu System Identification vytvořili přenosovou funkci následujícím způsobem.

Prvním krokem bylo načtení vstupních a výstupních naměřených hodnot jako dvou proměnných do MATLABu a jejich následné sjednocení do jednoho datového objektu. To se realizuje pomocí příkazu $mojedata=iddata(y,u,T_v)$, kde u je vektor vstupních hodnot, y je vektor výstupních hodnot a T_v je perioda vzorkování. Dále jsme spustili zmiňovaný toolbox a importovali data viz. následující obrázek.



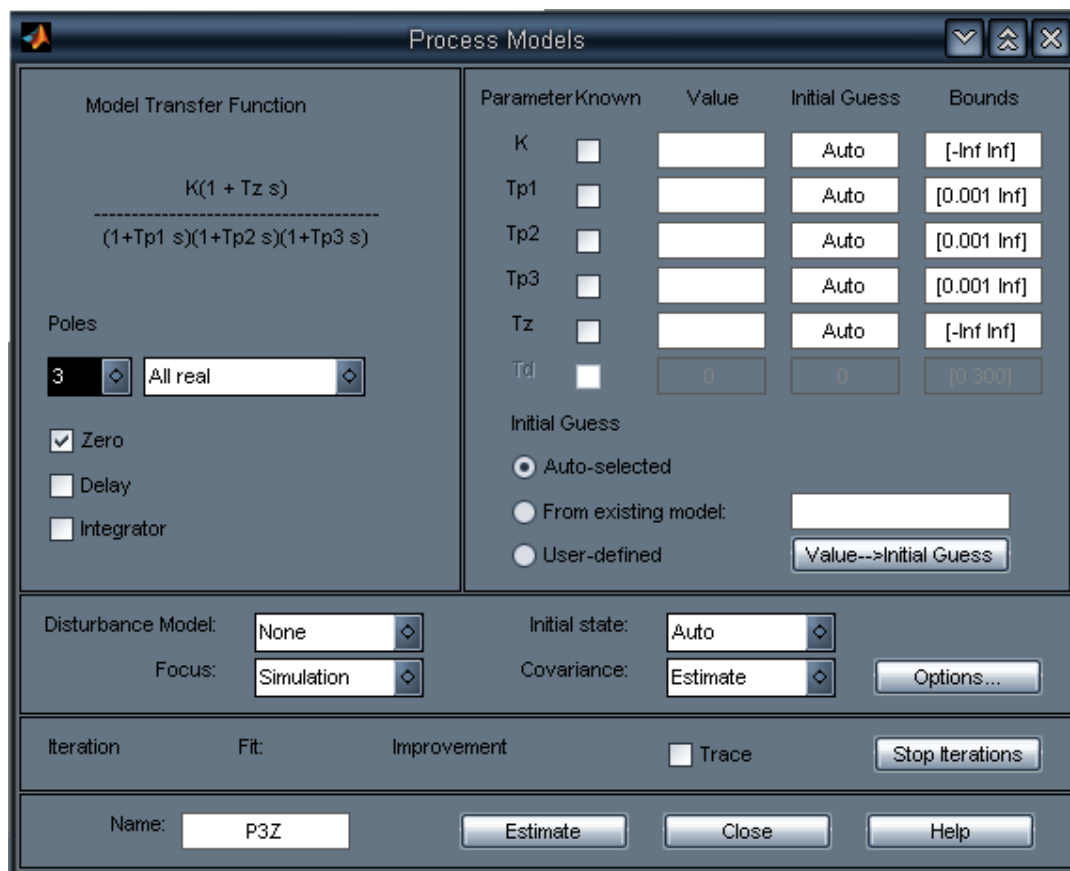
Obrázek 7-1: Importování dat pro vytvoření přenosové funkce

Dalším krokem bylo vybrání vhodného modelu, který z naměřených dat vytvoří přenosovou funkci o určitém tvaru. Jako model je použitý „Process Models“, který je spojitý. Ten byl vybrán proto, že dosahoval nejmenší odchylku mezi měřeními a simulovanými hodnotami.

