

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

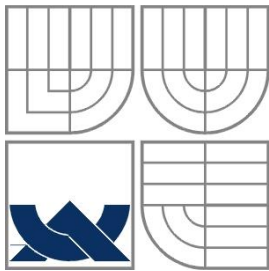
TEPLOTNÍ PROFIL VÝKONOVÉHO SPÍNACÍHO PŘÍSTROJE NÍZKÉHO NAPĚTÍ PRO RŮZNÉ PROVOZNÍ STAVY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

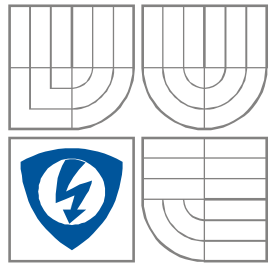
Bc. Tomáš Mejzlík

BRNO 2015



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 PROFIL VÝKONOVÉHO SPÍNACÍHO PŘÍSTROJE NÍZKÉHO NAPĚTÍ PRO RŮZNÉ PROVOZNÍ STAVY

**THE TEMPERATURE PROFILE OF THE POWER SWITCHING LOW VOLTAGE DEVICE IN
DIFFERENT OPERATING STATES**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Mejzlík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Dostál

BRNO, 2015



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. Tomáš Mejzlík

ID: 125541

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Teplotní profil výkonového spínacího přístroje nízkého napětí pro různé provozní stavy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s vybraným spínacím přístrojem nízkého napětí
2. Vytvořte 3D CAD model proudové dráhy vybraného přístroje
3. V programu Solidworks proveďte výpočet teplotního profilu a úbytek napětí pro různé provozní stavy
4. Pro různé provozní stavy spínacího přístroje proveďte oteplovací zkoušky
5. Proveďte rozbor získaných výsledků

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Dostál

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Víték, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Teplo generované v jističi může být odvedeno dvěma způsoby: Přes kovové části proudové dráhy do vodičů mimo jistič. Přes plastové a vzduchové části šasi.

Přesnost tepelné simulace pak závisí na přesnosti namodelování jednotlivých součástí a zároveň na volbě materiálů s odpovídajícími tepelnými a elektrickými vlastnostmi.

Elektrický jistič obsahuje několik zdrojů tepla, které způsobují zvyšování teploty nad úroveň okolního prostředí. Těmito zdroji jsou:

- 1) Joulovy ztráty proudové dráhy jističe.
- 2) Tepelné ztráty na bimetalu, který je použit pro tepelnou spoušť.
- 3) Rezistivita kontaktů.

Tato práce se zabývá statickými stavy tepelné analýzy, proto zde není zahrnut přechodný zdroj tepla při vypínání a zapínání.

Elektrické jističí přístroje jsou neustále vyráběny v menších a menších provedeních, jejich nároky na elektrické vlastnosti se však úměrně s velikostí nezmenšují. Z toho plyne, že teplo na jednotku obsahu je větší, což činí analýzu tepelného chování přístroje jednou z nejdůležitějších činností při vývoji.

Abstract

The heat generated in a circuit breaker can be transmitted in two ways: Either through metal parts of current path to conductors outside of device or through plastic parts or air of chassis.

The accuracy of the simulation depends on the accuracy of the 3D model and all his parts and it also depends on precise definition of materials with precise definition of electrical and thermal parameters.

Electrical circuit breaker has various source of the heat which results in raising temperature of the device above the level of environment. Heat sources are:

- 1) Joule's loss of the circuit breaker current path.
- 2) Heat loss in a bimetal, which is used for thermal release.
- 3) Resistivity of contacts.

This thesis deals with static state of thermal analysis so the sources do not include transient heat source for switching OFF and switching ON.

Electrical circuit breakers are made in smaller and smaller forms however their electrical parameters are not decreasing with size. There is logical conclusion that there is more heat on the same unit size which makes thermal analysis of circuit breaker one of the most important part of development.

Klíčová slova

Elektrický jistič; kompaktní jistič; tepelná simulace; tepelná analýza; proudová dráha; oteplovací zkoušky; EATON NZMB2.

Keywords

Electrical circuit breaker; molded case circuit breaker; thermal simulation; thermal analysis; current path; heating test; EATON NZMB2.

Bibliografická citace

MEJZLÍK, T. *Teplotní profil výkonového spínacího přístroje nízkého napětí pro různé provozní stavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lukáš Dostál.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Teplotní profil výkonového spínacího přístroje nízkého napětí pro různé provozní stavy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

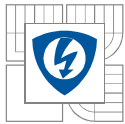
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Lukáši Dostálovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Rád bych také poděkoval panu Ing. Petru Slavatovi za odborné konzultace a firmě EATON za poskytnutí materiálů pro zpracování diplomové práce.

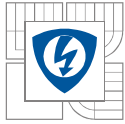
V Brně dne

Podpis autora

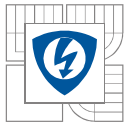


OBSAH

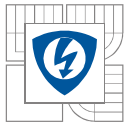
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	14
ÚVOD	15
1 ELEKTRICKÝ JISTIČ	16
1.1.1 MECHANICKÝ PRINCIP FUNKCE JISTIČE	16
1.1.2 ELEKTRICKÝ PRINCIP FUNKCE JISTIČE	16
1.1.3 ROZPOZNÁNÍ NADPROUDU NEBO ZKRATOVÉHO PROUDU.....	16
1.2 TYPY ELEKTRICKÝCH JISTIČŮ	17
1.2.1 ZPŮSOB ZHÁŠENÍ OBLOUKU.....	17
1.2.2 PODLE MÍSTA POUŽITÍ.....	17
1.2.3 PODLE MECHANICKÉ FUNKČNOSTI	17
1.2.4 PODLE VELIKOSTI JMENOVITÉHO NAPĚTÍ	17
1.2.5 PODLE TYPU SPOUŠTĚ	17
1.2.6 PODLE ÚROVNĚ V ROZVODNÉ SOUSTAVĚ	17
1.3 MODULÁRNÍ JISTIČ	17
1.3.1 KONSTRUKCE.....	18
1.3.2 VYPÍNAČÍ CHARAKTERISTIKY B, C, D.....	18
1.4 KOMPAKTNÍ JISTIČ[13]	20
1.4.1 KONSTRUKCE A PRINCIP FUNKCE	20
1.4.2 HLAVNÍ PARAMETRY KOMPAKTNÍCH JISTIČŮ:.....	21
1.5 VZDUCHOVÉ JISTIČE	21
1.5.1 HLAVNÍ PARAMETRY VZDUCHOVÝCH JISTIČŮ.....	22
2 SEZNÁMENÍ S PŘÍSTROJEM EATON NZMB2-A S TERMOMAGNETICKOU SPOUŠTÍ	23
2.1 HLAVNÍ PARAMETRY	23
2.2 PRINCIP FUNKCE TEPELNÉ SPOUŠTĚ[5]	23
2.3 PRINCIP FUNKCE ZKRATOVÉ SPOUŠTĚ[5]	24
2.4 KONTAKTNÍ SYSTÉM	25
2.5 KOREKČNÍ FAKTOR	26
2.6 PODROBNÉ SPECIFIKACE [18]	28
2.6.1 VYPÍNAČÍ CHARAKTERISTIKA.....	29
2.6.2 INTEGRÁLNÍ CHARAKTERISTIKA I ² T.....	30
2.6.3 PŘÍSLUŠENSTVÍ	31
3 TVORBA 3D MODELU JISTIČE	33



3.1	MODEL Y JEDNOTLIVÝCH SOUČÁSTÍ.....	33
3.2	VARIANTA 1 – ROZMĚROVÉ VÝKRESY PŘIMO OD VÝROBCE	33
3.3	VARIANTA 2 – VYTVOŘIT MODEL POMOCÍ 3D SKENERU.....	33
3.4	VARIANTA 3 – RUČNÍ OBKRESLOVÁNÍ FOTOGRAFIÍ Z FOTOAPARÁTU	34
	3.4.1 ROZLOŽENÍ, VYFRÉZOVÁNÍ A SLOŽENÍ JISTIČE.....	34
	3.4.2 UKÁZKA MODELOVÁNÍ V PRAXI.....	36
4	OTEPLOVACÍ ZKOUŠKY	40
4.1	PŘÍPRAVA NA OTEPLOVACÍ ZKOUŠKY	40
4.2	OTEPLENÍ PŘI JMENOVITÉM PROUDU 125 A	41
	4.2.1 DŮVOD MĚŘENÍ.....	41
	4.2.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	41
	4.2.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	42
	4.2.4 ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	43
4.3	OTEPLENÍ PŘI NADPROUDU 250 A.....	43
	4.3.1 DŮVOD MĚŘENÍ.....	43
	4.3.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	44
	4.3.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	44
	4.3.4 ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	44
4.4	OTEPLENÍ PŘI PONÍŽENÉM JMENOVITÉM PROUDU 100 A	45
	4.4.1 DŮVOD MĚŘENÍ.....	45
	4.4.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	45
	4.4.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	46
	4.4.4 ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	47
4.5	OTEPLENÍ PŘI SMLUVENÉM NEVYPÍNACÍM A VYPÍNACÍM PROUDU.....	47
	4.5.1 DŮVOD MĚŘENÍ.....	47
	4.5.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	48
	4.5.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	48
	4.5.4 ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	48
4.6	ROZDÍL MEZI PŘÍVODNÍMI KABELY A PASY	49
	4.6.1 DŮVOD MĚŘENÍ.....	49
	4.6.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	49
	4.6.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	50
	4.6.4 ZÁVĚR MĚŘENÍ.....	50
5	SIMULACE OTEPLENÍ.....	51
5.1	PŘÍPRAVY PODKLADŮ	51
	53
	5.1.1 DEFINICE MATERIÁLŮ	53
5.2	VÝSLEDKY SIMULACÍ.....	54
	5.2.1 USTÁLENÁ TEPLOTA PŘI JMENOVITÉM PROUDU I_N	54
	5.2.2 ÚBYTKY NAPĚTÍ NA PROUDOVÉ DRÁZE JISTIČE.....	55
	5.2.3 VÝPOČTY OTEPLENÍ PRO 6-14 NÁSOBKY I_N V KRITICKÉM BODĚ JISTIČE	56

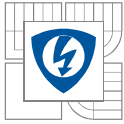


6 ROZBOR VÝSLEDKŮ	58
6.1 TEPLOTNÍ A ÚBYTKOVÝ PROFIL JISTIČE	58
6.1.1 ZKOUŠKA SMLUVENÉHO NEVYPÍNACÍHO A VYPÍNACÍHO PROUDU	60
7 PRÁCE DO BUDOUČNA	62
7.1 ZJEDNODUŠENÍ PŘI MODELOVÁNÍ	62
7.1.1 POUŽITÍ JEDNOHO PÓLU TŘÍFÁZOVÉHO JISTIČE.	62
7.1.2 VYJMUTÍ URČITÝCH ČÁSTÍ JISTIČE Z MODELU	62
7.1.3 TEPELNĚ ZÁVISLÉ PŘECHODOVÉ ODPORY	62
7.2 VÝPOČET PARAMETRŮ PROUDOVÉ DRÁHY	62
7.2.1 ELEKTRICKÁ REZISTIVITA KONTAKTŮ.....	62
S CÍLEM NAJÍT ELEKTRICKOU REZISTIVITU KONTAKTŮ, NUTNĚ MUSÍ BÝT VYJÁDŘEN POLOMĚR PRUŽNĚ DEFORMOVANÉ OBLASTI KONTAKTŮ:	62
7.2.2 TEPELNÁ REZISTIVITA TEPELNÉ REZISTIVITY SE VYPOČÍTÁJÍ NA ZÁKLADĚ ELEKTRICKÝCH REZISTIVIT PODLE TOHOTO VZORCE	63
7.2.3 JOULOVY ZTRÁTY	63
7.3 PŘECHODOVÉ DĚJE ANALÝZA CHOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	63
8 ZÁVĚR.....	64
LITERATURA	65
PŘÍLOHY	67
8.1 PŘÍLOHA 1: DEFINICE MATERIÁLŮ PRO VÝPOČET	67
8.2 PŘÍLOHA 2: DVD.....	74

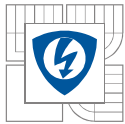


SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1.1) Konstrukce modulárního jističe. [3].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 1.2) Vypínací charakteristiky modulárního jističe [4].....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 1.3) Ilustrační fotografie kompaktního jističe.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 1.4) Ilustrační fotografie vzduchového jističe z katalogu výrobce.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2.1) Ilustrační popis tepelné spouště [5].</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 2.2) Ilustrační popis zkratové spouště [5].</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 2.3) Model pohyblivých kontaktů rotoaktivního spínacího mechanismu.</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 2.4) Vypínací charakteristika jističe NZMB2.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 2.5) Propuštěná energie jističe NZMB2.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 2.6) Příslušenství k jističům NZM.</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 3.1) Ilustrační obrázek přístroje ZScanner 800 z katalogu výrobce.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 3.2) Ilustrační fotografie při rozebírání jističe.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 3.3) I pól rotoaktivní spouště.</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 3.4) Zhášecí komora elektrického oblouku.</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 3.5) Fotografie vložena do CADu a odměřena úhlová odchylka od souřadného systému.</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 3.6) Fotografie otočena a obrys obkreslen.</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 3.7) Obrys převeden na křivku a vytažen.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 3.8) Proudová dráha jednoho pólu jističe v šasi v řezu.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 4.1) Body uvnitř jističe, ve kterých byla sledována teplota.</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 4.2) Oteplovací zkouška pro jmenovitý proud I_n.</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 4.3) Oteplovací zkouška $2 \times I_n$.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 4.4) Oteplovací zkouška při poníženém I_n 100 A.</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 4.5) Zkouška smluveného nevypínacího a vypínacího proudu (1,04 a 1,3 I_n).....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 4.6) Porovnání oteplení pro přívodní pasy a přívodní kabely.</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 5.1) Změřený odpor proudové dráhy na jednotlivých měřících bodech.</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 5.2) Vyznačené plochy, ve kterých byly definovány přechodové elektrické odpory mezi součástkami.</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 5.3) Vyznačené plochy, ve kterých byly definovány přechodové tepelné odpory mezi součástkami.</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 5.4) Ustálená teplota proudové dráhy jističe při jmenovitém proudu I_n.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 5.5) Úbytky napětí na proudové dráze jističe.</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 5.6) Simulace průběhu oteplení dolního kontaktu pro různé hodnoty přetížení.</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 5.7) Simulace oteplení topítka pro různé hodnoty přetížení.</i>	<i>57</i>

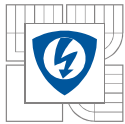


<i>Obrázek 6.1) Teplotní a úbytkový profil jističe.</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 5.8) Výpočet smluveného vypínacího a nevypínacího proudu.</i>	<i>60</i>



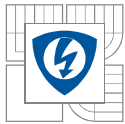
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 4.1) Popis umístění měřících bodů.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 4.2) Hodnoty oteplení změřené dotykovým teploměrem.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 4.3) Hodnoty oteplení změřené dotykovým teploměrem.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 5.1) Hodnoty pro různé druhy oteplení dolního kontaktu.</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 6.1) Hodnoty teplotního profilu jističe.</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 6.2) Hodnoty úbytkového profilu jističe.</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 6.3) Porovnání hodnot smluveného nevypínacího proudu.</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 6.4) Porovnání hodnot smluveného vypínacího proudu.....</i>	<i>61</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
a_e	poloměr pružně deformované oblasti kontaktů	m
F_K	přítláčná síla na kontaktech	N
E_i	modul pružnosti	Pa
μ_i	Poissonovo číslo (poměr)	-
r_i	poloměr kontaktní plochy	m
R_E	elektrický odpor	Ω
$\bar{\rho}$	průměrná elektrická rezistivita mezi dvěma materiály	$\Omega \cdot \text{m}$
C_p	materiálová konstanta	$\Omega \cdot \text{N}$
R_T	tepelný odpor	$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
$\bar{\lambda}$	průměrná tepelná vodivost mezi dvěma materiály	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
P	výkon	W
I	proud	A
U_e	jmenovité provozní napětí	V
U_{imp}	jmenovité impulzní výdržné napětí	V
U_i	jmenovité izolační napětí	V
I_{cm}	jmenovitá zkratová zapínací schopnost	A
I_{cn}	jmenovitá zkratová vypínací schopnost	A
I_{cs}	Jmenovitá provozní vypínací schopnost	A
I_n	jmenovitý proud	A



ÚVOD

Práce je členěna do sedmi kapitol, první si bere za cíl obecně nastínit problematiku elektrických jističů a zasadit tak práci do širšího kontextu. Je zde představena základní funkčnost jističe, jednotlivé typy a obšírněji představeny modulární, kompaktní a vzduchové jističe.

V druhé kapitole jde o seznámení s konkrétním kompaktním jističem nízkého napětí a podrobné rozebrání jeho funkčnosti. Tato kapitola se zabývá popisem přístroje NZMB2, tepelnou a magnetickou spouští, korekčním faktorem, nastavením jističe a jeho parametry.

Dále bylo třeba vytvořit 3D model proudové dráhy jističe v programu AutoCAD. Popsání procesu tvorby se věnuje celá třetí kapitola. Seznamuje s plánovanými variantami, které nebylo možné uskutečnit a popisuje cestu, jež byla nakonec shledána nejlepší přesto, že byla velmi obtížná a časově náročná.

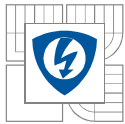
Čtvrtá kapitola se věnuje oteplovacím zkouškám, které probíhaly v laboratořích Vědeckotechnického parku profesora Lista. Oteplovací zkoušky probíhaly s různou modifikací přípojného systému, hodnotou proudu i vlastního nastavení přístroje. Kapitola obsahuje část rozboru výsledků.

V rámci diplomové práce byla provedena tepelná simulace jističe. Simulace probíhala v programu SolidWorks a celá tvorba a nastavování simulace i s výsledky a jejich rozбором je popsáno v kapitole číslo pět.

Dále je proveden zbývající rozbor změřeným a vypočtených výsledků a především je zde zpracován teplotní a úbytkový profil jističe.

Předposlední kapitola se zabývá způsoby, jakým by šlo docílit zpřesňování simulací do budoucna s výhledem na pokračování v tomto tématu v rámci doktorského studia.

Na závěr jsou stručně shrnuty výsledky dosažené v této diplomové práci.



1 ELEKTRICKÝ JISTIČ

Současné napájecí systémy se potýkají s obrovským množstvím elektrických přístrojů. Tyto přístroje pak mohou být poškozeny nebo zničeny poruchami v síti v podobě nadproudů nebo zkratových proudů. Stejně tak může být poškozena elektrická síť samotná. Za účelem ochrany těchto zařízení je nutné vzniklý nadproud co nejrychleji odpojit, jakmile je ovšem odveden, je třeba co nejrychleji uvést síť opět do provozu, aby byly zajištěny dodávky elektrické energie. Je zde tedy potřeba spínacího zařízení, které dokáže rozpojit obvod stejně tak jako ho opět spojit a to navíc pod nadproudem či zkratem. Elektrický jistič je zařízení, které všechny tyto požadavky splňuje.

1.1.1 Mechanický princip funkce jističe

Jistič obsahuje pevné a pohyblivé kontakty. V sepnuté poloze se tyto kontakty dotýkají a jističem může procházet proud. Další důležitou věcí, kterou má každý jistič, je mechanismus na uchování potenciální energie. Ta je v případě obdržení povelu uvolněna do pohyblivého kontaktu, kde je přeměněna na energii kinetickou s cílem co nejrychleji rozpojit obvod. Potenciální energie může být v různých formách, jako jsou třeba stlačené pružiny, stlačený vzduch u vzduchových jističů a další. Navíc po kompletním cyklu elektrického jističe je potenciální energie obnovena a opět připravena pro rozpojení obvodu.

1.1.2 Elektrický princip funkce jističe

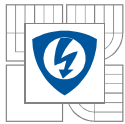
Elektrický jistič musí nést a hlavně rozpojit v případě poruchy velké proudy. Z časového hlediska bývá jistič po téměř celou dobu provozu v sepnutém stavu, přičemž přenáší proud (do výše jmenovitého). Nicméně v případě poruchy vedoucí k rozepnutí bývá právě v tomto přechodovém stavu namáhán nejvíce. Jak tepelně, tak elektromagneticky. Mimo velké proudy a z toho plynoucí elektromagnetické síly za to může z hlediska konstrukce každého jističe kritický elektrický oblouk. Ten je třeba co nejdříve uhasit ve zhašecích komorách a horké ionizované plyny odvést z jističe ven.

1.1.3 Rozpoznání nadproudu nebo zkratového proudu

Termomagnetická spoušť dokáže indikovat nadproudy a dát povel k rozpojení obvodu. O přetížení se stará jednoduchý konstrukční prvek – bimetal. Jde zpravidla o prvek proudové dráhy jističe, kdy proud prochází přes dva plošně dotýkající se kovové materiály, které jsou bodově mechanicky spojeny. Tyto materiály jsou ohřívány Joulovým teplem a vzhledem k rozdílným teplotním roztažnostem daných materiálu se v případě ohřátí nad určitou hladinou ohnou na jednu stranu, dotykem stisknou kolík, přes další mechanismy je uvolněna západka a potenciální energie udržovaná pro vypnutí jističe se uvolní a rozpojí obvod.

Termomagnetická spoušť také umí rozpoznávat a vypínat mnohem větší zkratové proudy. V případě, že se v obvodu objeví zkratové proudy, je magnetickými silami přitažena kotva, která uvolní západku a uvolnění západky vyvolá uvolnění pružin, jejichž energie rozpojí kontakty jističe. Podrobnější popis termomagnetické spouště i s ilustračními obrázky je v kapitole 2.2 a 2.3.

Druhý způsob vyhodnocování nadproudů a zkratových proudů je elektronickou spouští. Ta funguje na principu kontinuálního snímání procházejícího proudu jištěným obvodem a následným vyhodnocením v řídicích obvodech.



1.2 Typy elektrických jističů

Elektrické jističe se dají rozdělit do několika základních skupin.

1.2.1 Způsob zhášení oblouku

Vzduchové jističe

Olejové jističe

Vakuové jističe

Jističe využívající plyn SF₆

1.2.2 Podle místa použití

Jističe pro venkovní použití

Jističe pro vnitřní použití

1.2.3 Podle mechanické funkčnosti

Jistič s pružinovým mechanismem uchování energie

Jističe s pneumatickým mechanismem uchování energie

Jistič s hydraulickým mechanismem uchování energie

1.2.4 Podle velikosti jmenovitého napětí

Vypínač pro velmi vysoké napětí

Vypínač pro vysoké napětí

Jistič pro nízké napětí

1.2.5 Podle typu spouště

Termomagnetická

Elektronická

1.2.6 Podle úrovně v rozvodné soustavě

Hlavní úsekový

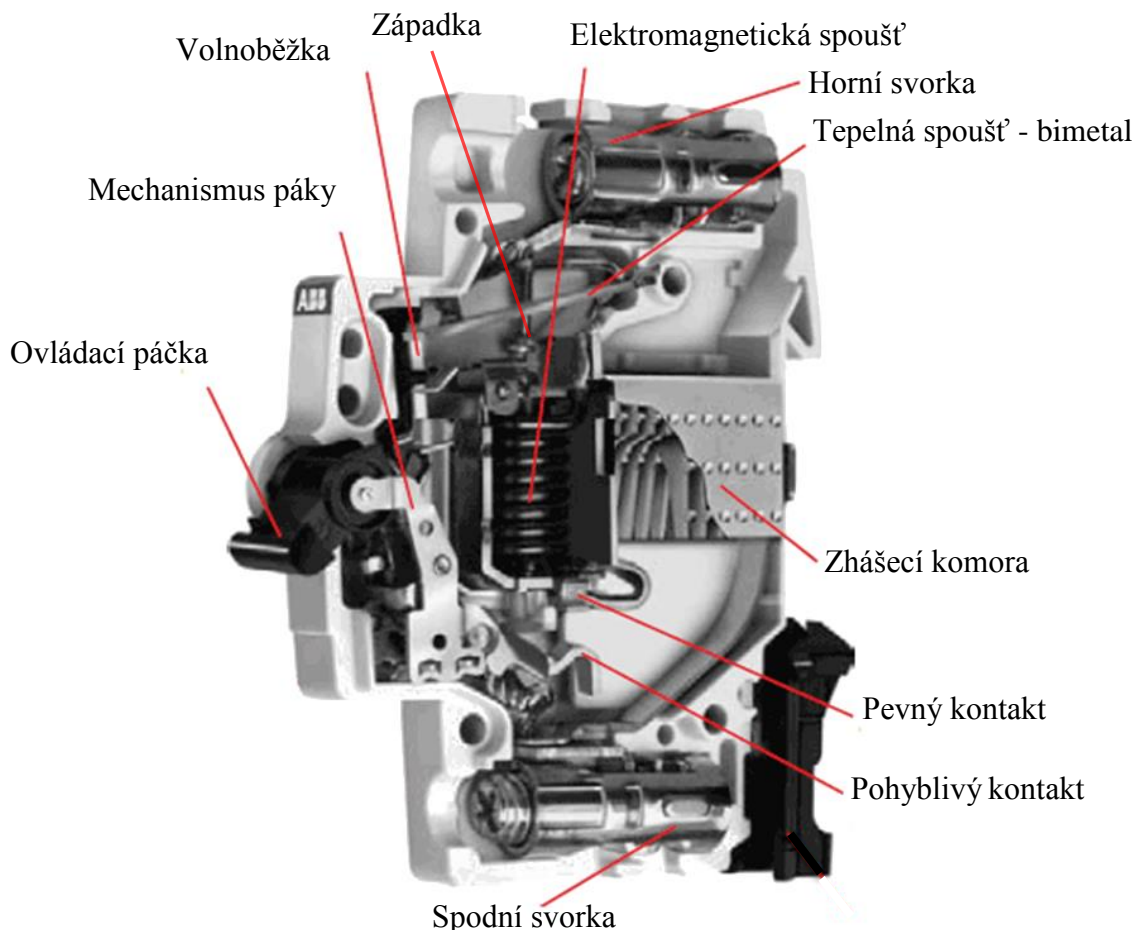
Hlavní podružný

Podružný rozvod konečné spotřeby

1.3 Modulární jistič

Modulární jistič (MCB - Miniature Circuit Breaker) nemá jmenovité proudy větší než 125 A. Pokud je jistič zkoušen dle ČSN-EN 60 898, může být obsluhován i osobami bez elektrotechnického vzdělání; v tomto případě je vypínací charakteristika neměnná.

1.3.1 Konstrukce



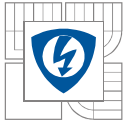
Obrázek 1.1) Konstrukce modulárního jističe. [3]

Modulární jistič má zpravidla jeden pevný a jeden pohyblivý kontakt. V případě, že jističem prochází zkratové proudy, elektromagnetická spoušť uvolní silou vyvolanou proudem procházejícím solenoidem západku. Západka uvolní volnoběžku a volnoběžka rozepne silou naakumulovanou v pružině obvod oddálením pohyblivého kontaktu od pevného. Pokud při rozepínání vznikne elektrický oblouk, dojde k jeho přenesení přes pomocný kontakt do zhášecí komory, kde je díky žebrování rozdělen na několik oblouků o menším napětí, které následně vyhasnou, a obvodem přestane protékat proud.

V případě nadproudů menších, kdy nezareaguje elektromagnetická spoušť, dochází k zahřívání bimetalového článku tepelné spouště. Se zvyšující se teplotou se bimetal víc a víc ohýbá do té doby, než se uvolní západka. Západka je stejná jako v případě elektromagnetické spouště a další postup je tedy ekvivalentní. Dojde k uvolnění volnoběžky a rozepnutí obvodu.

1.3.2 Vypínací charakteristiky B, C, D

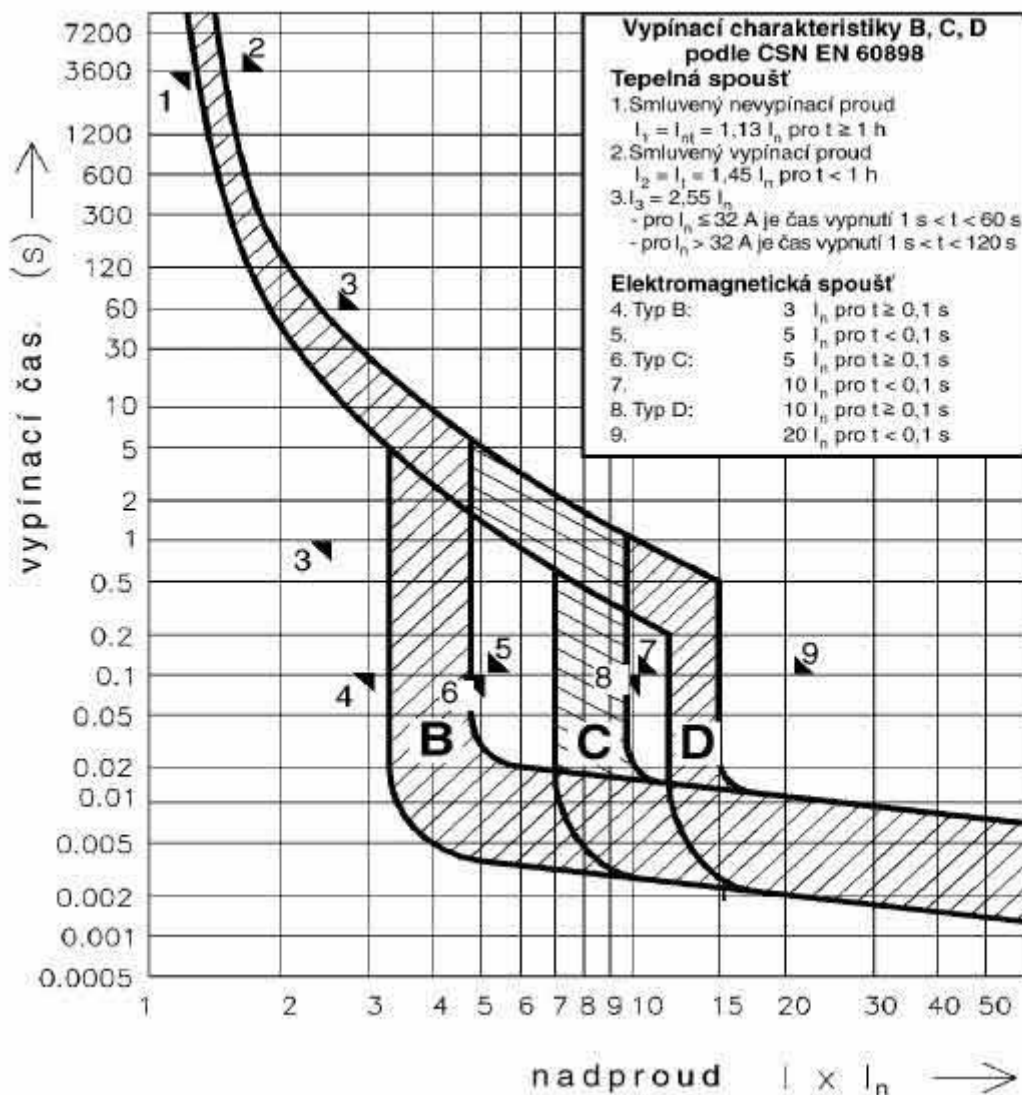
Modulární jističe se dále dělí dle normy ČSN ISO 60898[1] podle vypínacích charakteristik B, C, D. Každá charakteristika má své specifické vlastnosti a tedy i specifické použití.



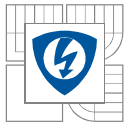
B – zkratová spoušť reaguje mezi 3-5 násobkem jmenovitého proudu a je tedy vhodná pro jištění přístrojů nebo vedení bez proudového rázu při zapnutí – běžné spotřebiče jako jsou zásuvkové obvody atd.

C – zkratová spoušť reaguje mezi 5-10 násobkem jmenovitého proudu a je vhodná pro jištění přístrojů nebo vedení s malými proudovými rázy při zapnutí – např. asynchronní motory, žárovkové skupiny.

D – zkratová spoušť reaguje mezi 10 a 20 násobkem jmenovitého proudu a je vhodná pro jištění přístrojů nebo vedení s velkými proudovými rázy – např. motory s těžkým rozběhem.



Obrázek 1.2) Vypínací charakteristiky modulárního jističe [4].



1.4 Kompaktní jistič[13]

Kompaktní jističe (MCCB – Molded Case Circuit Breaker) se používají v hlavních podružných rozvaděčích. Důležité je, aby byly přístroje perfektně zkoordinovány s předřazeným i přiřazeným rozvodem nn. MCCB musí co nejrychleji vypnout a přerušit proud, aby bylo omezeno silové a tepelné namáhání, kterému jsou vystaveny kabely, přívody a spotřebiče. Z toho důvodu se využívá odpudivých elektromagnetických sil mezi kontakty, které zajistí vypnutí poruchy ještě před jejím plným rozvinutím.

1.4.1 Konstrukce a princip funkce

Konstrukce a princip funkce se liší podle typu spouští, kterou je přístroj vybaven. Konkrétnímu přístroji EATON NZMB2 se podrobně věnuje další kapitola.

Termomagnetická spoušť

Podrobný popis termomagnetické spouště je v následující kapitole.

Specifika termomagnetické spouště:

Možnosti nastavení nadproudové ochrany na 70-100% jmenovitého proudu.

Možnosti nastavení zkratové spouště na 5-10 násobek jmenovitého proudu jističe.

Výhodou je, že může vypnout i stejnosměrné proudy. Nevýhodou je pak přímá závislost termální spouště na teplotě okolí.

Elektronická spoušť

Proud, který protéká proudovou dráhou, je vyhodnocen pomocí proudového transformátoru. Transformátor slouží přímo k napájení vypínacího relé a vyhodnocovací obvodů.

Specifika elektronické spouště:

Možnosti nastavení nadproudové ochrany na 60-100 % jmenovitého proudu.

Zkratová spoušť může být nastaven na 2-10 násobek jmenovitého proudu.

Je nákladnější než termomagnetická

Není závislá na okolní teplotě

Neumožňuje vypínat stejnosměrné proudy

Mikroprocesorová spoušť

Tato spoušť vychází z elektronické s tím rozdílem, že napájení je externí a vyhodnocování provádí sám mikroprocesor, což nese obrovskou výhodu v možnostech nastavení.

Specifika mikroprocesorové spouště

Finančně nákladná

Paměť na historii vybavení

LCD displej s aktuálními daty a historií



Možnost síťové komunikace s dalšími přístroji – nastavení časově selektivity, snadné vzdálené ovládání, nebo monitoring hodnot.



Obrázek 1.3) Ilustrační fotografie kompaktního jističe.

1.4.2 Hlavní parametry kompaktních jističů:

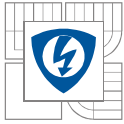
Vysoká vypínací schopnost až 150 kA.

Jmenovitý proud 32 - 2000 A

Tři stabilní polohy pákového mechanismu – ON/OFF/vybaven

1.5 Vzduchové jističe

Vzduchové jističe se používají v hlavních úsekových rozvaděčích a jsou vstupem pro napájení celého elektrického obvodu. Vzduchové jističe jsou v blízkosti napájecích zdrojů připojeny na přípojnice, které musí vést velké pracovní proudy, z toho důvodu jsou zkratové proudy vysoké.



V případě zkratu v napájecím rozvodu musí zůstat vzduchové jističe zapnuté, aby umožnily přiřazeným jisticím prvků poruchu vypnout. Často proto bývají časově zpožděné. Důležité vlastnosti jsou tedy vysoká elektrodynamická odolnost a vysoká tepelná odolnost [12].



Obrázek 1.4) Ilustrační fotografie vzduchového jističe z katalogu výrobce.

1.5.1 Hlavní parametry vzduchových jističů

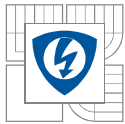
Vysoká vypínací schopnost do 100 kA

Jmenovitý proud 630 – 6300 A

Vysoká tepelná odolnost udávaná krátkodobým výdržným proudem 40 – 100 kA – 1 s

Vysoká elektrodynamická odolnost

Střadačový mechanismus umožňující fázované spínání zdrojů



2 SEZNÁMENÍ S PŘÍSTROJEM EATON NZMB2-A S TERMOMAGNETICKOU SPOUŠTÍ

Na základě předchozí spolupráce s firmou EATON ať už v rámci dobrovolného projektu IET 2, při bakalářské práci, ale také při mimoškolní spolupráci s tvorbou katalogů byl zvolen jako předmět této diplomové práce přístroj NZMB2 125 A.

Výkonové jističe NZM se vyrábí v provedení s termomagnetickou spouští nebo elektronickou.

2.1 Hlavní parametry

Vhodné pro ochranu obvodů a kabelů i pro další aplikace s nízkými záběrovými proudy.

Vyrábí se v tří a čtyřpólovém provedení s plnou ochranou čtvrtého N pólu.

Jmenovité pracovní napětí U_e 690 V AC.

Vhodné i pro stejnosměrné aplikace do 750 V.

Nadproudová spoušť nastavitelná v rozmezí $0,8 - 1 \times I_n$.

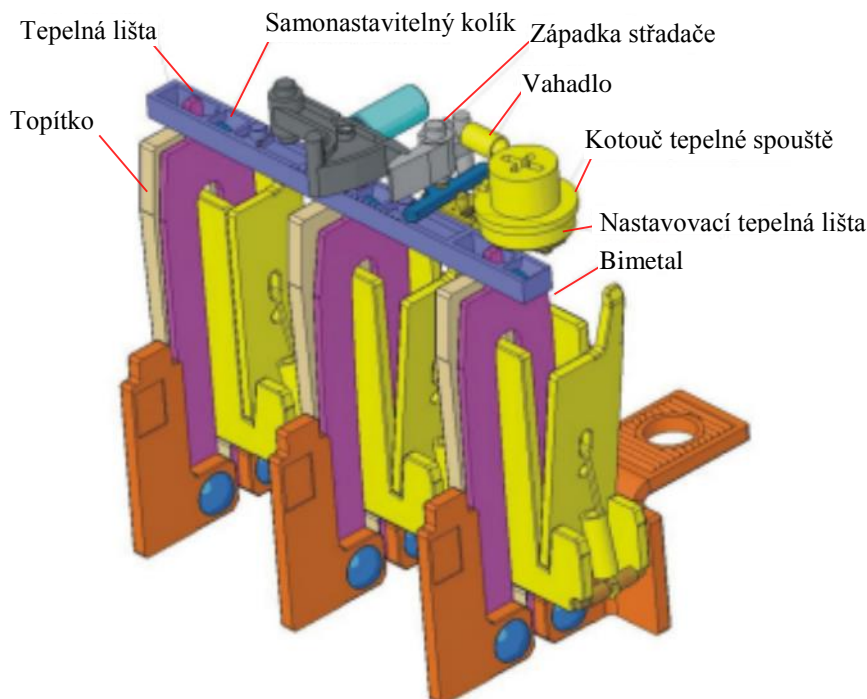
Zkratová spoušť je nastavitelná v rozsahu $6- 10 \times I_n$.

NZMB2 se vyrábí s vypínací schopností 25 kA, 50 kA a 150 kA.

Konstrukčně je uzpůsoben na provozní proud 250 A. Měděné vodiče jsou tedy naddimenzovány a proto nebude oteplení tak velké, jako u jiných přístrojů konstruovaných přímo na jmenovitý proud 125 A.

2.2 Princip funkce tepelné spouště[5]

Přístroj je vybaven dvěma mechanismy - tepelný je reprezentován topítkem, které je přímo ohříváno proudovou dráhou jističe. Topítko se velkou plochou dotýká bimetalového pásku, který se při průchodu nadproudů vychyluje a pohybuje s lištou zkratové spouště. Ta uvede do pohybu západku a po dostatečném otočení uvolní páku střadače, čímž dojde k vybavení. v daném čase dle vypínací charakteristiky a dle velikosti nadproudu tak spustí mechanicky západku a dojde k vybavení jističe.



Obrázek 2.1) Ilustrační popis tepelné spouště [5].