Spojitý model funguje na principu odhadu parametrů modelu, který má následující rovnici

$$G(s) = \frac{k \cdot (1 + T_z \cdot s)}{(1 + T_{p1} \cdot s) \cdot (1 + T_{p2} \cdot s) \cdot (1 + T_{p3} \cdot s)} \quad (6)$$

Pro správnou funkci Process modelu je zapotřebí nadefinovat určité hodnoty. A to především počet pólů ve funkci, to jestli bude funkce obsahovat nuly, zpoždění, integrátor, a účel použití. Obecně lze říct, že čím více pólů tím vyšší přesnost, ale ne vždy tomu tak musí být. Pro náš případ byla zvolena funkce s třemi póly a s nulou, bez zpoždění a integrace.



Obrázek 7-2: Nastavení Process modelu v toolboxu System Identification

Po té co model určí hodnoty jednotlivých prvků v polynomu, můžeme tyto hodnoty vypsát i do command window v MATLABu. Zde je možné pomocí příkazů zjistit póly a nuly výsledné přenosové funkce, které budeme dále potřebovat pro tvorbu simulačního schématu. Příkazem $tf(P3Z)$ funkci přepíšeme do tvaru zlomku. Z jednotlivých měřících bodů získáme následující přenosové funkce.

Pro přenos štítu motoru

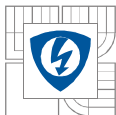
$$G(s) = \frac{20,423 \cdot (1 + 122 \cdot s)}{(1 + 742,15 \cdot s) \cdot (1 + 0,001 \cdot s) \cdot (1 + 90,183 \cdot s)} \quad (7)$$

Pro přenos plechů na levé straně motoru

$$G(s) = \frac{30,597 \cdot (1 + 122 \cdot s)}{(1 + 742,15 \cdot s) \cdot (1 + 0,001 \cdot s) \cdot (1 + 90,183 \cdot s)} \quad (8)$$

Pro přenos plechů na pravé straně motoru

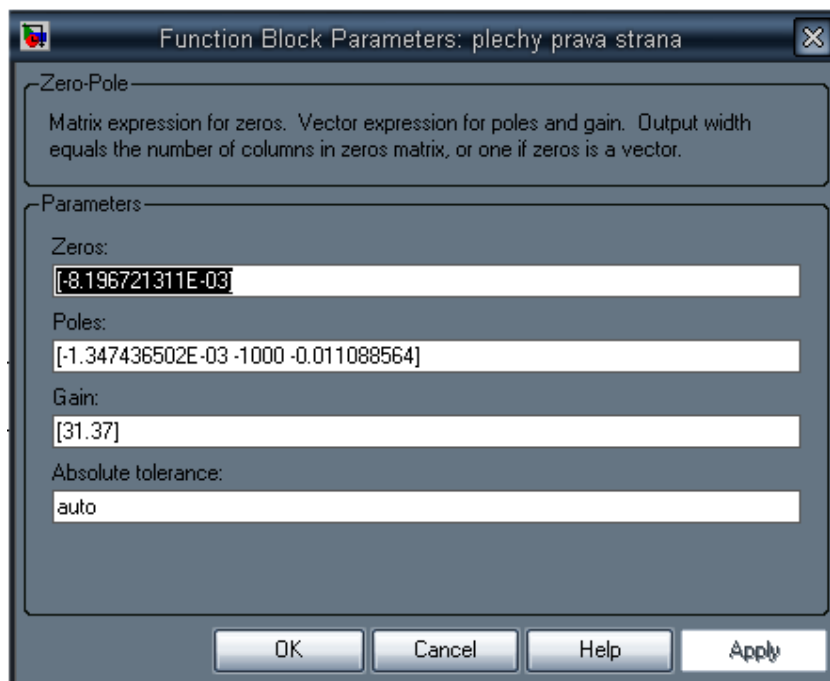
$$G(s) = \frac{31,37 \cdot (1 + 122 \cdot s)}{(1 + 742,15 \cdot s) \cdot (1 + 0,001 \cdot s) \cdot (1 + 90,183 \cdot s)} \quad (9)$$



7.2 Tvorba simulačního schématu

Základními požadavky na simulaci byly, aby dosažené hodnoty měly dostatečnou vypovídající hodnotu. Z tohoto důvodu jsou výstupem nejen číselné, ale i grafické informace. Těmi jsou jednak čas, ve kterém ochrana zapůsobí. Dále pak velikost a průběh teplot v jednotlivých bodech, pro které byly změřeny přechodové charakteristiky. Jak již bylo zmíněno je celá simulace vytvořena v Simulinku.