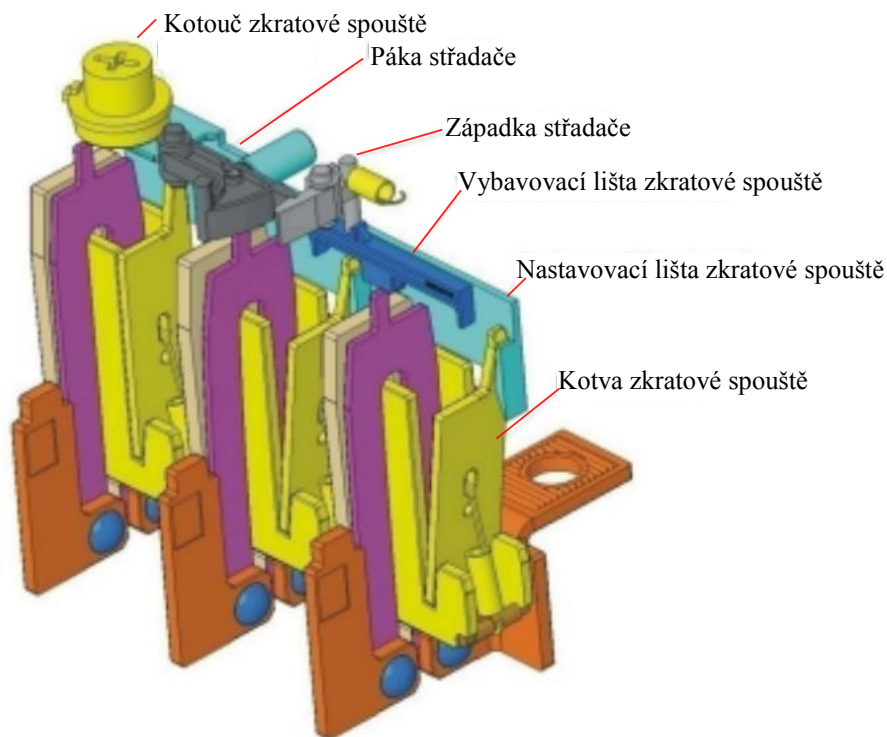
Základním parametrem tepelné spouště je ztrátový výkon topítka. Ten musí být takový, aby byl průhyb bimetalu při $1,3 \times I_n$ dostatečně velký k bezpečnému vybavení jističe. Zároveň je omezen maximální hodnotou ztrátového výkonu, která musí zajistit, aby nedošlo k překročení povolených provozních teplot okolních plastů.

Smluvený nevypínací proud u kompaktních jističů s tepelnou spouští je $1,05 \times I_n$. Znamená to, že jistič nesmí vybavit proud $1,05 \times I_n$ do dvou hodin.

Smluvený vypínací proud je naopak $1,3 \times I_n$. Do dvou hodin musí jistič v sekvenci po zatížení nevypínacím proudem (tedy při provozní teplotě) vybavit proud $1,3 \times I_n$.

2.3 Princip funkce zkratové spouště[5]

Při nadproudu dojde k přitažení kotvy zkratové spouště. Ta svým horním koncem udeří do vybavovací lišty zkratové spouště. Tato lišta uvede do pohybu západku střadače, která po dostatečném otočení uvolní páku střadače, jenž vybaví páku mechanismu jističe.



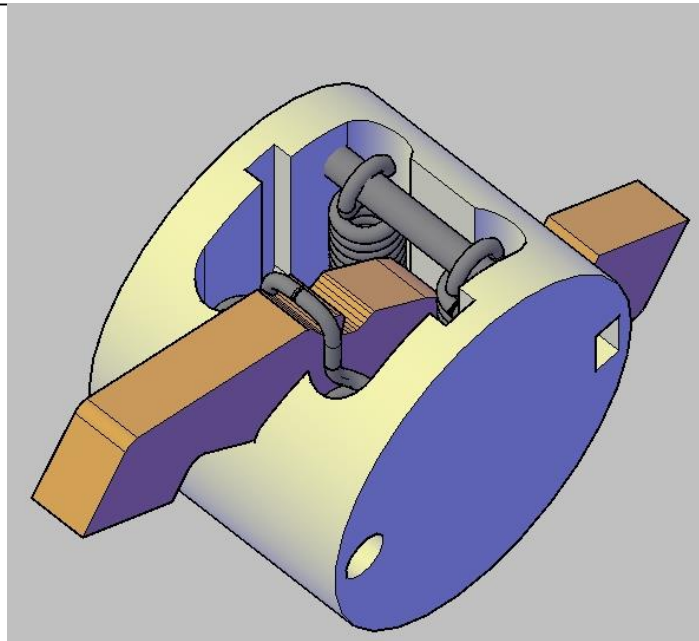
Obrázek 2.2) Ilustrační popis zkratové spouště [5].

Zkratová spoušť je zde tvořena jedním průvlekem (bimetal a topítko), kotvou, pružinou a hřídelí pružiny. Pro různé proudové rozsahy je možné použít různé materiály, pružina je pro každý proudový rozsah jiná. Zkratová spoušť je nastavitelná zpravidla v rozsahu $(5 - 10) \times I_n$.

2.4 Kontaktní systém

Kontaktní systém je v případě NZMB2 tvořen rotoaktivním mechanismem. Na každém pólu jsou dva pevné kontakty a dva pohyblivé. Při každém vypnutí nadproudů vzniká na kontaktech elektrický oblouk. V případě rotoaktivního mechanismu je energie, kterou musí každý kontakt vypnout a uhasit poloviční oproti jednokontaktovému mechanismu. V druhé řadě je tento kontaktní systém zkonstruován tak, že využívá tlaku vzniklého plazmatu k většímu vychýlení pohyblivých kontaktů a tedy i k rychlejšímu rozpojení obvodu a uhašení oblouků. Při průchodu nadproudu je od hodnoty $25 \times I_n$ tento mechanismus rozepnout obvod do 3 ms a značně tedy omezuje maximální proudy, které by se mohly na přístroji objevit, kdyby nechal doběhnout proud do maxima amplitudy. Z hlediska provozních vlastností má tento systém následující výhody:

- vysoká vypínací schopnost až 150 kA,
- vypínací čas v řádu jednotek ms – velké omezení zkratových proudů,
- mez selektivity mezi jističi až do 150 kA,
- nižší opotřebení jističe, kabeláže a rozvaděče při zkratu.

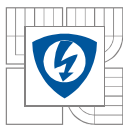


Obrázek 2.3) Model pohyblivých kontaktů rotoaktivního spínacího mechanismu.

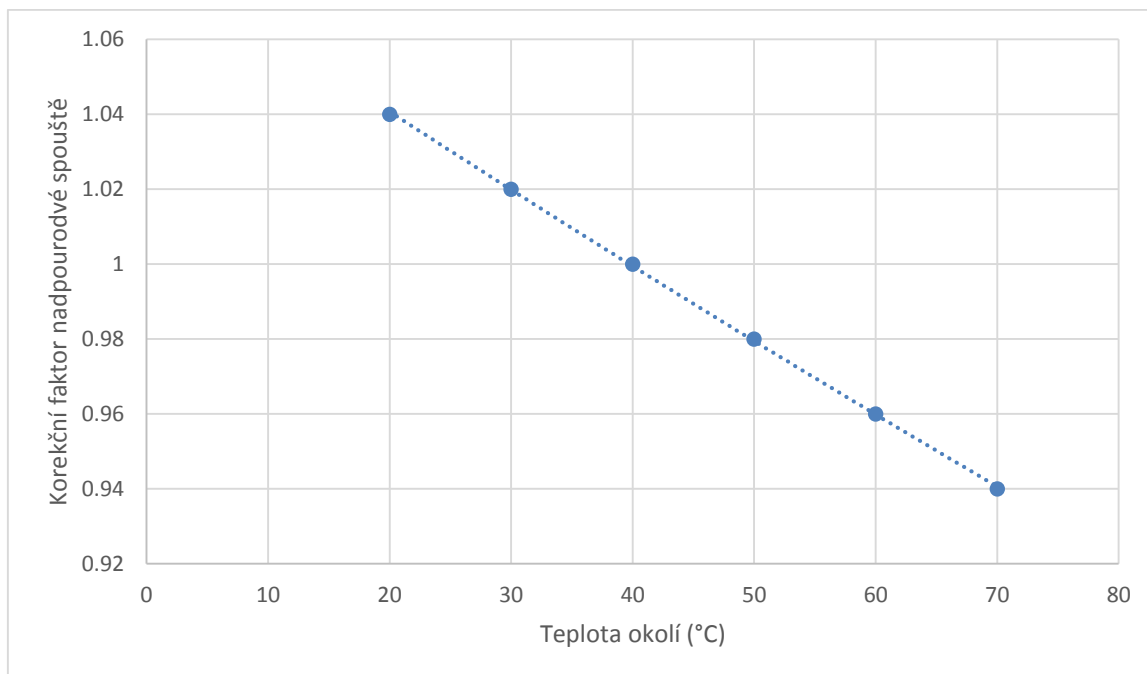
2.5 Korekční faktor

Bimetal je nastaven na provoz při okolní teplotě 40 °C. Průchodem proudem dojde k oteplení vždy o určitý inkrement vztažený k okolní teplotě, ovšem bimetal se ohne na základě absolutní teploty, která se na něm objeví. Je tedy zřejmé, že při jiných teplotách okolí bude vypínat dané proudy nepřesně a proto je nutné zohlednit korekční faktor.

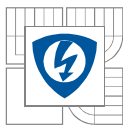
Korekční faktor dodává pro daný model výrobce přímo v katalogu a pro NZMB2 je následující:



Graf 2.1) Korekční faktor termomagnetické nadproudové spouště NZMB2 [18]

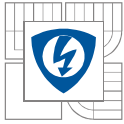


V případě měření na stejnosměrném proudu je třeba respektovat ještě korekční faktor týkající se nastavení okamžité zkratové spouště I_i . Pro DC režim platí: nastavení I_i (pro AC) / korekční faktor. Korekční faktor DC režimu je pro NZMB2 1,35.



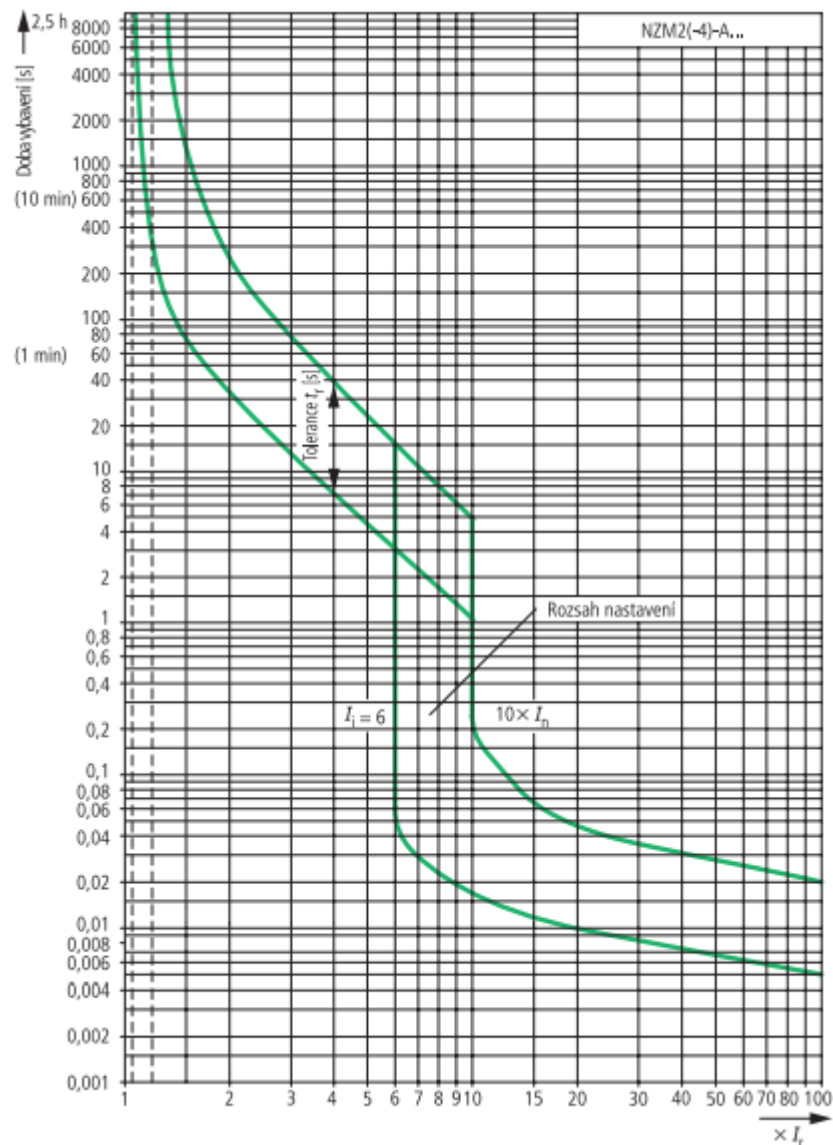
2.6 Podrobné specifikace [18]

Jmenovité impulsní výdržné napětí U_{imp}	
hlavní kontakty	8000 V
pomocné kontakty	6000 V
Jmenovité provozní napětí U_e	
AC	690 V
DC	750 V
Kategorie přepětí stupeň znečištění III/3	
Jmenovité izolační napětí U_i	1000 V
Jmenovitá zkratová zapínací schopnost I_{cm}	
400/415 V AC	53 kA
Jmenovitá zkratová vypínací schopnost I_{cn}	
400/415 V AC	25 kA
I_{cs} dle ČSN EN 60947 zkušební cyklus O-t-CO-t-CO	
400/415 V AC	25 kA
Mechanická životnost	20000 cyklů
Max. četnost spínacích cyklů	120/hod.
Elektrická životnost 400/415 V AC	7500 spínacích cyklů
Ztrátový výkon	27,61 W
Elektrický odpor na jeden pól	589 $\mu\Omega$
Celková doba rozepnutí při zkratu	<10 ms
Pracovní teplota	-25 až + 70°C
Hmotnost	2,345 kg



2.6.1 Vypínací charakteristika

Vypínací charakteristika jističího prvku udává, za jak dlouhou dobu jistič rozezne obvod při určitém proudu. Vypínací charakteristika má obě osy logaritmické. Na horizontální se udává násobek jmenovitého proudu a svislá osa reprezentuje čas vypnutí. Levá část vypínací charakteristiky, kde jsou nižší proudy a delší doby vypnutí má jiný tvar než ta pravá. Je to dáno termomagnetickou spouští. Tepelná část spouště vypíná menší nadproudy za delší dobu (levá část charakteristiky) a magnetická spoušť reaguje rychle na velké nadproudy.

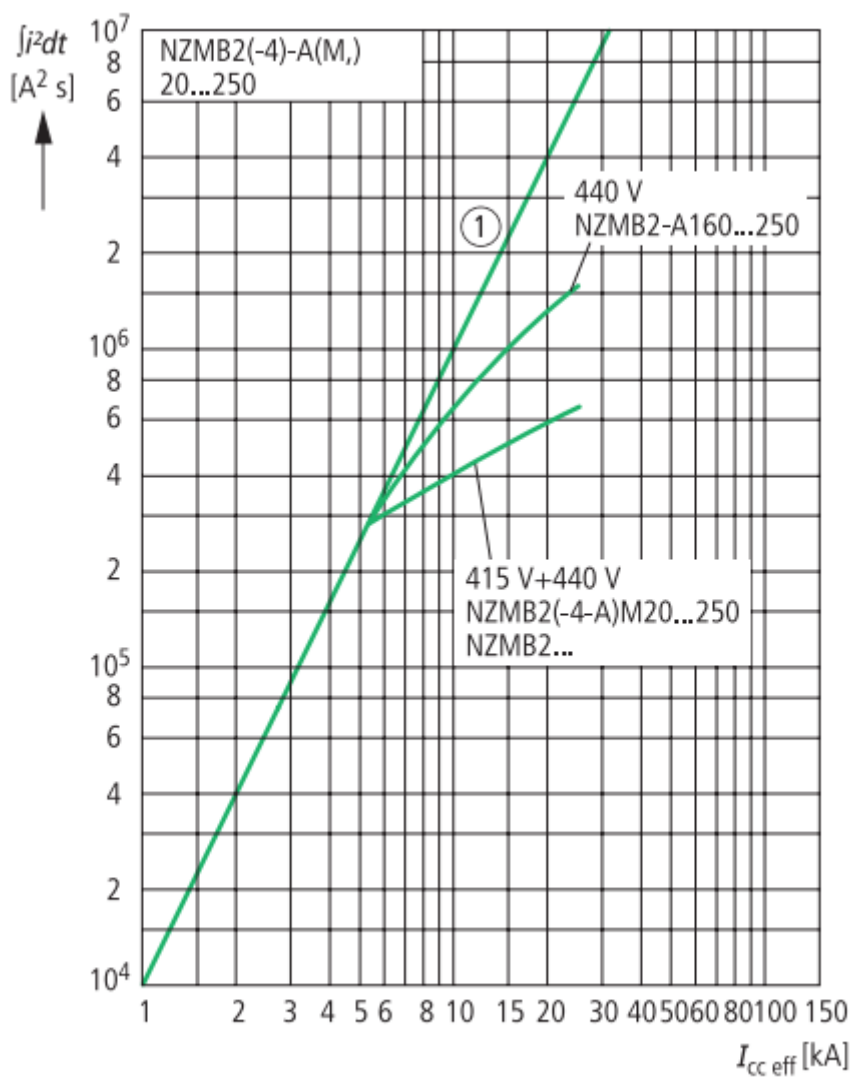


Obrázek 2.4) Vypínací charakteristika jističe NZMB2.



2.6.2 Integrovaná charakteristika I^2t

Z charakteristik lze vyčíst, jak velkou energii propustí jistič při zkratu. Tyto údaje jsou důležité především ve vztahu k jištěným přístrojům. Propuštěná energie musí být tak velká, aby je nepoškodila.

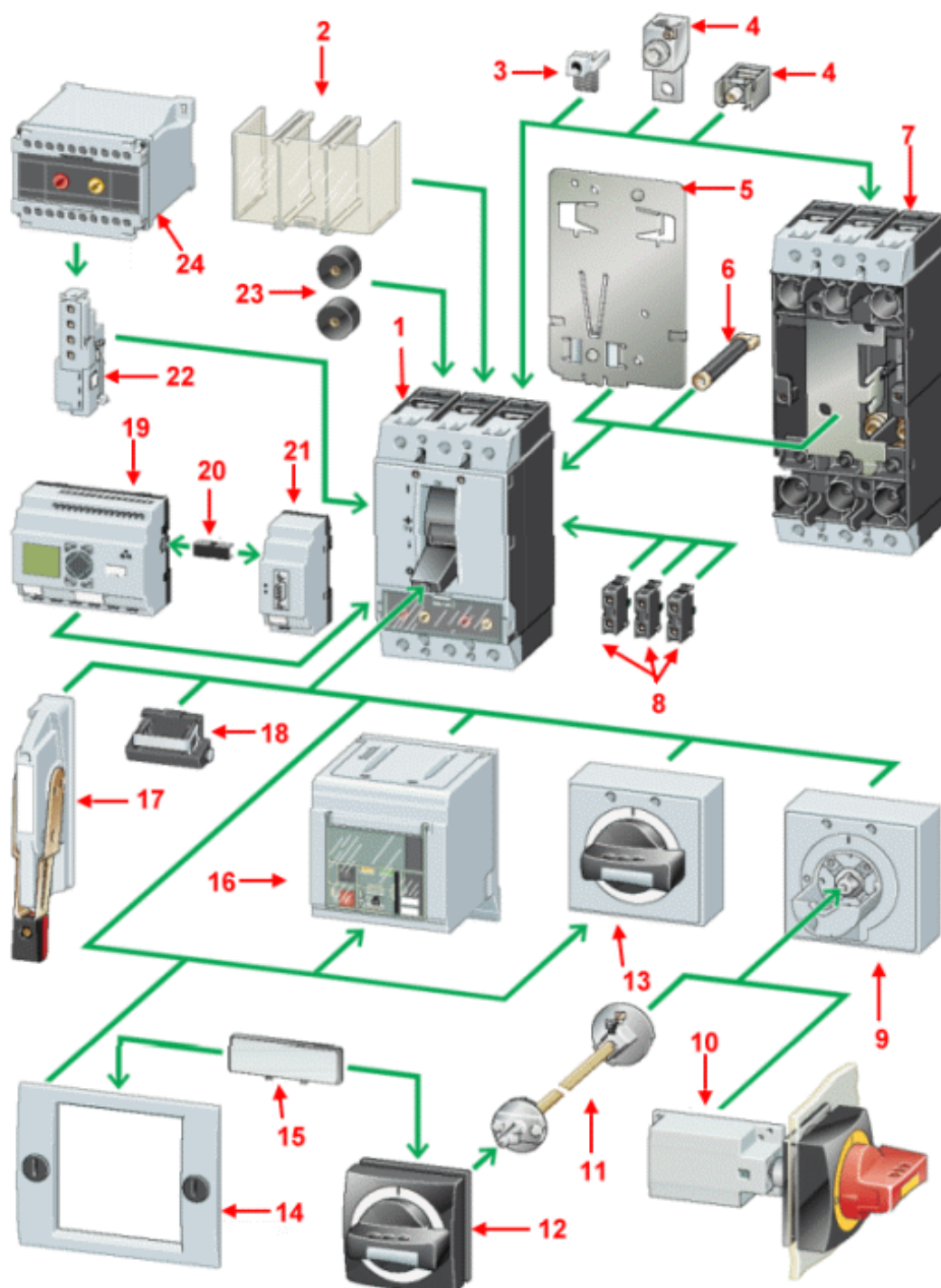


① 1 půlvlna

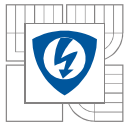
Obrázek 2.5) Propuštěná energie jističe NZMB2.