Jelikož pro vytvoření přenosové funkce byl použit spojitý model. Muselo být i pro simulaci použito spojitého prvku, který umožní vymodelovat přenosovou funkci. Tímto prvkem je Zero-Pole. V nastavení tohoto prvku, jak již název napovídá, je nutné zadat nuly a póly systému, toleranci a posledním nastavením je zesílení (gain).



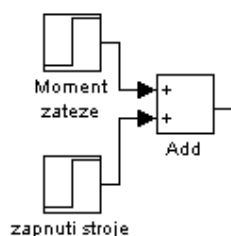
Obrázek 7-3: Nastavení Zero-Pole

Prvek Zero-Pole vymodeloval přenosovou funkci. Na vstupu tohoto prvku musí být signál, který udává zapnutí stroje a jeho zatížení momentem. To je realizováno pomocí dvojice skokových signálů.



Blokem, který je nazvaný *zapnutí stroje*, simulujeme okamžik, kdy dojde k uvedení stroje do provozu. Jak vyplývá z popisu funkce, můžeme v tomto bloku nastavit buď nulu, která říká stroj je vypnutý, nebo jedničku, která má význam stroj je zapnutý.

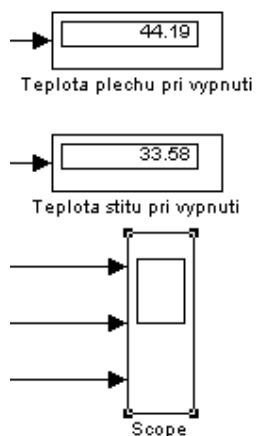
Pomocí bloku *Moment zateze* volíme, jak velkým momentem působí zátěž a okamžik, kdy stroj zatížíme. Jako v předchozím bloku můžeme nastavit nulu, to znamená, že stroj běží naprázdno, nebo jakékoliv číslo, které nám udává zatěžovací moment v Nm.



Obrázek 7-4: Bloky reprezentující vstupní signál

Výstupem z prvku Zero-Pole je již teplota v měřených místech motoru. Tu bylo samozřejmě zapotřebí náležitě prezentovat a signál dále zpracovat tak, aby bylo možné vytvořit simulaci ochrany.

Teplota stroje je prezentována tak, že je v simulačním schématu umístěn prvek scope, který slouží jako osciloskop pro zobrazování průběhu teploty. A jako další vizualizační prvek je použitý blok display, ten zobrazuje aktuální velikost teploty ve stupních Celsia.

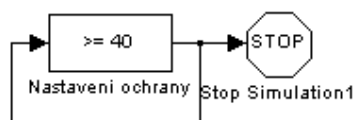


Obrázek 7-5: Výstup signálu ze simulačního schématu



Další nezbytnou součástí simulačního schématu je namodelování samotné ochrany. Při zvažování principu byl zvolen takový, na němž i reálná ochrana pracuje. Tím je komparátor. Fyzická ochrana porovnává měřenou hodnotu teploty s nastavenou a dle toho reaguje. I simulace ochrany porovnává počítanou hodnotu teploty s nastavenou. To je docíleno blokem Compare To Constant. V jeho nastavení zvolíme velikost teploty a operátor porovnávání. Operátorem je myšleno to, jestli má komparátor reagovat (poslat na výstup logickou jedničku) na hodnotu menší, větší či rovnou než je nastavená. V našem případě komparátor reaguje na hodnotu vyšší, než je nastavená.

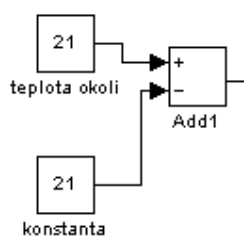
Pokud je na výstupu zmiňovaná logická jednička, je simulace zastavena a tato událost je zakreslena do grafu. Tohoto efektu je docíleno velmi snadno pomocí bloku Stop.



Obrázek 7-6: Simulace ochrany

Poslední důležitou součástí simulace je kompenzace okolní teploty. Tato část je důležitá zejména pro, že pokaždé se nepodaří docílit stejné okolní teploty. A jak víme velikost okolní teploty má vliv i na výslednou teplotu motoru.

Tato část je realizována velmi jednoduše. Blok s názvem *konstanta* má hodnotu danou rozdílem teplot při jednotlivých měřeních přechodové charakteristiky. Druhý blok *teplota okolí* umožňuje zadat aktuální teplotu okolí při simulaci. Jak vidíme z obrázku, jsou tyto dvě hodnoty od sebe odečteny a následně je výsledný rozdíl přičítán k teplotě motoru.



Obrázek 7-7: Kompenzace teploty

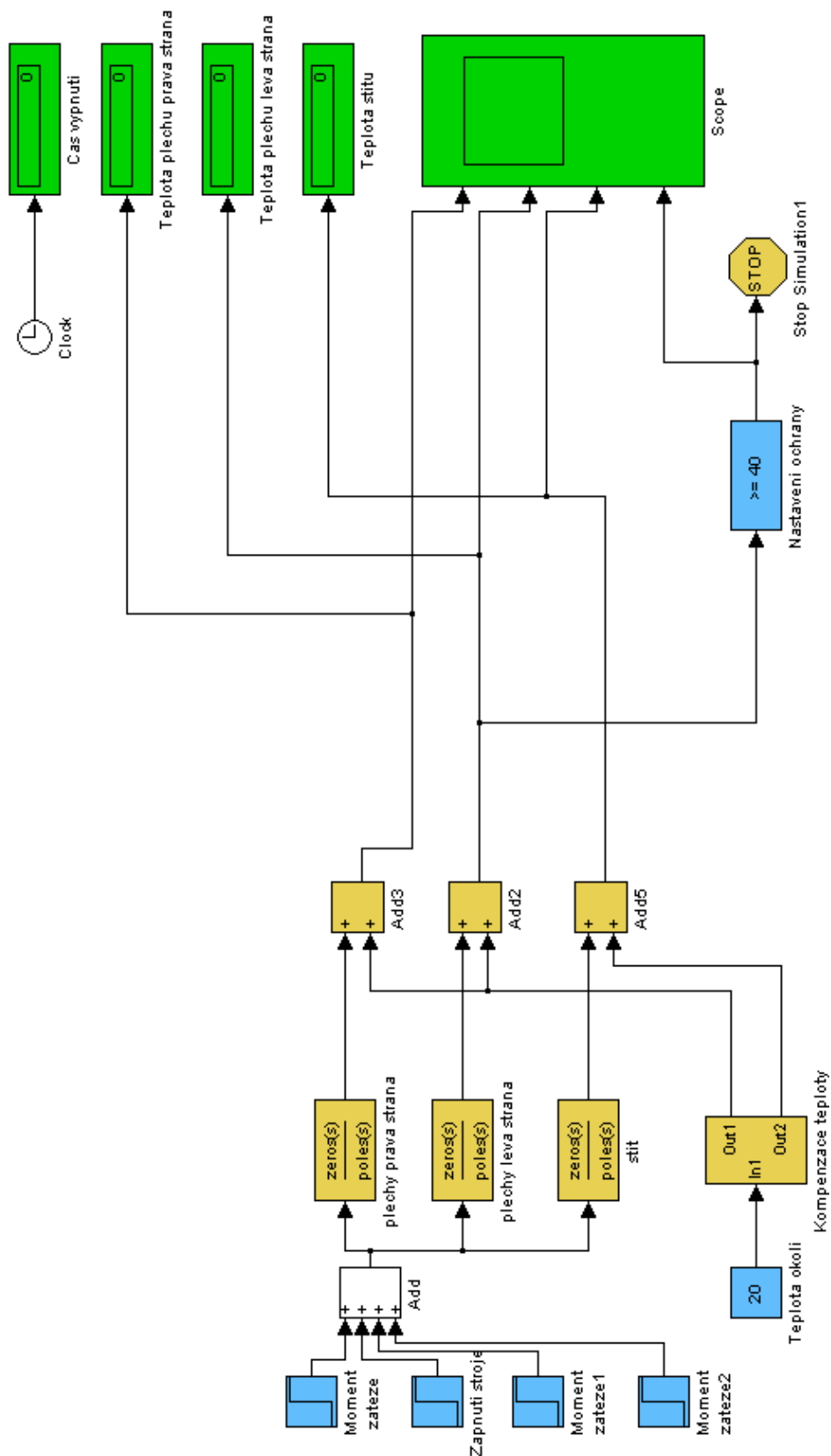
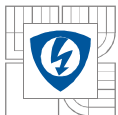
Před započítáním vlastní simulace je nutné nastavit následující parametry, všechny bloky, ve kterých je možné měnit nastavení, jsou označeny modrou barvou.