2.6.3 Příslušenství

Ke kompaktním jističům NZM je možné objednat celou řadu příslušenství. Od podpěťových spouští, přes různé druhy ovládacích rukojetí, montážní sady hlavního vypínače až po motorový pohon.



Obrázek 2.6) Příslušenství k jističům NZM.



Popis příslušenství

- 1) základní přístroj
- 2) kryt
- 3) svorky pro ovládací obvody
- 4) připojovací svorky
- 5) montážní základna
- 6) svorky pro zadní připojení
- 7) odnímatelné provedení
- 8) pomocné kontakty
- 9) podpěra pro dveřní spojku
- 10) ovládací rukojeť pro boční montáž
- 11) prodlužovací osa
- 12) ovládací rukojeť
- 13) ovládací rukojeť
- 14) krycí rámeček
- 15) výstražný štítek
- 16) motorový pohon
- 17) rukojeť boční páky
- 18) uzamčení jističe
- 19) komunikační modul
- 20) konektor
- 21) rozhraní Profibus
- 22) napěťová spoušť
- 23) distanční podložky
- 24) zpožďovací jednotka

3 TVORBA 3D MODELU JISTIČE

3.1 Modely jednotlivých součástí

K tomu, aby mohl být jistič namodelován, animován a simulován, bylo třeba nejprve získat jeho rozměrové výkresy.

3.2 Varianta 1 – rozměrové výkresy přímo od výrobce

Jako nejlepší a nejpřesnější se jevílo sehnat rozměrové výkresy od výrobce, nebo ještě lépe přímo 3D model. Rozměry by pak byly naprosto přesné a dalo by se tedy předpokládat, že i výsledky by dosahovaly nejpřesnějších hodnot. To se nakonec ukázalo jako problematické, nikoliv však nelogické. Výrobci si zkrátka chrání svoje know-how.

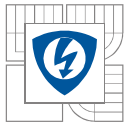
3.3 Varianta 2 – vytvořit model pomocí 3D skeneru

Existují 3D skenery, které dokáží přesně odměřit a vytvořit 3D model daných součástek. Hojně se využívají v Číně, když potřebují okopírovat nějaké výrobky. Jeden takový 3D skener je na fakultě k dispozici. Jde konkrétně o ZScanner 800, jehož bylo využito již několikrát při zpracování závěrečných prací a nejinak tomu mělo být i v této závěrečné práci.



Obrázek 3.1) Ilustrační obrázek přístroje ZScanner 800 z katalogu výrobce.

ZScanner 800 je ruční, laserový skener. Pro skenování je však nutné nejprve vytvořit vhodné podmínky. Toho bylo docíleno pozičními značkami, které jsou snímány a které umožní skeneru vidět jejich vzájemnou polohu. Díky třem kamerám snímá přístroj prostorově.



ZScanner po zpracování v PC vytváří STL povrchové modely, které je možné pak využít v dalších programech jako je SolidWorks, AutoCAD apod. Zdálo se to jako vhodné řešení. Byly vytvořeny modely pro 6 součástek ze spínacího mechanismu jističe, které se snadno naimportovaly do programů pro další zpracování, a na první pohled vypadaly velmi přesně.

Byl zde ovšem jeden problém na první pohled jasně viditelný a druhý, který už nebyl tak zřejmý, nicméně později se objevil. Prvním problémem bylo to, že skener snímá povrchové a pro analýzu bylo třeba vytvořit objemové modely. To by se dalo obejít tím, že se vezme půdorys nebo jiný pohled z povrchového modelu, překreslí se x, y souřadnice a pak se „vytáhne“ do třetího rozměru. Zcela jistě by to takto bylo možné použít a pořád by znamenalo výrazné ulehčení práce oproti klasickému přeměřování a překreslování. Nicméně objevil se ještě jeden problém a tím byla nepřesnost způsobená při vyhlazování a odstraňování chyb skenů. Při podrobném zkoumání jednotlivých součástí se ukázalo, že se rozměry poměrově liší až o jednotky milimetrů. Pracovat s takto nepřesnými rozměry by patrně postrádalo smysl, bylo tedy nutné vymyslet další variantu, která povede k vytvoření přesného modelu jističe.

3.4 Varianta 3 – ruční obkreslování fotografií z fotoaparátu

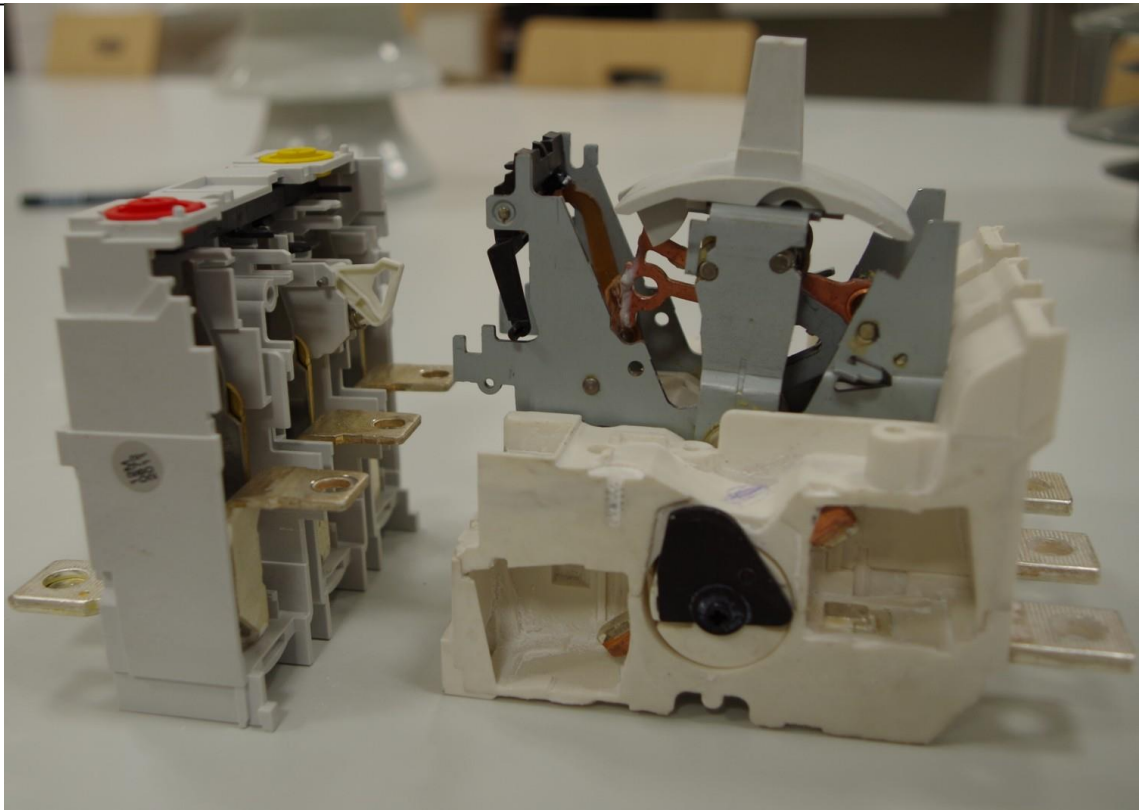
Třetí, nejpracnější možností bylo vyfocení součástky v pohledu bokorys, nárys a půdorys a jejich překreslení a namodelování. V tomto postupu však bylo nutné dodržet několik zásad.

- 1) Fotoaparát je ve statické poloze na stativu
- 2) Fotoaparát je přesně kolmo nad součástkou
- 3) Objektiv fotoaparátu je umístěn co nejbližší pomyslné ose procházející středem součástky
- 4) Při překreslování je nutné provést SCALE – tedy zvětšit součástku na reálné rozměry
- 5) Případně dorovnat vodorovné a svislé osy, aby se lépe kreslilo

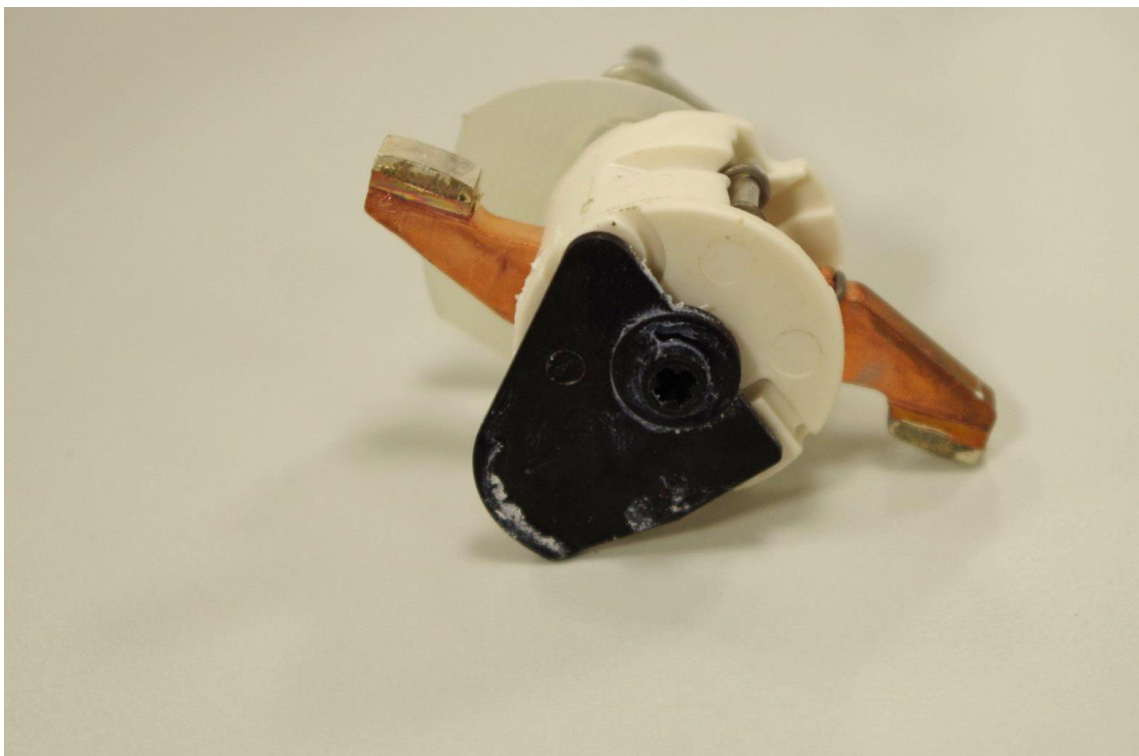
Po dodržení těchto zásad však stále nebylo zřejmé, jestli bude přesnost dostatečná. To se prokázalo až při sestavování jednotlivých součástek do modelu, kde byly měřené odlišnosti v řádu desetin milimetrů – tedy desetinové oproti předchozí variantě.

3.4.1 Rozložení, vyfrézování a složení jističe

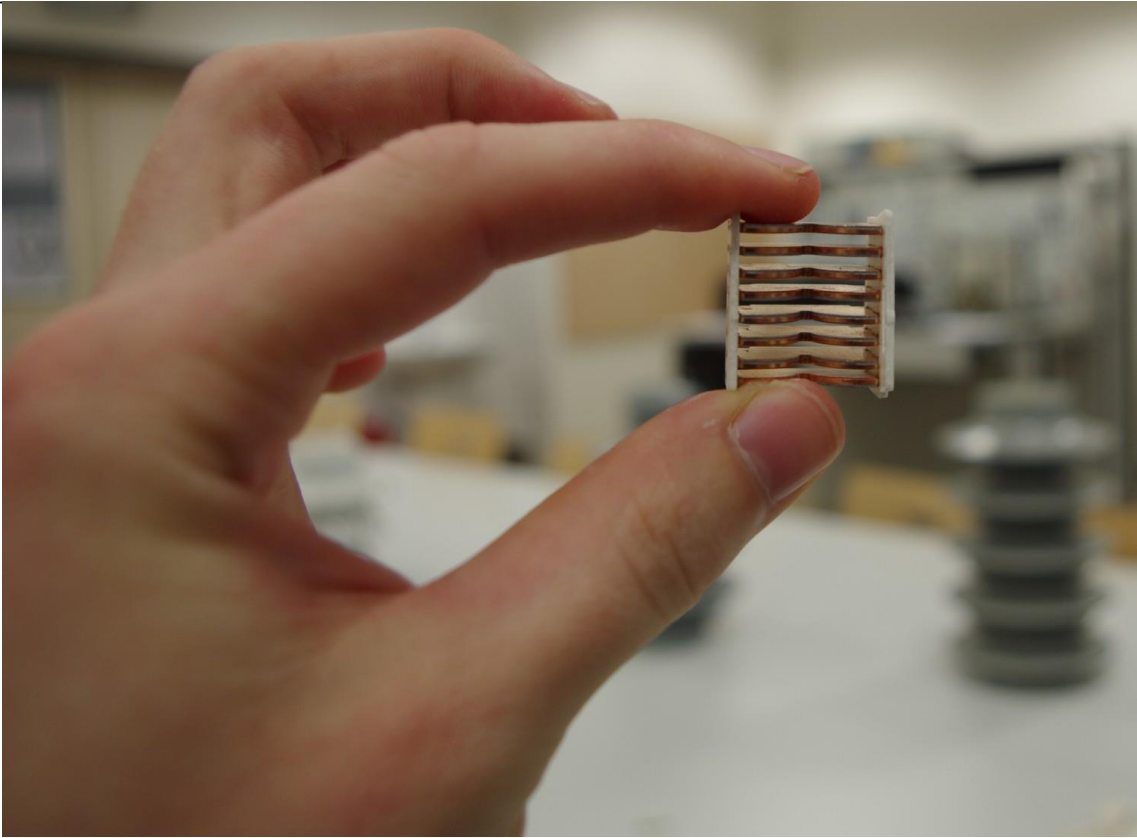
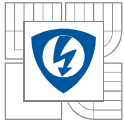
Pro možnost realizace varianty 3 musel být jistič NZMB2 od EATONu nejprve rozebrán téměř do poslední součástky a vyfrézován, aby byla odhalena jeho proudová dráha.



Obrázek 3.2) Ilustrační fotografie při rozebírání jističe.



Obrázek 3.3) 1 pól rotoaktivní spouště.



Obrázek 3.4) Zhášecí komora elektrického oblouku.

3.4.2 Ukázka modelování v praxi

Po rozebrání byla každá součástka nejprve vyfocena, poté ořezána a vložena do AutoCADu. Kde byla srovnána do souřadného systému programu, aby se snáze kreslila a později snáze uchycovala do sestavy.

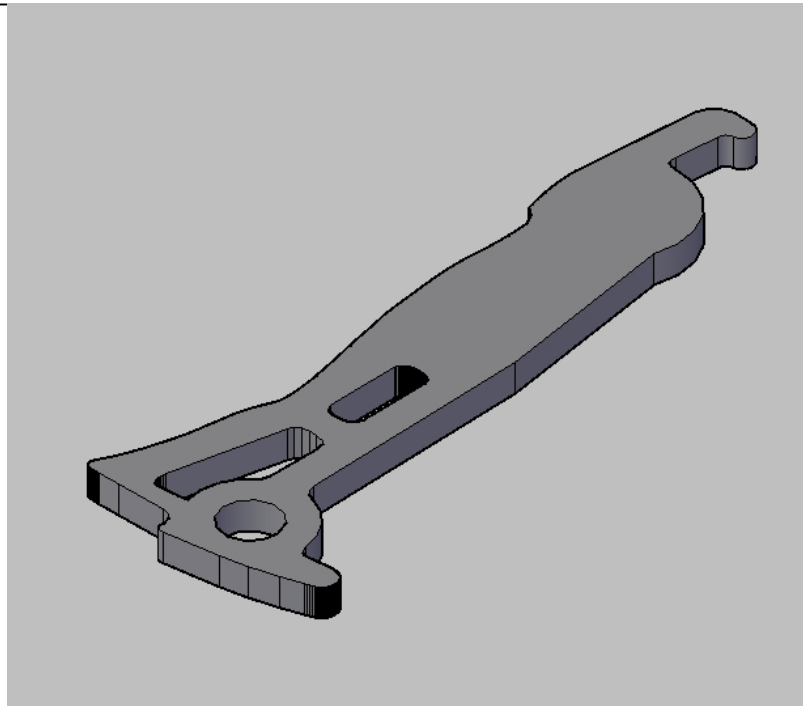


Obrázek 3.5) Fotografie vložena do CADu a odměřena úhlová odchylka od souřadného systému. Následoval krok obkreslení obrysů se všemi kružnicemi, zaobleními, kolnými hranami a podobně.



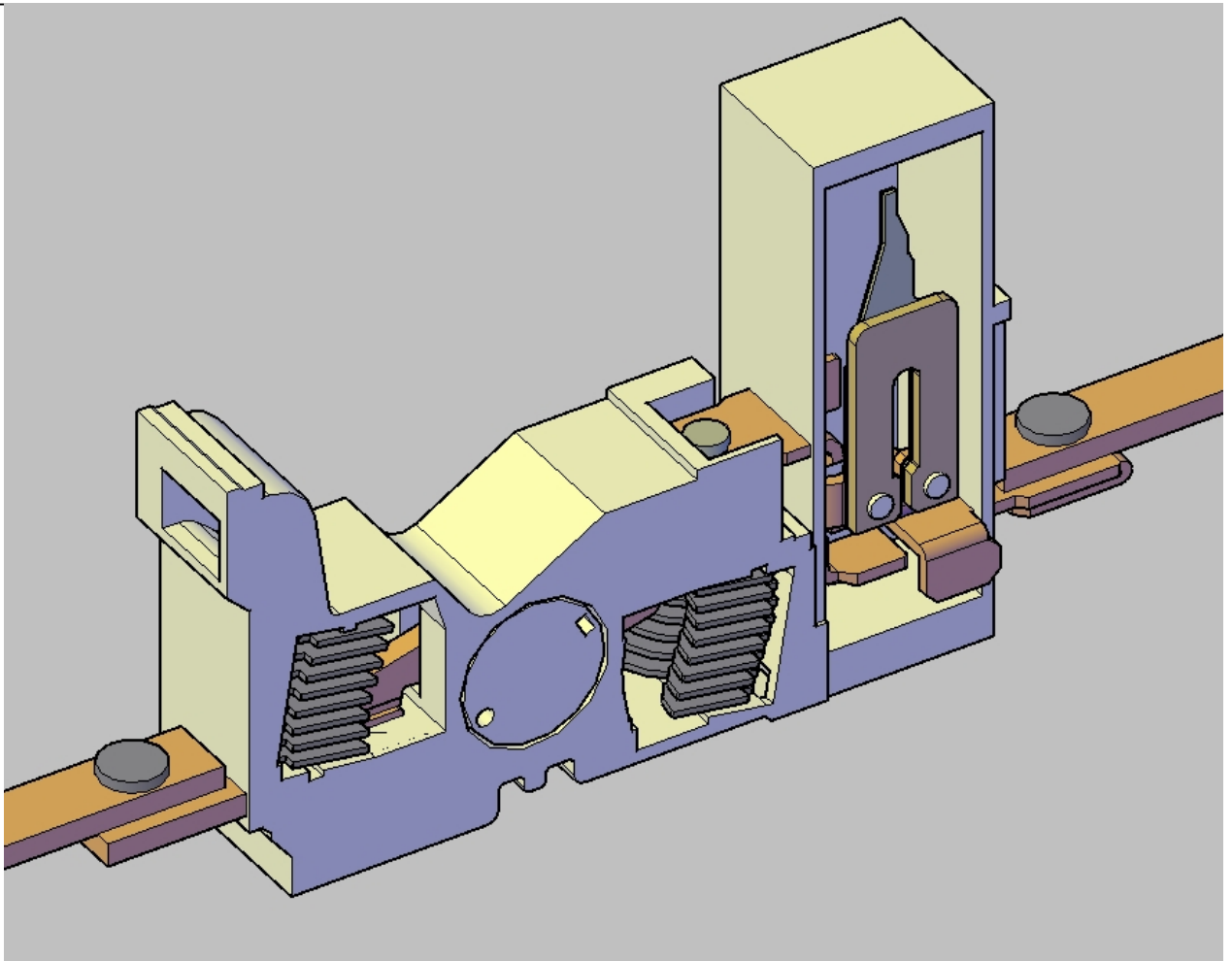
Obrázek 3.6) Fotografie otočena a obrys obkreslen.