- Zatížení stroje – k tomuto slouží ve schématu čtyři bloky s označením „Zapnutí stroje, Moment zateze, Moment zateze1, Moment zateze2“. Jak již napovídá název v bloku „Zapnutí stroje“ máme možnost nastavit čas, kdy je motor uveden do provozu. Pro vypnutý stroj nastavujeme 0 a pro zapnutý stroj 1. V ostatních blocích nastavujeme velikost zatěžovacího momentu a čas kdy je připojen. Je zapotřebí nastavovat čas připojení zátěže minimálně stejně velký jako čas spuštění stroje. Pokud bychom nastavili čas menší, docházelo by k nesmyslným výsledkům. Taktéž při zadání nesmyslně velkého momentu zátěže dochází k velmi nepřesným výsledkům.



- Teplota okolí – toto nastavení slouží pro zadání teploty okolí pro jednotlivé simulace.
- Nastavení ochrany – v tomto bloku můžeme nastavit hodnotu teploty, kdy ochrana odpojí motor.
- Čas simulace
- Metoda řešení – tohle nastavení výrazně ovlivňuje přesnost a rychlost simulace. Za nejpřesnější metodu lze považovat *ode45*, ovšem jde i o nejpomalejší metodu řešení. Jako nejrychlejší metoda se osvědčila *ode23tb*, která je méně přesná. Z toho důvodu je vhodné při zjišťování časů odpojení motoru volit pro kratší časy *ode45*, kde nevzniká tak velká odchylka. A pro delší časy a části charakteristik, kde není nárůst teploty tak prudký, volit metodu *ode23tb*.