Obrys byl pak převeden na jednu křivku, aby se mohl vytáhnout v třetí souřadnici souřadného systému.



Obrázek 3.7) Obrys převeden na křivku a vytažen.

Podobným postupem byly vymodelovány všechny ostatní díly a sestaveny tak, jak k sobě patří.



Obrázek 3.8) Proudová dráha jednoho pólu jističe v šasi v řezu.

Sestavu tvoří celkem 62 samostatných objemových součástí, avšak ne všechny byly zahrnuty do finálního modelu pro simulaci kvůli usnadnění výpočtů. Součástky typu pákový mechanismu, mechanismus západky a například pružiny byly odstraněny, neboť mají malý vliv na oteplení proudové dráhy, ale velký vliv na náročnost výpočtu.

4 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKY

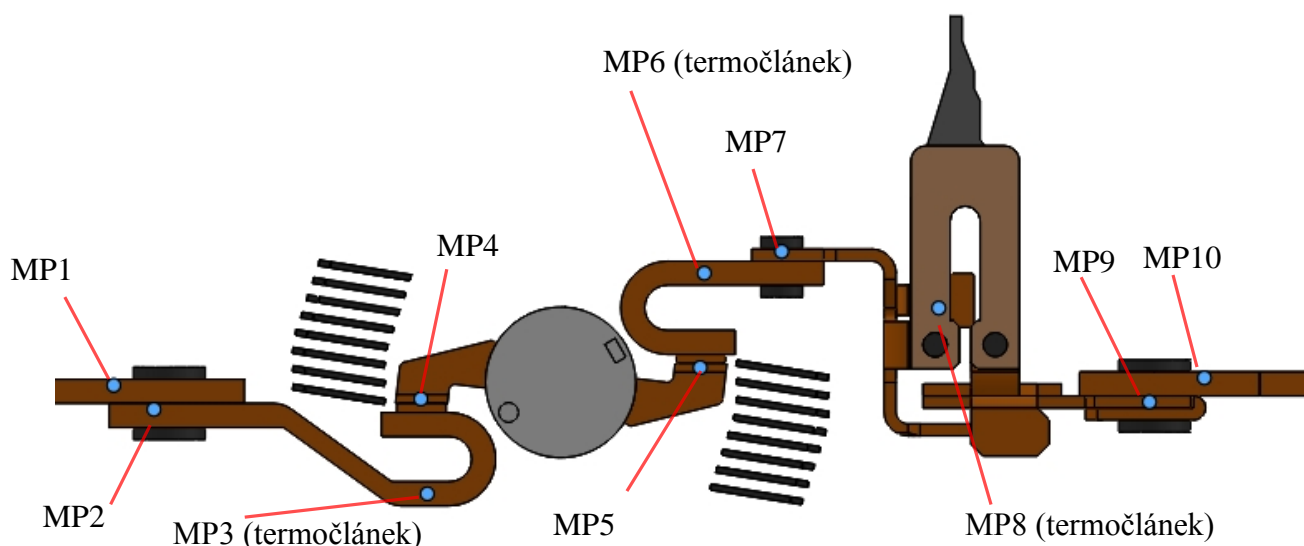
Zkoušky měří oteplovací charakteristiky proudové dráhy jističe pro různé stavy. Na proudové dráze byly umístěny tři termočlánky a další pozice byly připraveny pro odečtení teploty ustáleného stavu dotykovým teploměrem.

4.1 Příprava na oteplovací zkoušky

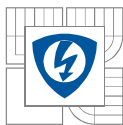
Do jističe bylo nutné nejprve umístit termočlánky. Jeden z nich byl umístěn na bimetal, druhý na proudovou dráhu poblíž vrchního pevného kontaktu a třetí na proudovou dráhu poblíž spodního pevného kontaktu.

Dále byl připraven přístup ke zbývajícím měřicím bodům dotykovým teploměrem, z toho tři bylo nutné navrtat, neboť jsou jinak pod krytem přístroje. Jeden z nich je na horním pohyblivém kontaktu rotoaktivního mechanismu (MP4), druhý na dolním pohyblivém kontaktu rotoaktivního mechanismu (MP5) a třetí je na vnitřní svorce článku s termomagnetickou spouští (MP7).

Jistič byl poté uchycen na stojan a pomocí kabelů nebo pasů příslušných průřezů propojeny jednotlivé póly do série. První a poslední svorka v sérii byla napojena na zdroj proudu. Dle návodu se šrouby na všech svorkách jističe dotáhly momentovým klíčem na 14 Nm. Za pomoci proudové sondy a multimetru byl měřen přesný proud v obvodu z důvodu jeho regulace a nutnosti udržovat na konstantní hodnotě po celou dobu měření. Termočlánky byly připojeny do měřicí ústředny, která se starala o měření a zapisování dat na paměťovou kartu.



Obrázek 4.1) Body uvnitř jističe, ve kterých byla sledována teplota.



Tabulka 4.1) Popis umístění měřících bodů.

Označení měřícího bodu	Popis umístění
MP1	Horní kabelové oko
MP2	Horní svorka
MP3	Poblíž horního kontaktu
MP4	Horní pohyblivý kontakt
MP5	Dolní pohyblivý kontakt
MP6	Poblíž dolního pevného kontaktu
MP7	Svorka článku s termomagnetickou spouští
MP8	Topítko bimetalu
MP9	Dolní svorka
MP10	Dolní kabelové oko

Pozn: (index L značí levý pól jističe, index S značí střední pól jističe a index P značí pravý pól jističe).

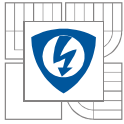
4.2 Oteplení při jmenovitém proudu 125 A

4.2.1 Důvod měření

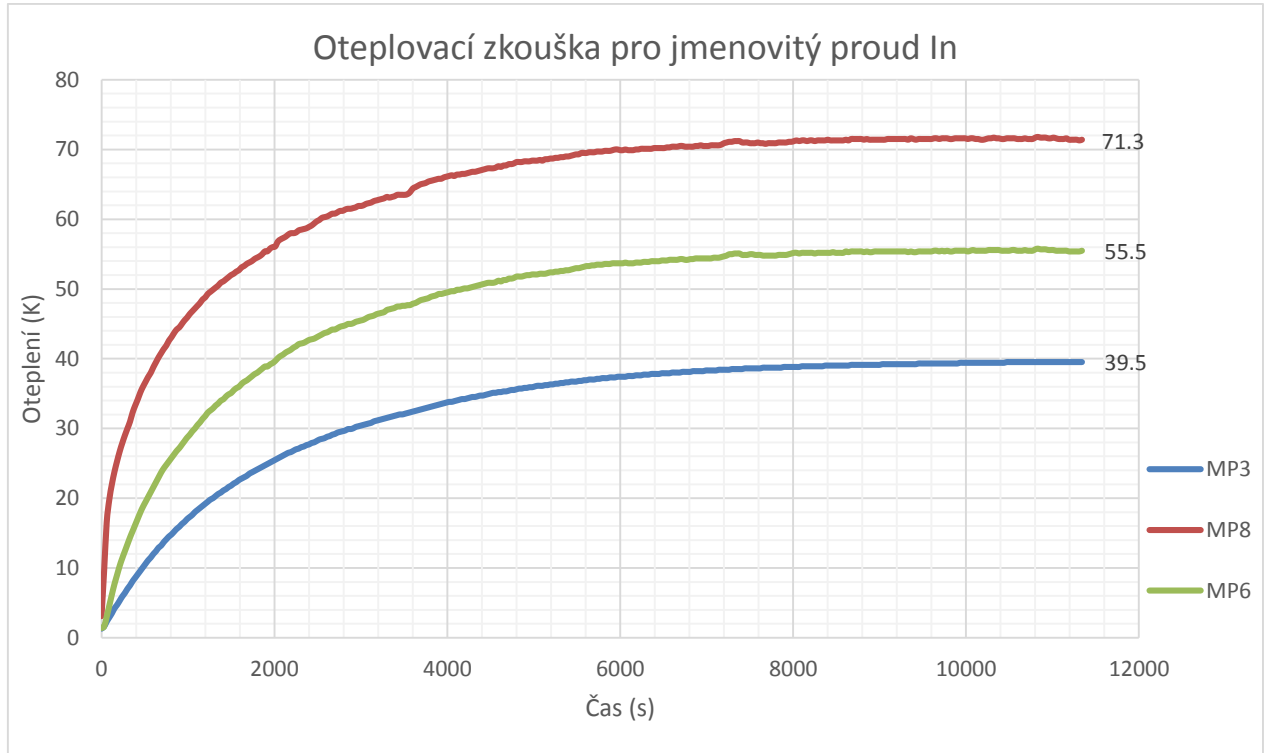
Hodnoty naměřené v oteplovací zkoušce při jmenovitém proudu budou použity k porovnání s hodnotami simulace. Každý jističí přístroj musí být schopný trvale přenášet jmenovitý proud. Nesmí tedy dojít k vybavení tepelné spouště ani v případě, že by byl jistič v provozu při jmenovitém zatížení několik dní nebo týdnů.

4.2.2 Průběh měření

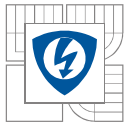
- 1) Na svorky jističe byly připevněny měděné kabely o průřezu 50 mm² a délce 2 metry s očištěnými kabelovými oky.
- 2) Byla odečtena okolní teplota 19°C a na základě korekčního faktoru uvedeného v katalogu výrobce dopočítána odpovídající hodnota proudu, která činila 130 A.
- 3) Na ústředně byl nastaven interval zapisování hodnot 30 s a zapnut záznam.
- 4) Pomocí regulátoru proudového zdroje byl nastaven proud 130 A.
- 5) V průběhu první půlhodiny jej bylo nutné ještě mírně regulovat, neboť se ohřívaly vodivé materiály proudové dráhy jističe a tím klesal jejich odpor.
- 6) Zápis dat byl ukončen ručně po 3 hodinách, protože se za poslední hodinu nezvýšilo oteplení o více než 1 K.
- 7) Před ukončením měření byly odečteny hodnoty v místech připravených pro dotykový teploměr.



4.2.3 Výsledky měření



Obrázek 4.2) Oteplovací zkouška pro jmenovitý proud I_n .



Tabulka 4.2) Hodnoty oteplení změřené dotykovým teploměrem

Označení měřicího bodu	Oteplení
MP1 _L	33,6 K
MP2 _L	34,2 K
MP1 _S	36,0 K
MP2 _S	37,7 K
MP1 _P	33,3 K
MP2 _P	34,1 K
MP4	45,8 K
MP5	52,2 K
MP7	58,0 K
MP9 _L	41,4 K
MP10 _L	41,0 K
MP9 _S	45,3 K
MP10 _S	44,3 K
MP9 _P	41,8 K
MP10 _P	41,2 K

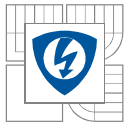
4.2.4 Závěr měření

Z oteplovací zkoušky je patrné, že nejteplejší na celé proudové dráze je bimetal s topítkem. Dosažené oteplení je 71,3 K. Od bimetalu se odvíjí i rozložení teploty na zbývajících částech přístroje. Bimetal vyhřívá spodní kontakt i spodní svorku a proto mají vyšší hodnoty oteplení. Jen na pohyblivých kontaktech je rozdíl 6,6 K. Spodní svorka je pak teplejší o 9,3 K. Termočlánky byly umístěny pouze na jednom pólu, nicméně dotykovým teploměrem byly proměřeny svorky a kabelová oka všech pólů. Teplotní rozdíl mezi prostředním pólem a krajními je na svorkách 3,9 K (střední-levý) resp. 3,5 K (střední-pravý).

4.3 Oteplení při nadproudu 250 A

4.3.1 Důvod měření

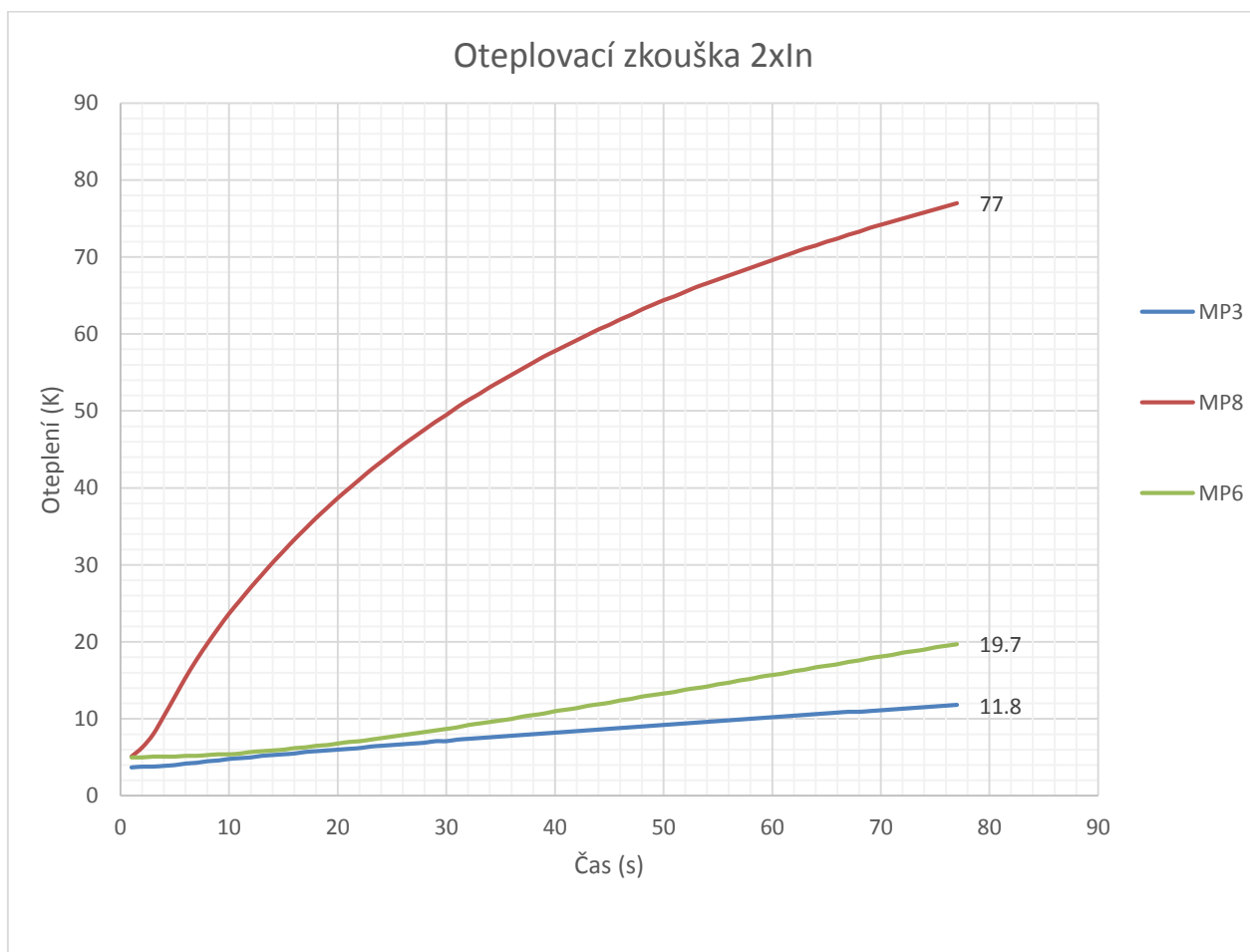
Výsledky měření oteplení při nadproudu budou použity pro porovnání ustáleného oteplení s oteplením, které stoupá výrazně strměji vzhledem k dvojnásobku jmenovitého proudu. Z měření by měly být patrné rozdílné tepelné kapacity a vodivosti různých materiálů proudové dráhy, neboť bimetal se bude ohřívat mnohem rychleji než zbývající dva měřicí body.



4.3.2 Průběh měření

- 1) Na svorky jističe byly připevněny měděné kabely o průřezu 50 mm^2 a délce 2 metry s očištěnými kabelovými oky.
- 2) Byla odečtena okolní teplota 19°C a na základě korekčního faktoru uvedeného v katalogu výrobce dopočítána odpovídající hodnota proudu, která činila 260 A.
- 3) Na ústředně byl nastaven interval zapisování hodnot 1 s a zapnut záznam.
- 4) Pomocí regulátoru proudového zdroje byl nastaven rychle proud 260 A. Rychle proto, neboť se oteplení narůstalo velmi strmě.
- 5) Měření bylo ukončeno vybavením tepelné spouště 77 sekund od přivedení proudu.

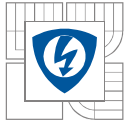
4.3.3 Výsledky měření



Obrázek 4.3) Oteplovací zkouška $2 \times I_n$.

4.3.4 Závěr měření

Během tohoto měření byly použity pouze termočlánky, neboť zakončení nebylo v ustáleném stavu, nýbrž vybavením tepelné spouště, po němž se proudová dráha začala ihned ochlazovat. Odečtené hodnoty z dotykového teploměru by nebyly relevantní. Při dvojnásobku jmenovitého proudu dosáhlo za 77 sekund oteplení bimetalu 77 K, což je o 5,7 K více, než ustálené oteplení



v případě průchodu jmenovitého proudu. Při porovnání hodnot ze zbývajících dvou termočlánků je jasně patrný rozdíl mezi tepelnou kapacitou měděné části proudové dráhy a bimetalové. Zatímco bimetal se za 77 s při dvojnásobku jmenovitého proudu ohřál víc než po dvou hodinách a jmenovitém proudu, u měděných částí proudové dráhy je tomu naopak. Oteplení v případě měřících bodů poblíž pevných kontaktů na proudové dráze vystoupalo na 11,7 K místo 39,5 K resp. 19,7 K namísto 55,5 K.

Vypínací charakteristika [29] uvádí pro $2 \times I_n$ časový rozsah pro vypnutí jističe od 33 do 200 sekund. Naměřená hodnota 77 s je tedy v toleranci.

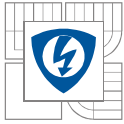
4.4 Oteplení při poníženém jmenovitém proudu 100 A

4.4.1 Důvod měření

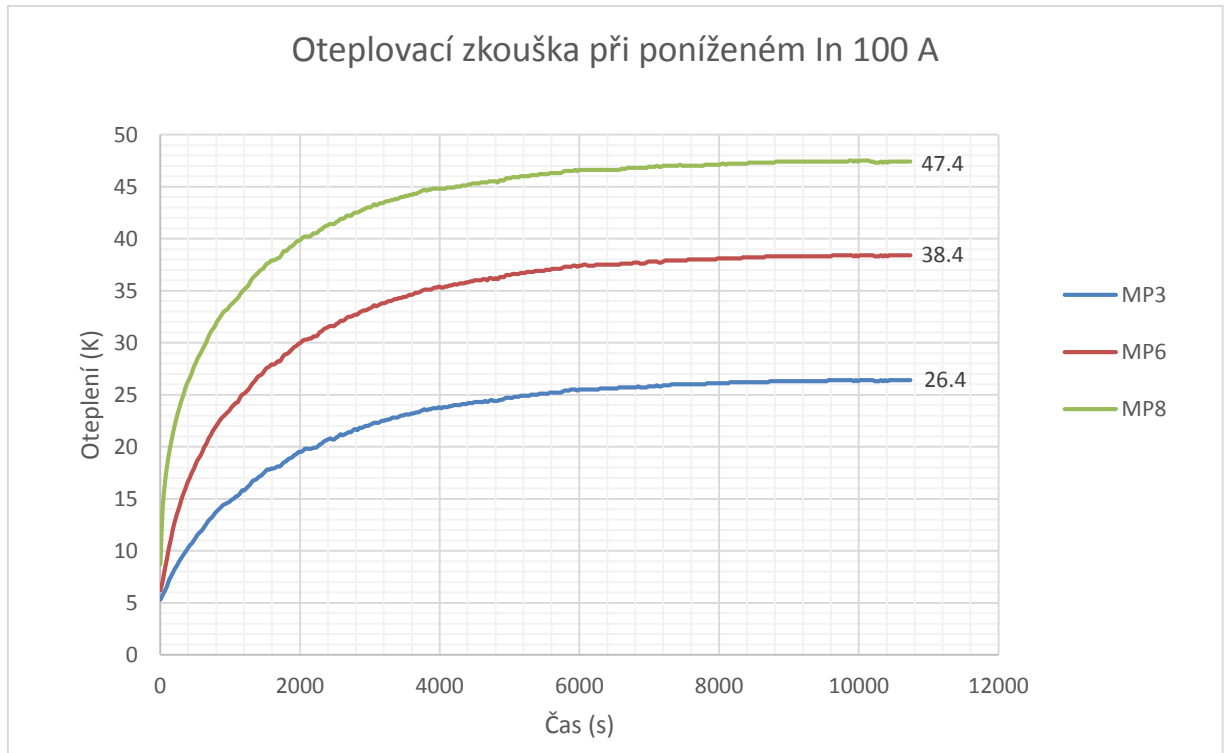
Kompaktní jističe bývají vybaveny možností přizpůsobit si nastavení tepelné a zkratové spouště. Toto měření si bere za cíl změřit ustálené hodnoty oteplení při nastavení na minimum tepelné spouště a získat tak data pro porovnání s nastavením tepelné spouště na maximum.

4.4.2 Průběh měření

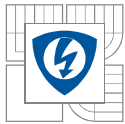
- 1) Na svorky jističe byly připevněny měděné kabely o průřezu 50 mm^2 a délce 2 metry s očištěnými kabelovými oky.
- 2) Tepelná spoušť nastavena šroubovákem na hodnotu 100 A.
- 3) Byla odečtena okolní teplota 20°C a na základě korekčního faktoru uvedeného v katalogu výrobce dopočítána odpovídající hodnota proudu, která činila 105 A.
- 4) Na ústředně byl nastaven interval zapisování hodnot 30 s a zapnut záznam.
- 5) Pomocí regulátoru proudového zdroje byl nastaven proud 105 A.
- 6) V průběhu první půlhodiny jej bylo nutné ještě mírně regulovat, neboť se ohřívaly vodivé materiály proudové dráhy jističe a tím klesal jejich odpor.
- 7) Zápis dat byl ukončen ručně po 3 hodinách, protože se za poslední hodinu nezvýšilo oteplení o více než 1 K.
- 8) Před ukončením měření byly odečteny hodnoty v místech připravených pro dotykový teploměr.



4.4.3 Výsledky měření



Obrázek 4.4) Oteplovací zkouška při poníženém I_n 100 A.



Tabulka 4.3) Hodnoty oteplení změřené dotykovým teploměrem

Označení měřicího bodu	Oteplení
MP1 _L	20,9 K
MP2 _L	21,6 K
MP1 _S	22,0 K
MP2 _S	23,6 K
MP1 _P	20,8 K
MP2 _P	21,8 K
MP4	30,8 K
MP5	35,1 K
MP7	38,3 K
MP9 _L	26,6 K
MP10 _L	25,4 K
MP9 _S	28,9 K
MP10 _S	27,4 K
MP9 _P	26,8 K
MP10 _P	25,8 K

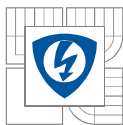
4.4.4 Závěr měření

Při poníženém jmenovitém proudu o 25 % dosahuje oteplení v průměru o 35 % nižší hodnoty. Bimetal je o 23,9 K chladnější, kontakty o 15 K (horní) resp. 17,1 K (dolní) a svorky o 14 K resp. 16 K. K ustálení hodnot došlo stejně jako při jmenovitém proudu 125 A po 3 hodinách měření.

4.5 Oteplení při smluveném nevypínacím a vypínacím proudu

4.5.1 Důvod měření

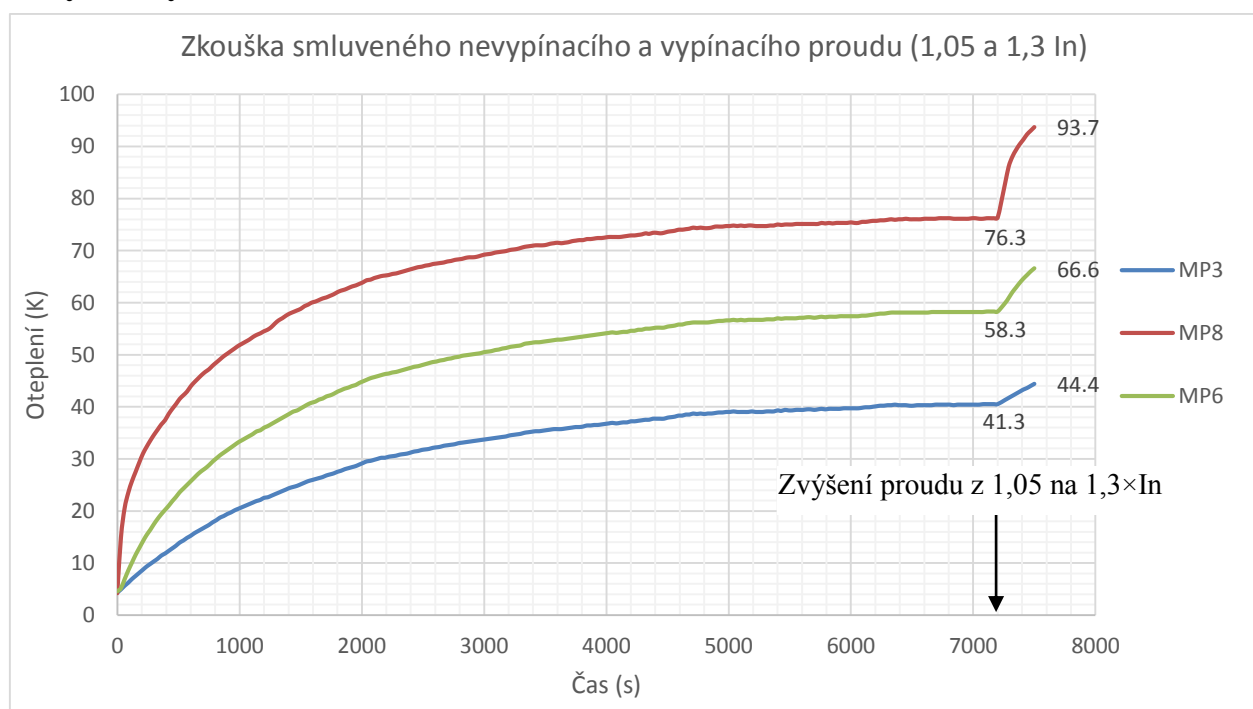
Smluvený nevypínací proud je $1,05 \times I_n$. Při smluveném nevypínacím proudu ze stavu za studena nesmí jistič rozepnout obvod po dobu dvou hodin. Smluvený vypínací proud je $1,3 \times I_n$ – při tomto proudu ze stavu za provozu naopak musí jistič do dvou hodin rozepnout obvod. Toto měření si bere za cíl ověřit smluvený vypínací a nevypínací proud. Mimo času, který je základním parametrem pro tyto provozní stavy, byl zaznamenán průběh oteplení pro porovnání se jmenovitou hodnotou.



4.5.2 Průběh měření

- 1) Na svorky jističe byly připevněny měděné kabely o průřezu 50 mm^2 a délce 2 metry s očištěnými kabelovými oky.
- 2) Byla odečtena okolní teplota 19°C a na základě korekčního faktoru uvedeného v katalogu výrobce dopočítána odpovídající hodnota proudu, která činila 130 A.
- 3) Na ústředně byl nastaven interval zapisování hodnot 30 s a zapnut záznam.
- 4) Pro měření nevypínacího proudu byl nastaven na zdroji 1,05 násobek I_n , tedy 136 A
- 5) V průběhu první půlhodiny jej bylo nutné ještě mírně regulovat, neboť se ohřívaly vodivé materiály proudové dráhy jističe a tím klesal jejich odpor.
- 6) Po dvou hodinách záznamu se zvýšil proud na 1,3 násobek I_n , tedy 169 A
- 7) Měření bylo ukončeno vybavením tepelné spouště jističe po 4,5 minutách.

4.5.3 Výsledky měření

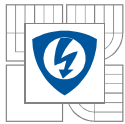


Obrázek 4.5) Zkouška smluveného nevypínacího a vypínacího proudu (1,04 a 1,3 I_n).

4.5.4 Závěr měření

Nevypínací proud $1,05 \times I_n$ oteplil za 2 hodiny bimetál o 76,3 K a další dva měřené body o 58,3 K a 41,3 K. Při porovnání s ustálenou hodnotou oteplení při jmenovitém proudu (71,3 K; 55,8 K a 39,5 K) jde o navýšení o 6,6 %; 4,3% a 4,4 %. Důležitým zjištěním je, že nadproud $1,05 \times I_n$ po dvou hodinách nevypl jistič, byla tedy ověřena smluvená nevypínací hodnota. Následně byl zvýšen proud na $1,3 \times I_n$ a oteplení během 4,5 minut výrazně vzrostlo až na hodnoty 93,7 K; 66,6 K a 44,4 K. Po uplynutí času 4,5 minuty došlo k vybavení jističe tepelnou spouští. Opět lze konstatovat, že zareagováním dříve než za dvě hodiny byla ověřena smluvená hodnota vypínacího proudu.

Vypínací charakteristika [29] uvádí pro $1,3 \times I_n$ časový rozsah pro vypnutí jističe od 300 s do více než 2,5 hodin. Naměřená hodnota 270 s je tedy pod rozsahem. Chyba měření může být dána



tím, že jističem procházel proud nikoliv jmenovitý, ale $1,05 \times I_n$. Oteplení proudové dráhy je konci měření tedy mírně vyšší než při jmenovitém zatížení a tepelná spoušť tedy zareagovala dříve, neboť vyhodnocuje absolutní hodnoty teploty.

4.6 Rozdíl mezi přívodními kabely a pasy

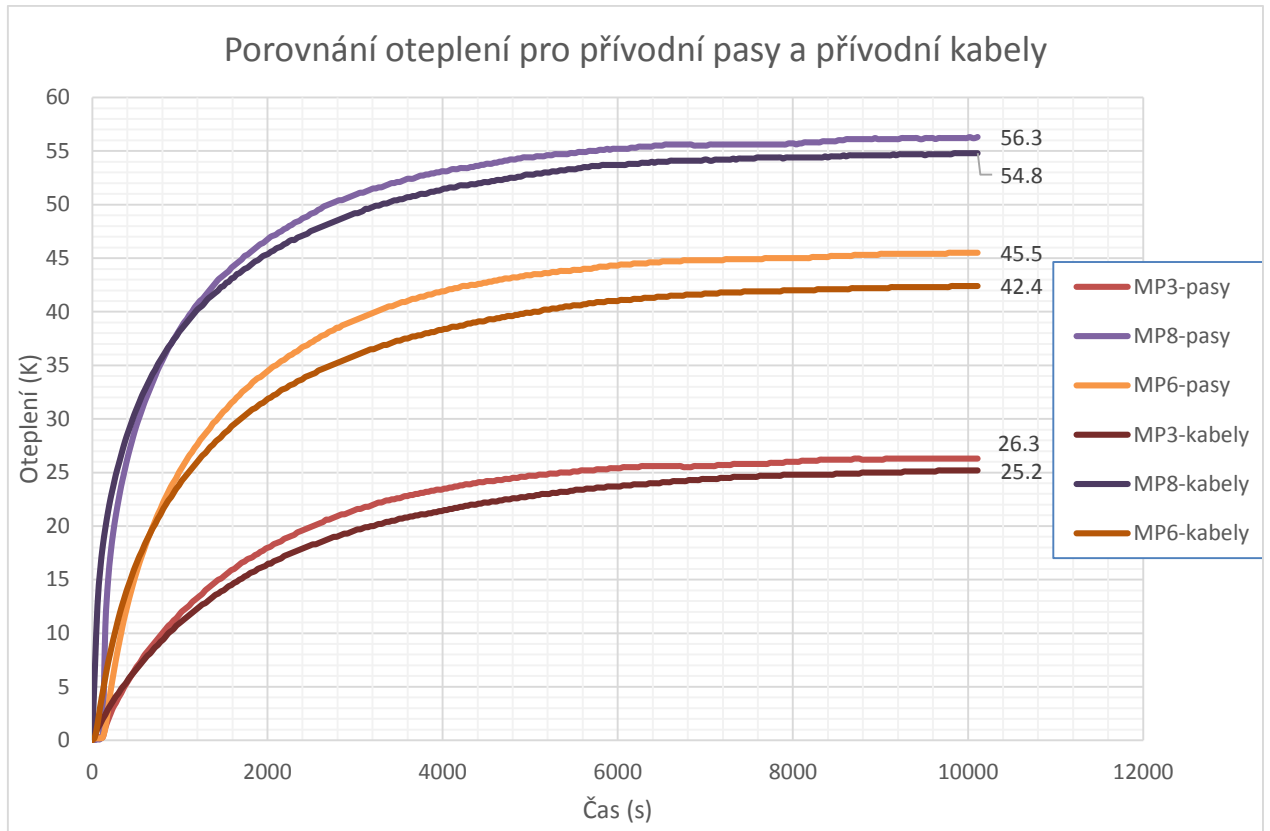
4.6.1 Důvod měření

V rámci simulace je mnohem přesnější pracovat s pásovinami místo kabelů a to hlavně z důvodů samotné podstaty simulování v SolidWorks, kde je výpočetní síť tvořena čtvercovými elementárními oblastmi. Kabely s drátovou výplní proto nejsou ideální. Cílem tohoto měření je tedy dokázat, že je možné porovnávat měření na reálném kusu jističe, který má přívodní kabely, s počítačovým modelem vybaveným pasy o stejném průřezu.

4.6.2 Průběh měření

- 1) Na svorky jističe byly připevněny měděné kabely o průřezu 120 mm^2 a délce 2 metry s očištěnými kabelovými oky.
- 2) Na ústředně byl nastaven interval zapisování hodnot 30 s a zapnut záznam.
- 3) Pomocí regulátoru proudového zdroje byl nastaven proud 125 A.
- 4) V průběhu první půlhodiny jej bylo nutné ještě mírně regulovat, neboť se ohřívaly vodivé materiály proudové dráhy jističe a tím klesal jejich odpor.
- 5) Zápis dat byl ukončen ručně po 3 hodinách, protože se za poslední hodinu nezvýšilo oteplení o více než 1 K.
- 6) Před ukončením měření byly odečteny hodnoty v místech připravených pro dotykový teploměr.
- 7) Druhý den po vychladnutí proběhlo měření na pasovinách průřezu 120 mm^2 a délce 2 metry s očištěnými dotykovými plochami.
- 8) Na ústředně byl nastaven interval zapisování hodnot 30 s a zapnut záznam.
- 9) Pomocí regulátoru proudového zdroje byl nastaven proud 125 A.
- 10) V průběhu první půlhodiny jej bylo nutné ještě mírně regulovat, neboť se ohřívaly vodivé materiály proudové dráhy jističe a tím klesal jejich odpor.
- 11) Zápis dat byl ukončen ručně po 3 hodinách, protože se za poslední hodinu nezvýšilo oteplení o více než 1 K.

4.6.3 Výsledky měření



Obrázek 4.6) Porovnání oteplení pro přívodní pasy a přívodní kabely.

4.6.4 Závěr měření

Rozdíl ustálené hodnoty při použití pasů a kabelů je pro MP8 1,5 K, pro MP6 3,1 K a pro MP3 1,1 K. V procentuálních hodnotách pak odchylka dosahuje hodnot 3-6 %. Vzhledem k výraznému usnadnění výpočtů, které s sebou nese použití vodiče o obdélníkovém průřezu, je tato odchylka akceptovatelná. Při simulacích se bude pracovat s měděnými přívodními pasy o průřezu dle doporučení výrobce – tedy 50 mm².

5 SIMULACE OTEPLENÍ

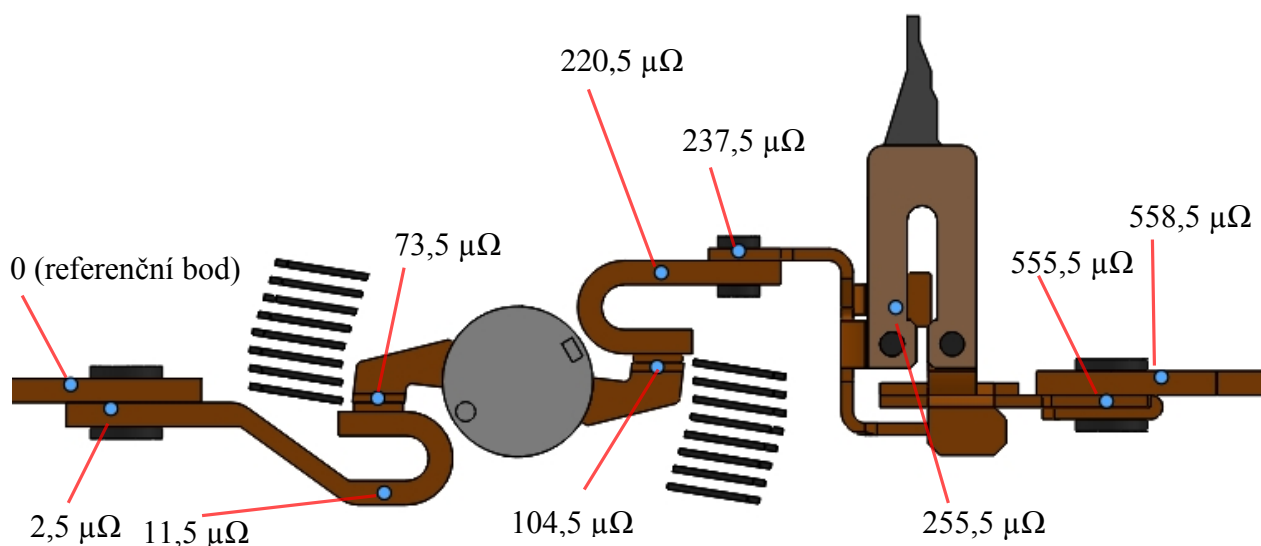
5.1 Přípravy podkladů

Jakmile byl jeden pól jističe sestaven v AutoCADu ve finální podobě, nic nebránilo importování výkresů z DWG do formátu součástí v SolidWorksu. Při importu je třeba nastavit, které vrstvy z modelu v CADu se mají převést, je třeba určit jednotky, ve kterých byly součástky kresleny a po převodu se pustit do samotné práce v SolidWorksu.