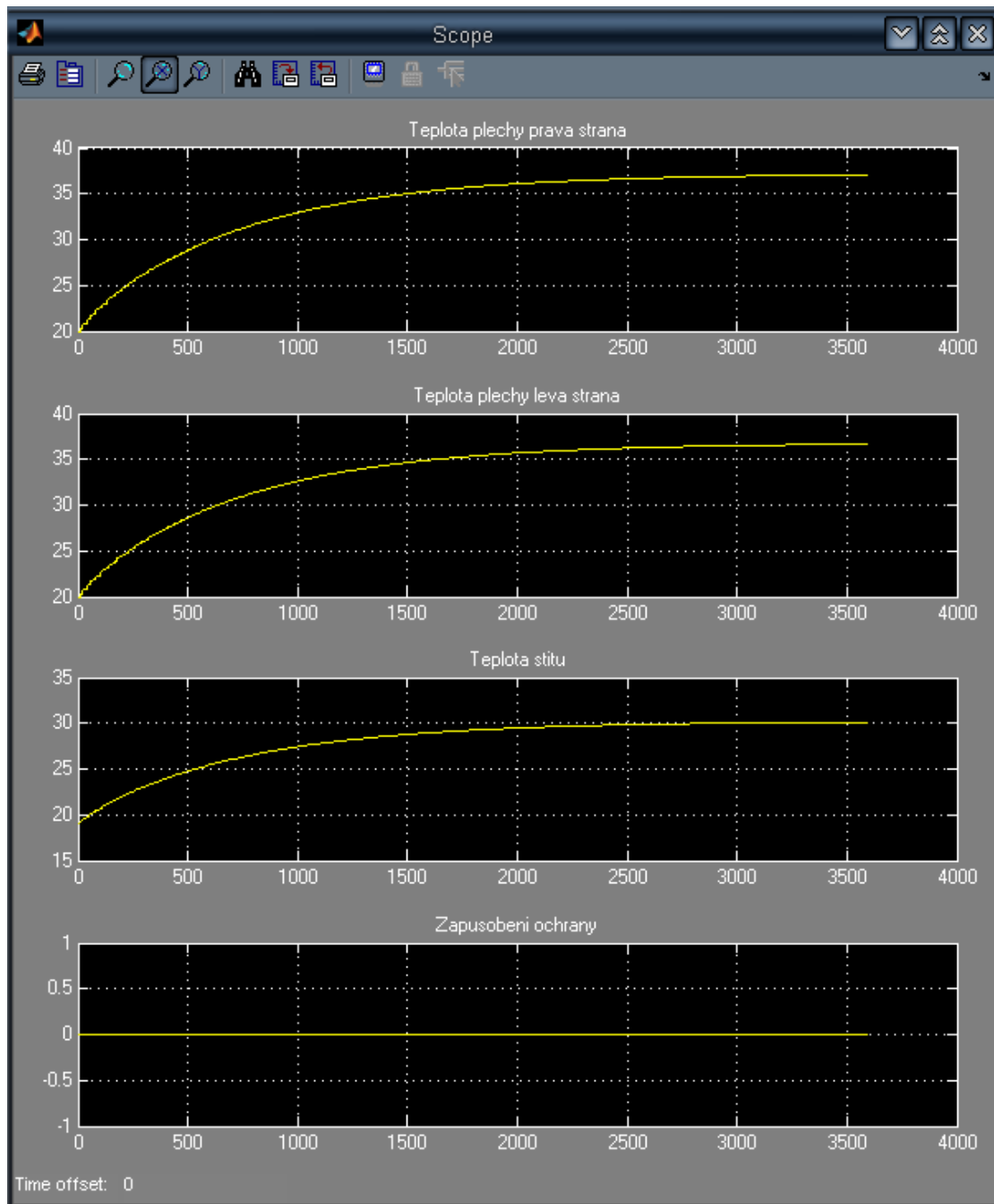
Po zadání potřebných parametrů se pomocí přenosových funkcí počítá teplota motoru. A ta je jednak vynášena do grafů a jednak zobrazována na displejích. Bloky, které slouží k zobrazování výsledků, jsou označeny zeleně.



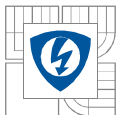
Obrázek 7-8: Celkové simulační schéma

Jak již bylo řečeno, výsledky jsou buď v číselné formě na displejích, nebo zobrazovány na osciloskopu. Ten zobrazuje i zapůsobení ochrany, to spočívá v tom, že pokud ochrana nevypnula stroj je její hodnota na nule a pokud došlo k překročení teploty a vypnutí stroje změní se hodnota ochrany na jedničku.

Na následujícím obrázku je zobrazen výsledek simulace. Kdy byl motor v provozu po dobu jedné hodiny bez zatížení, s ochranou nastavenou na 40°C a teplotou okolí nastavenou na 20°C. Za tuto dobu dosáhla pravá strana statorových plechů teplotu 37,08°C, levá strana statorových plechů 36,66°C a štít motoru 30,12°C.



Obrázek 7-9: Oteplovací charakteristiky motoru



8 POROVNÁNÍ SIMULACE A MĚŘENÍ

Cílem této kapitoly je porovnat výsledky měření a simulace a pokusit se o zdůvodnění chyb a nepřesností. Prvním krokem bude porovnání ustálených hodnot teploty motoru a dále pak porovnání odpínacích časů ochrany.

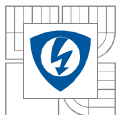
Pro výpočet odchylek mezi měřenými a simulovanými hodnotami je brána jako skutečná velikost naměřená hodnota.