Následovalo nastavení simulace, které znamenalo především:

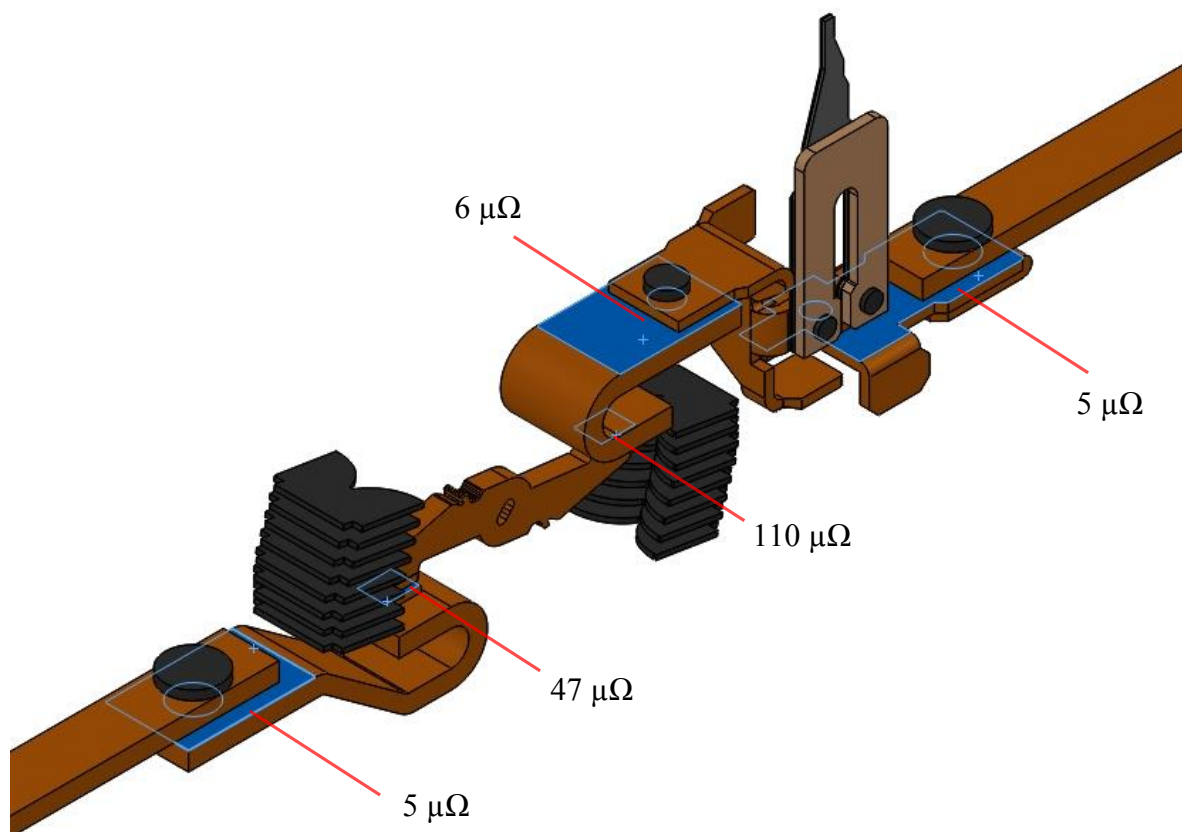
- Výběr externí tepelné analýzy, neboť počítáme se vzduchem laminárně proudícím okolo jističe.
- Určení okolních podmínek jako je gravitace, vlhkost, teplota, tlak apod.
- V potaz je bráno vedení tepla prouděním a sáláním.
- Určení velikosti polygonů sítě.
- Definice materiálů.
- Určení tepelných a elektrických přechodových odporů.

Neznámou jsou elektrické odpory na přechodech mezi pohyblivými a pevnými kontakty, mezi svorkami jističe a kabelovými oky přívodních kabelů. Tyto odpory je však nutné definovat v rámci programu SolidWorks a proto je nezbytné zjistit jejich přesné hodnoty. K jejich zjištění byla proměřena ohmmetrem proudová dráha jističe na několika místech. Od naměřených hodnot byly odečteny hodnoty odporů vodičů a výsledkem je přechodný odpor jističe v daném místě.

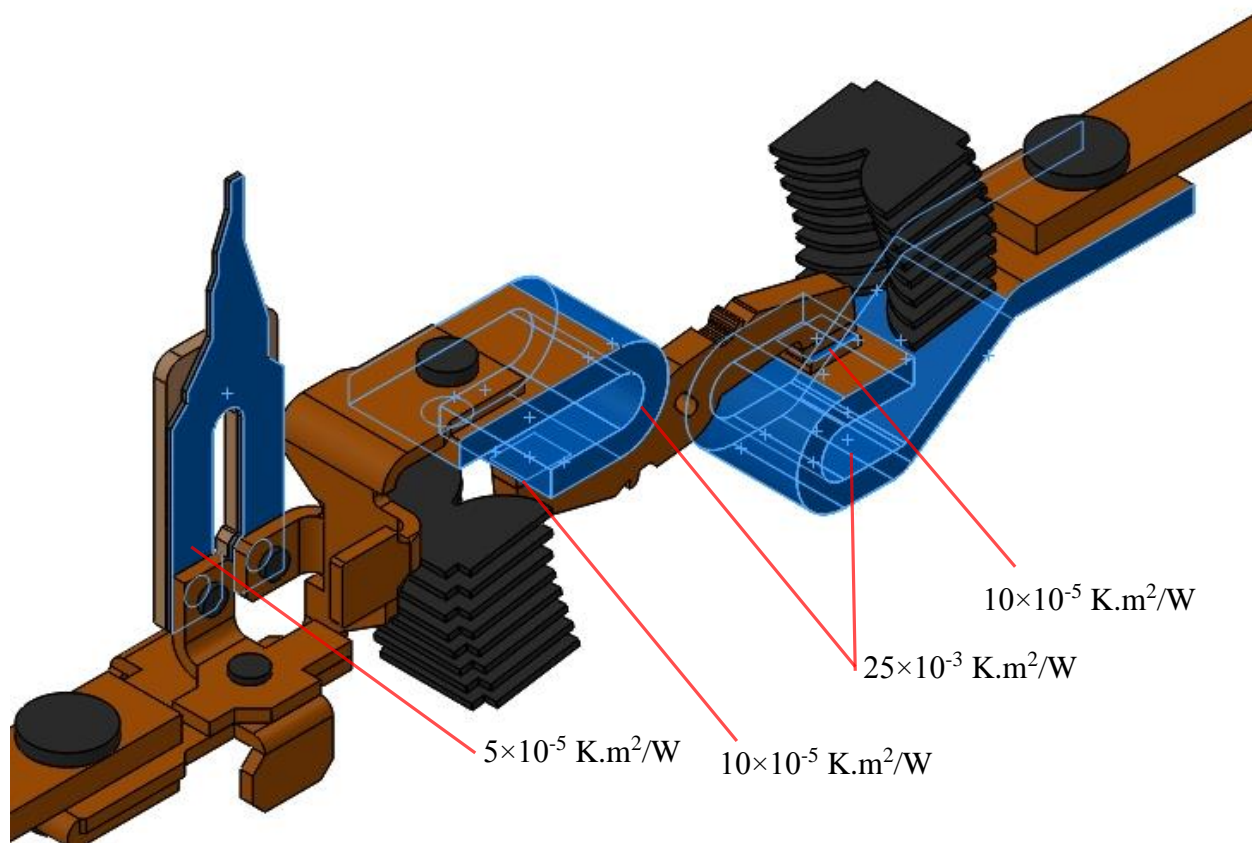


Obrázek 5.1) Změřený odpor proudové dráhy na jednotlivých měřících bodech.

Další neznámou jsou tepelné odpory na přechodech mezi pohyblivými a pevnými kontakty, mezi svorkami jističe a kabelovými oky přívodních kabelů. Tyto tepelné vlastnosti přechodů byly dodefinovány na základě porovnání s měřeními hodnotami.



Obrázek 5.2) Vyznačené plochy, ve kterých byly definovány přechodové elektrické odpory mezi součástkami.



Obrázek 5.3) Vyznačené plochy, ve kterých byly definovány přechodové tepelné odpory mezi součástkami.

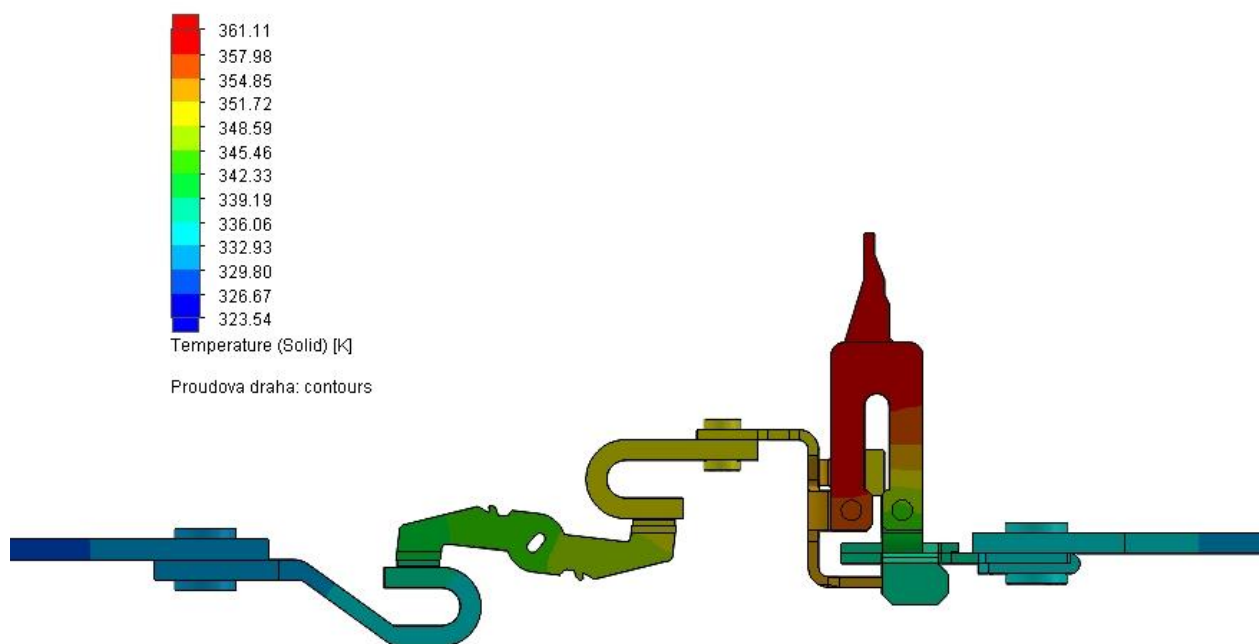
5.1.1 Definice materiálů

Je nezbytné správně nadefinovat materiály, které jsou použity v jističi. Naráží to ovšem na chráněné know-how výrobců. Z toho důvodu byly některé vlastnosti nadefinovány podle střední hodnoty používaných materiálu v praxi. V použitých materiálech závisí především na tepelné vodivosti a elektrické rezistivitě. Ovšem tyto hodnoty jsou proměnné v čase, což je třeba také při výpočtu zohlednit. Podkapitola definice materiálů je vzhledem k svému rozsahu v příloze 8.1.

5.2 Výsledky simulací

V SolidWorksu byly počítány dva druhy simulací. Ustálená hodnota a tranzientní simulace. Z výpočtu ustálené hodnoty pro I_n byly dopočítány přechodové odpory jak elektrické tak tepelné. Časově závislé transientní pak proběhly pro 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14 $\times I_n$ a smluvený vypínací a nevypínací proud.

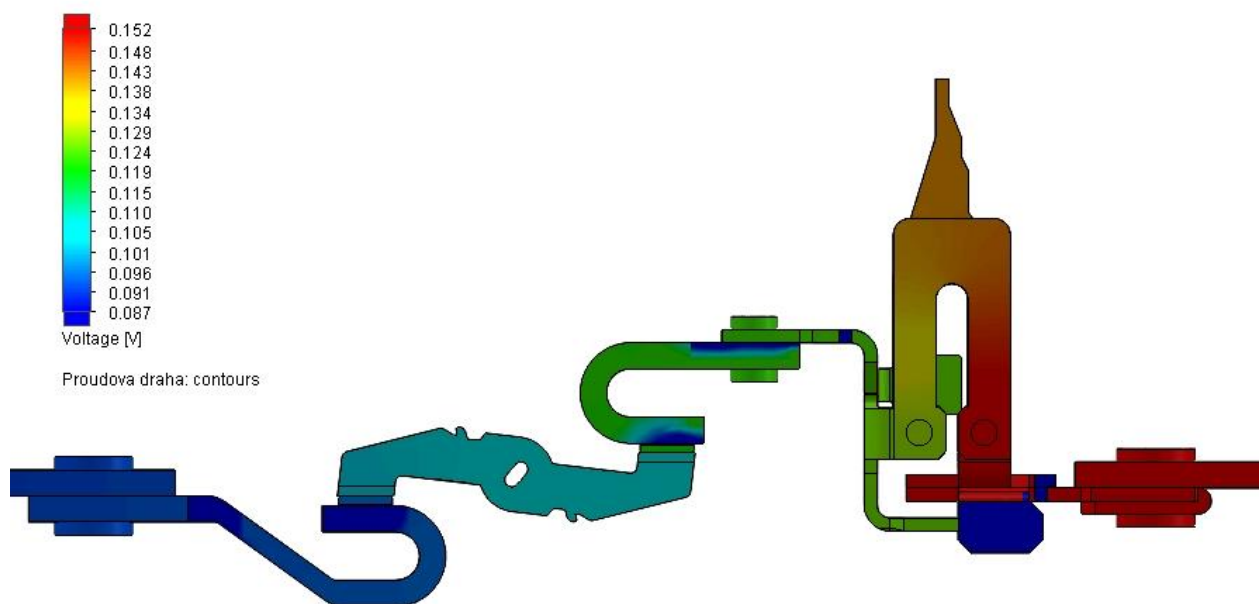
5.2.1 Ustálená teplota při jmenovitém proudu I_n



Obrázek 5.4) Ustálená teplota proudové dráhy jističe při jmenovitém proudu I_n .

Z výpočtu je patrné rozložení teplot na proudové dráze. Topítko a bimetal se zahřívá jednoznačně nejvíce. Díky jejich umístění ve spodní polovině jističe je zřejmý jejich vliv na teplotu okolních součástek. Celá spodní polovina proudové dráhy jističe je teplejší. Bimetal a topítko však nejsou kritickými částmi jističe, byť jsou nejteplejší. Teplota tání mosazi, ze které je vyrobeno topítko, je 1158 K, bimetal má pak teploty 1703 K (invar) a 1728 (nikl). Spojení těchto součástek s proudovou dráhou je pak provedeno ocelovými nýty. Kritickým místem jsou spoje pevných a pohyblivých kontaktů s měděnými pasy použitými v proudové dráze. Tyto spoje dvou kovů jsou provedeny pájením patrně slitinou na bázi SnAg, která má teplotu tání 210-250 °C. Při překročení této teploty může dojít k nevratnému destruktivnímu poškození jističe. Pro další zpracování bude uvažována kritická teplota 500 K.

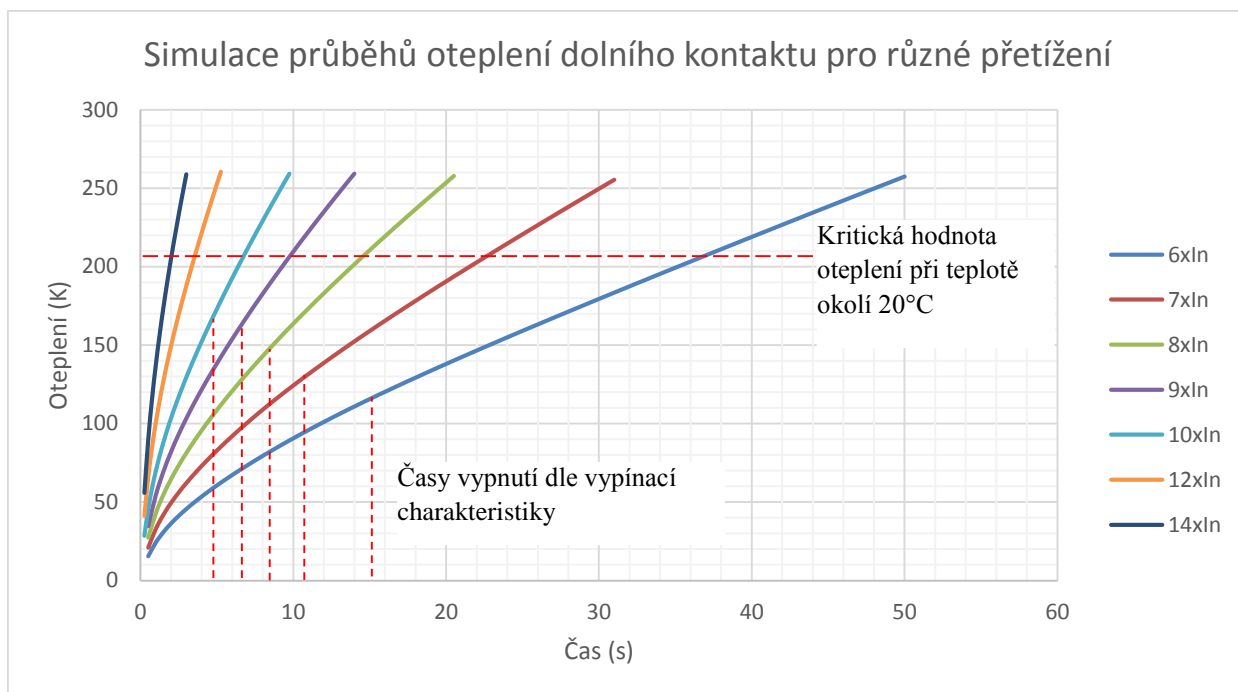
5.2.2 Úbytky napětí na proudové dráze jističe



Obrázek 5.5) Úbytky napětí na proudové dráze jističe.

Při výpočtech úbytkového profilu jističe je jako referenční hodnota považovaná plocha, skrz kterou vstupuje proud do proudové dráhy jističe a tou je začátek dvoumetrového přívodního pasu. U svorky jističe tedy není úbytek napětí 0, ale 87 mV. Tato hodnota byla pro účely zpracování dat dále považována za referenční. Úbytek napětí mezi oběma svorkami jističe je 72 mV. Na obrázku je možné si všimnout oblastí s výrazně nižším úbytkem u kontaktů a spojnice s termomagnetickým článkem. Tyto oblasti se nachází vždy na širších pasech v místech, kde jsou napojeny na užší. Oblasti s nižšími úbytky jsou ty s malou hustotou proudu, neboť těmito oblastmi proud teče blíže středu vodiče. Úbytkový profil je totiž tvořen jako povrchový a nejde jako řez středem proudové dráhy, neboť by tak nebylo možné zobrazit topítko, které je vychýlené z osy. Nižší úbytky mohou být také způsobeny nedokonalostí výpočetní sítě programu.

5.2.3 Výpočty oteplení pro 6-14 násobky I_n v kritickém bodě jističe



Obrázek 5.6) Simulace průběhu oteplení dolního kontaktu pro různé hodnoty přetížení.

Tabulka 5.1) Hodnoty pro různé druhy oteplení dolního kontaktu.