Jak je vidět v následující tabulce, která porovnává velikosti ustálených teplot stroje, jsou odchylky v řádu desetin stupňů Celsia. Nejmenší odchylka je dokonce jen $0,02^{\circ}\text{C}$ což odpovídá $0,04\%$ a největší odchylka je $0,83^{\circ}\text{C}$ což odpovídá $2,08\%$. Odchylky jsou v tomto případě dány především vibracemi stroje při měření, ty způsobovaly kolísání teploty stroje. Z toho důvodu nebylo možné přesně určit ustálenou teplotu motoru. Dalším faktorem je volba proložení grafu a také zvolení metody při vytváření přenosové funkce v MATLABu. S vytvořením přenosové funkce je úzce spjat násobitel K v přenosové funkci, který ovlivňuje sklon charakteristiky a tím i velikost ustálené teploty v simulaci.

	M_z [Nm]	$\vartheta_{\text{měřené}} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{\text{simulované}} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta\vartheta [^{\circ}\text{C}]$	$\delta\vartheta [\%]$
pravá strana plechů	0	37,5	37,21	-0,29	-0,77
	0,3	42,5	42,37	-0,13	-0,31
	0,5	46,0	45,81	-0,19	-0,41
	0,8	51,0	50,98	-0,02	-0,04
levá strana plechů	0	36,5	36,78	0,28	0,77
	0,3	42,0	41,82	-0,18	-0,43
	0,5	45,3	45,18	-0,12	-0,26
	0,8	50,0	50,21	0,21	0,42
štít	0	30,0	30,20	0,2	0,67
	0,3	33,5	33,56	0,06	0,18
	0,5	36,0	35,81	-0,19	-0,53
	0,8	40,0	39,17	-0,83	-2,08

Tabulka 8-1: Tabulka hodnot ustálené teploty

V dalších dvou tabulkách jsou porovnávány odpínací časy ochrany. Na první pohled je zřejmé, že vyšší přesnosti dle absolutní odchylky je dosaženo na statorových plechách při zatěžování motoru konstantním momentem. Kde je chyba v jednotkách až desítkách vteřin což odpovídá jednotkám procent. Při měření na štítu motoru s postupným zatěžováním dosahujeme přesnosti desítek až stovek vteřin, přičemž největší chyba je $13,3\%$. Pokud porovnáme odpínací časy i s oteplovacími charakteristikami, tak zjistíme, že v částech charakteristik, kde je nárůst teploty rychlejší dosahujeme vyšší přesnosti simulace. Velká nepřesnost v částech charakteristiky s pomalejším nárůstem teploty je způsobena několika vlivy jednak již zmiňovaným výběrem



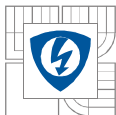
modelu a především kolísáním teploty při měření. V případě největší chyby 13,3% je teplota již téměř ustálená a chybné odečtení teploty třeba jen o 0,5°C způsobí chybu několik set vteřin.

M_z [Nm]	ϑ [°C]	$t_{\text{měřený}}$ [s]	$t_{\text{simulovaný}}$ [s]	Δt [s]	δt [%]
0	21,3	75	73	-2	-2,67
0	22,6	178	166	-12	-6,74
0	29,0	1195	1170	-25	-2,09
0	30,2	2022	1753	-269	-13,30
0,3	32,5	3924	3945	21	0,54
0,3	33,0	4117	4149	32	0,78
0,3	33,2	4147	4251	104	2,51
0,5	37,7	5209	5216	7	0,13
0,5	38,8	5590	5654	64	1,14
0,8	44,5	6650	6600	-50	-0,75
0,8	46,7	7025	7080	55	0,78

Tabulka 8-2: Tabulka odpínacích časů ochrany pro štít motoru

M_z [Nm]	ϑ [°C]	$t_{\text{měřený}}$ [s]	$t_{\text{simulovaný}}$ [s]	Δt [s]	δt [%]
0,8	25,5	135	130	-5	-3,70
0,8	28,5	241	220	-21	-8,71
0,8	33,0	405	390	-15	-3,70
0,8	35,0	499	480	-19	-3,81
0,8	37,5	634	610	-24	-3,79
0,8	39,5	744	740	-4	-0,54
0,8	41,5	869	890	21	2,42
0,8	43,5	1016	1080	64	6,30
0,8	44,0	1143	1200	57	4,99
0,8	45,0	1228	1270	42	3,42
0,8	47,5	1764	1760	-4	-0,23

Tabulka 8-3: Tabulka odpínacích časů ochrany pro statorové plechy (levá strana)



9 ZÁVĚR

Teoretická část práce výstižně popisuje vznik a šíření tepla v elektrických strojích, jejich konstrukci a životnost, která je spojena s jejich zahříváním. Dále je zde možné nalézt popis čidel pomocí, kterých je měřena teplota nebo která se používají ve spojení s tepelnými ochranami.

Během praktické části bakalářské práce byla vytvořena tepelná ochrana s termistorovým čidlem, která byla použita na konkrétním stroji. Ovšem z její konstrukce vyplývá, že by mohla být použita ve spojení s jakýmkoliv strojem. Ochrana má široký rozsah použitelnosti, protože teplotu vypnutí lze nastavit v rozsáhlém spektru (cca od -10°C do 130°C). Použitá ochrana má několik nedostatků, kterými jsou pouze jedno čidlo, nemožnost připojit čidlo teplot vestavěné ve stroji od výrobce. Další nedostatky jsou spojené s komfortem užívání. K těmto nedostatkům patří signalizace pouze LED diodou, chybějící propojení s počítačem a záznam hodnot.

Dále bylo vytvořeno simulační schéma, které představuje sestavu použitého motoru a tepelné ochrany. Jelikož schéma využívá přenosových funkcí, které byly vytvořeny z oteplovacích charakteristik naměřených na konkrétním motoru, je její použití u jiného elektrického stroje téměř nemožné. Použití je možné pouze po odměření oteplovacích charakteristik pro jiný stroj a následného vytvoření nových přenosových funkcí. Funkčnost a přesnost simulačního schématu splnila požadavky velmi dobře.

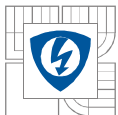
Vzájemné odchylky modelu a měření jsou v jednotkách procent. Toto rozmezí přesnosti je s přihlédnutím k rušení vlivem vibrací stroje uspokojující.

V některé ze svých dalších odborných prací bych se opět rád zabýval problematikou spojenou s teplotou elektrických strojů. Především zdokonalením tepelné ochrany, protože ochrana použitá v této práci prokázala jisté nedostatky. Největším nedostatkem je nemožnost připojit termistory, které jsou implementovány v motorech již od výrobce.



LITERATURA

- [1] BAXANT, Petr. *Elektrické teplo a světlo*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. 190 s. ISBN 80-214-2761-2.
- [2] *Elektrické stroje*. [s.l.] : [s.n.], [200-?]. 79 s. Dostupný z WWW: <www.uvee.feec.vutbr.cz/Predmety/BESB/Skripta/elektricke_stroje.pdf>.
- [3] *FyzWeb : články* [online]. 2001 [cit. 2009-05-16]. Dostupný z WWW: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=90&id_casti=31>.
- [4] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje: učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. 436 s.
- [5] *GM electronics* [online]. c1990-2009 [cit. 2009-03-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.gme.cz/cz/index.php>>.
- [6] ŠPRINGL, Vít. *Měření teploty: Polovodičové odporové senzory teploty* [online]. c1997-2005 , 19. Srpen 2004 [cit. 2008-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1141-Mereni-teploty---polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>>.
- [7] *Teplotní spínač* [online]. 1999 [cit. 2009-02-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektronikacz.borec.cz/Data/Teplotni%20spinac.htm>>.
- [8] VESELKA, František, HUZLÍK, Roztlav. *Inspekční a revizní činnost*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2007. 122 s. ISBN 978-80-7204-568-6.
- [9] VOJÁČEK, Antonín. *Princip termografického měření* [online]. 2008 [cit. 2009-05-16]. Dostupný z WWW: <http://www.termokamera.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=9>.



PŘÍLOHY

Příloha 1 CD se simulací motoru a ochrany