I [A]	t_v [s]	T_v [K]	ΔT_v [K]	T_k [K]	t_k [s]
6x I_n	15.5	411 K	117 K	500	37
7x I_n	10.9	424 K	131 K	500	23
8x I_n	8.3	441 K	148 K	500	15
9x I_n	6.4	454 K	161 K	500	10
10x I_n	4.9	456 K	163 K	500	6.75

- I velikost nadproudu
- t_v čas do vypnutí jističe tepelnou spouští
- T_v teplota v době vypnutí jističe tepelnou spouští
- ΔT_v oteplení v době vypnutí jističe tepelnou spouští
- T_k kritická teplota
- t_k čas do dosažení kritické teploty

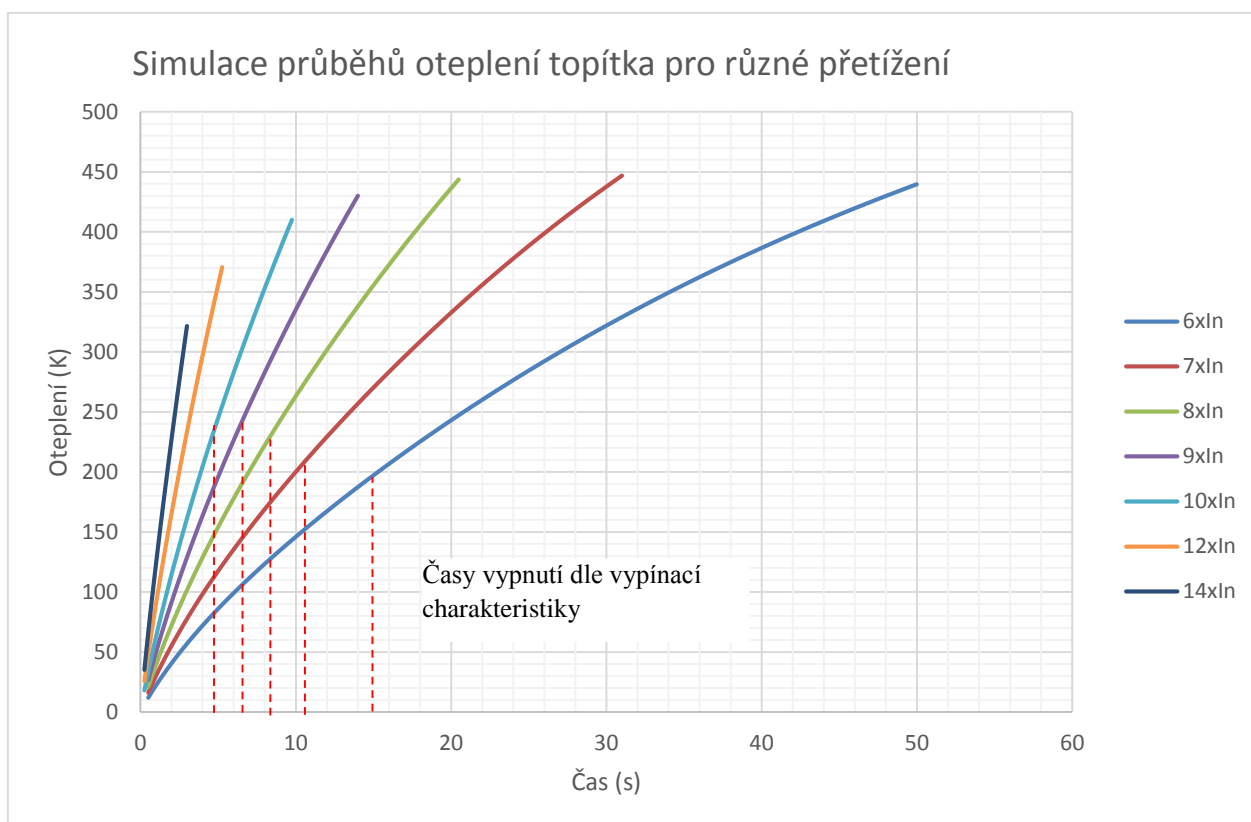
Kritickým bodem jističe je dolní kontakt na rotoaktivním mechanismu. Z dat simulací byly tedy tento měřicí bod (MP5) zpracovány vypočtené hodnoty oteplení pro různá přetížení. Do grafu



byly zaznamenány časové hodnoty vybavení tepelné spouště z vypínací charakteristiky pro příslušné hodnoty přetížení. Dále byla do grafu zanesena kritická hodnota oteplení, po jejíž překonání může dojít k zničení spoje mezi kontaktem a měděnými vodiči proudové dráhy jističe. Hodnoty pro $6-10 \times I_n$ jsou dále zpracovány v tabulce, neboť tyto hodnoty nadproudů mohou být vypínány také zkratovou spouští. Rozsah zkratové spouště je právě $6-10 \times I_n$.

Pokud by při $10 \times I_n$ nezareagovala zkratová spoušť a na tepelné byla porucha, došlo by k dosažení kritické teploty a riziku nenávratného poškození jističe po 6,75 s působení tohoto proudu. V případě, že by se tepelná spoušť zpozdila při tomto proudu jen o 1,85 s, kritické teploty by na kontaktu bylo dosaženo také.

Pro $9 \times I_n$ je kritické teploty dosaženo po 3,6 s od případného zpoždění tepelné spouště. Pro $8 \times I_n$ je tento čas 6,7 s, pro $7 \times I_n$ 12,1 s a pro $6 \times I_n$ 21,5 s.



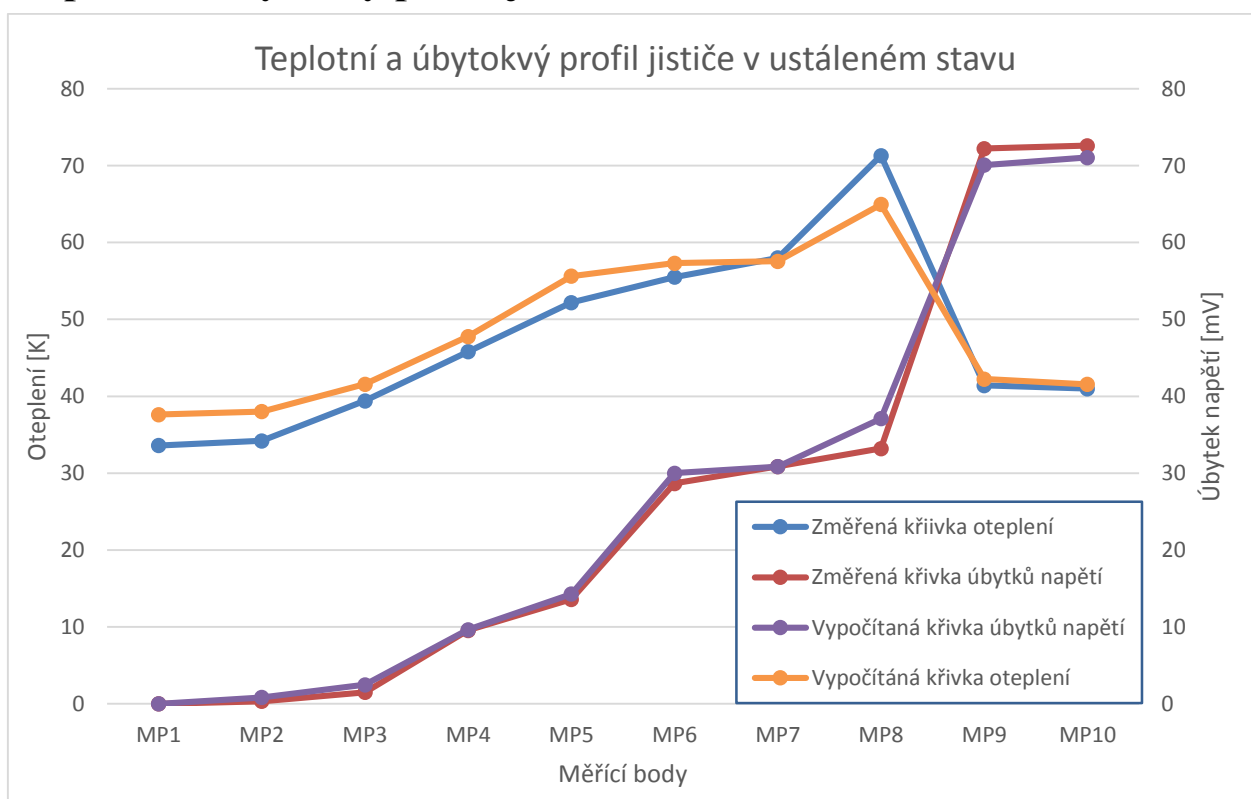
Obrázek 5.7) Simulace oteplení topítka pro různé hodnoty přetížení.

Pro ilustraci byl vytvořen stejný graf pro topítka, které je nikoliv nejkritičtější místo z měřených bodů, ale nejteplejší. Kritická teplota pro topítka je teplota tání mosazi, tedy 1172 K. Vypočítané hodnoty ji zdaleka nedosahují. V grafu byly zachovány časové svivlice reprezentující dobu vybavení tepelné spouště pro daný násobek jmenovitého proudu. Topítka se během krátké doby, kdy jim prochází proud, oteplí v průměru o 80 K víc než spodní kontakt jističe. Je to dáno především snížením průřezu proudové dráhy od svorky článku s termomagnetickou spouští a vysokou tepelnou vodivostí mosazi i materiálů bimetalu.

6 ROZBOR VÝSLEDKŮ

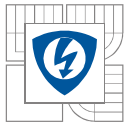
Rozbor výsledků je proveden i v předchozích dvou kapitolách samostatně pro měření a výpočty. Tato kapitola slouží pouze k rozboru výsledků, který vznikne porovnáním měřených a vypočtených hodnot a především pak k teplotnímu a úbytkovému profilu jističe z hodnot v ustáleném stavu.

6.1 Teplotní a úbytkový profil jističe



Obrázek 6.1) Teplotní a úbytkový profil jističe.

Horní polovina jističe MP1-MP5 má úbytek napětí při jmenovité hodnotě I_n 15 mV, přičemž spodní část především pak díky dvěma přechodovým odporům a tepelné spoušti 57 mV. Podobný, avšak ne tak razantní nárůst je i v případě oteplení, které se pohybuje od 35 K po 71 K. Největším zdrojem tepla jsou Jouleovy ztráty na topítku a bimetalu. Tyto ztráty pak vyhřívají okolní součástky, a také proto je spodní polovina jističe teplejší než horní.



Tabulka 6.1) Hodnoty teplotního profilu jističe.

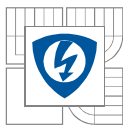
Měřicí bod	Oteplení simulováno	Oteplení změřeno	Odchylka
	K	K	%
MP1	37.62	33.6	11
MP2	38.02	34.2	10
MP3	41.57	39.5	5
MP4	47.79	45.8	4
MP5	55.63	52.2	6
MP6	57.32	55.5	3
MP7	57.57	58	1
MP8	64.96	71.3	10
MP9	42.25	41.4	2
MP10	41.56	41	1

Vypočítaný teplotní profil jističe je zatížen maximální chybou 11 % u MP1. MP1 je svorka kabelového oka v případě měření a v případě simulace jde o bod na přívodním pasu. Další odchylka 10 % je na svorce jističe. Jde o body, které jsou na kraji jističe, a odchylka je patrně způsobená použitím rozdílných přívodních vodičů. Při porovnání přívodních kabelů a pasů proběhlo pouze porovnání termočlánků uvnitř jističe. Hodnoty oteplení uvnitř jističe jsou tedy více směrodatné. Zde se odchylka pohybuje do 6 % s výjimkou topítka (MP8). Materiál topítka byl zvolen z mosazi a při pokusech změny na bronz s větší tepelnou vodivostí došlo k nárůstu oteplení až o 30 K v ustálených hodnotách a hodnota odchylky u MP8 pak dosahovala dvojnásobku. Výrobce patrně použil určité příměsi do mosazi nebo bronzu s teplotními vlastnostmi topítka mezi těmito materiály.

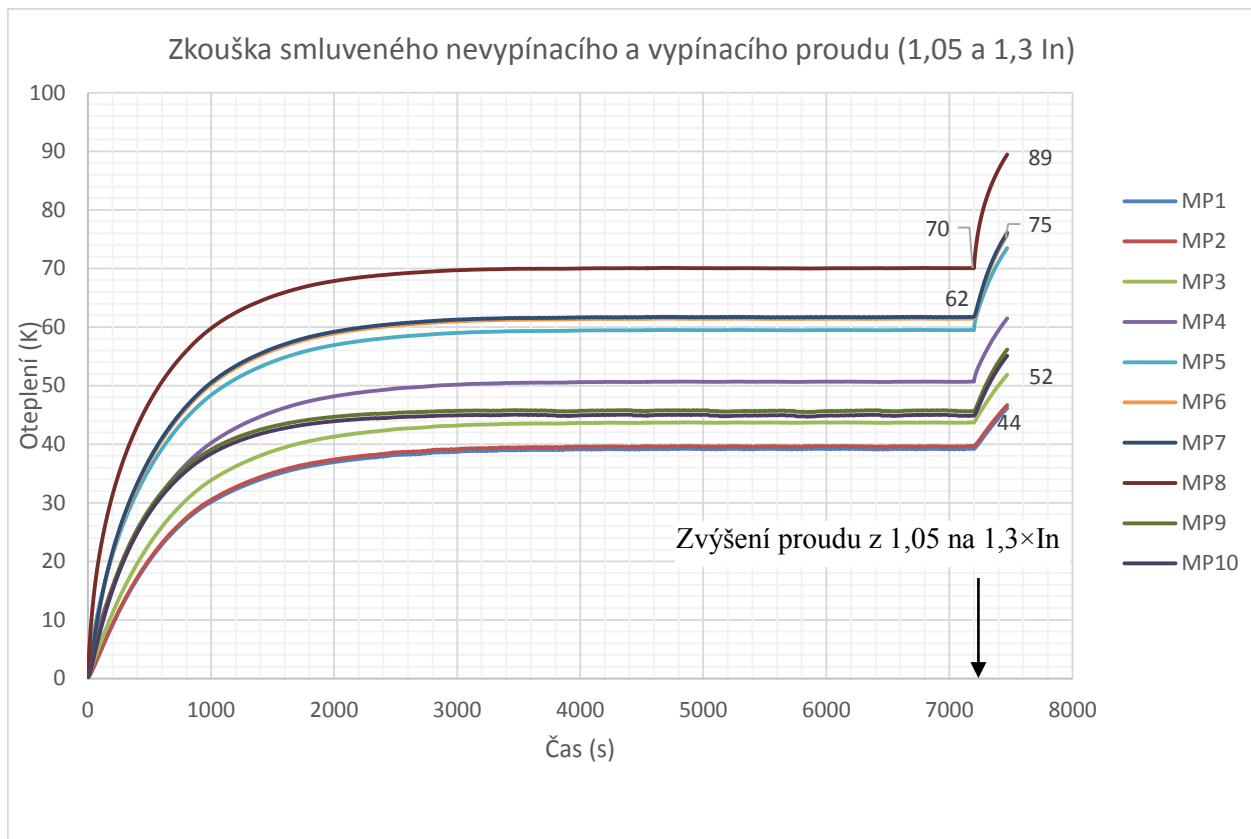
Tabulka 6.2) Hodnoty úbytkového profilu jističe.

Měřicí body	Úbytek měřený	Úbytek vypočítaný	Odchylka
	mV	mV	%
MP1	0.00	0	0
MP2	0.33	0.82	153
MP3	1.50	2.48	66
MP4	9.56	9.64	1
MP5	13.59	14.27	5
MP6	28.67	30.00	5
MP7	30.88	30.85	0
MP8	33.22	37.10	12
MP9	72.22	70.09	3
MP10	72.61	71.06	2

Zanedbáme-li odchylky v řádu stovek mikrovoltů hned za svorkou, dostáváme se opět k situaci, kdy největší odchylka je na topítku. Lze tedy potvrdit domněnku, že topítko je z materiálu, ve kterém jsou příměsi měnící jeho tepelné a elektrické vlastnosti. Odchylka zde dosahuje 12 % v porovnání s maximálně 5 % v jiných měřicích bodech proudové dráhy jističe.



6.1.1 Zkouška smluveného nevypínacího a vypínacího proudu



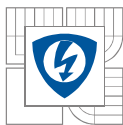
Obrázek 6.2) Výpočet smluveného vypínacího a nevypínacího proudu.

Tranzientní tedy teplotně závislé výpočty jsou obtížně porovnatelné s měřením, neboť definice přechodových odporů vychází z ustáleného stavu a tyto přechodové odpory odpovídají přechodovým odporům v reálu pouze pro ustálený stav. Ve skutečnosti jsou pak teplotně závislé a mění tak svůj odpor v průběhu oteplovací zkoušky. Všechny ostatní materiály s výjimkou kontaktů mají zohledněnou křivku teplotní závislosti odporu při výpočtech. Toto tvrzení je podloženo následujícími tabulkami pro smluvený vypínací a nevypínací proud.

První tabulka reprezentuje ověření smluveného nevypínacího proudu $1,05 \times I_n$ po dvou hodinách provozu. Hodnoty oteplení se blíží ustáleným hodnotám a odchylky jsou o 6 do 8 %. Druhá tabulka pak reprezentuje ověření smluveného vypínacího proudu $1,3 \times I_n$, kde dojde k oteplení výrazně nad ustálenou hodnotu. Ochylky se zde pohybují až k 17 %.

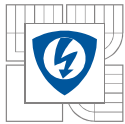
Tabulka 6.3) Porovnání hodnot smluveného nevypínacího proudu.

Měřicí body	Oteplení simulováno	Oteplení měřeno	Odchylka
	K	K	%
MP8	70	76.3	8
MP6	62	58.3	6
MP3	44	41.3	7



Tabulka 6.4) Porovnání hodnot smluveného vypínacího proudu.

Měřicí body	Oteplení simulováno	oteplení měřeno	odchylka
	K	K	%
MP8	89	93.7	5
MP6	75	66.6	13
MP3	52	44.4	17



7 PRÁCE DO BUDOUCNA

Při simulaci bylo přijato několik opatření, po jejichž odstranění by bylo možné dosahovat přesnějších výsledků. Jsou jimi především zjednodušení při modelování a výpočet elektrické a tepelné rezistivity. Cestou odstranění těchto zjednodušení by mohlo být téma dále zpracovááno. Velkou výzvou v rámci navázání na tuto práci by mohla být analýza dynamických stavů jističe.

7.1 Zjednodušení při modelování

7.1.1 Použití jednoho pólu třífázového jističe.

Při zpracování tohoto tématu byl použit pouze jeden pól jističe. Pro korektní simulaci jističe by bylo třeba použít všech tří pólů, neboť prostřední pól je zahříván více než krajní. Simulace nebyla prováděna na všech třech pólech z důvodu náročnosti na systémové prostředky.

7.1.2 Vyjmutí určitých částí jističe z modelu

Páka, kompletní systém hlavních pružin, západka, plastové a gumové části nutné pro propojení rotoaktivního mechanismu pohyblivých kontaktů s pákou a další drobné části. Tyto součástky nemají velký vliv na proudění uvnitř jističe. Bylo nutné je odstranit kvůli snížení nároků na systémové prostředky při výpočtu. Z 62 namodelovaných objektů tak zůstalo pro simulaci jen 38.

7.1.3 Tepelně závislé přechodové odpory

Veškeré materiály použité v jističi jsou teplotně závislé a SolidWorks má k dispozici jejich křivku změny vlastností v závislosti na teplotě a počítá s ní. Výjimku tvoří kontakty a přechodové odpory – ty jsou totiž definovány pro ustálený stav a při výpočtech tak mají konstantní vlastnosti. Tranzientní simulace v současném stavu není možné provádět s velkou přesností. Pokud by se podařilo získat definovat křivku teplotního, elektrického odporu kontaktů a přechodových odporů v závislosti na čase, bylo by možné provádět i transientní výpočty přesně.

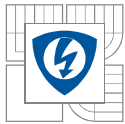
7.2 Výpočet parametrů proudové dráhy

V současné simulaci byly přechodové elektrické odpory kontaktů dopočítány na základě měření. Z hlediska využití výpočtů ve vývojové fázi návrhu jisticích přístrojů je to však nepraktické, proto by bylo vhodné provést i numerický výpočet tepelné a elektrické rezistivity. Pro tento účel by bylo nezbytné zjistit materiálové konstanty především kontaktních materiálů, výrobci si je budou však patrně chránit jako know-how. Dle odborného článku *Advanced Thermal Simulation of a Circuit Breaker*[9], je docíleno velké přesnosti při použití následujícího výpočtu.

7.2.1 Elektrická rezistivita kontaktů

S cílem najít elektrickou rezistivitu kontaktů, nutně musí být vyjádřen poloměr pružně deformované oblasti kontaktů:

$$a_e = \sqrt[3]{\frac{3}{4} F_K \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)} \quad (1)$$



Kde F_K je přítláčná síla kontaktů, E_i je modul pružnosti, μ_i je Poissonův poměr, r_i je poloměr kontaktní plochy. Poloměr a_e následně poslouží k výpočtu rezistivity kontaktů.

$$R_E = \frac{\bar{\rho}}{2a_e} \quad (2)$$

Kde $\bar{\rho}$ značí průměrnou elektrickou rezistivitu mezi dvěma rozdílnými materiály.

Elektrická rezistivita kontaktů na vstupních a výstupních svorkách se vypočítá

$$R_E = \frac{C_\rho}{F_K^m} \quad (3)$$

Kde C_ρ je konstanta závislá na kontaktních materiálech a m je exponent, který závisí na tvaru kontaktů.

7.2.2 Tepelná rezistivita

Tepelné rezistivity se vypočítají na základě elektrických rezistivit podle tohoto vzorce

$$R_T = \frac{R_E}{\bar{\rho}\bar{\lambda}} \quad (4)$$

Kde $\bar{\lambda}$ značí průměrnou tepelnou vodivost v kontaktu dvou rozdílných materiálů.

Podle výzkumu [14] musí být tepelná konduktivita v kontaktu vynásobena konstantou 2,1 z důvodu počítání s tepelnou vodivostí vzduchu v okolí kontaktu.

7.2.3 Joulovy ztráty

Proud procházející vodičem způsobuje Jouleovy tepelné ztráty, které odpovídají

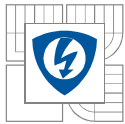
$$P = R_E I^2 \quad (5)$$

Toto teplo způsobuje oteplení vodivých částí. Teplo je v případě vodivých částí jističe přenášeno vedením a zářením.

7.3 Přejímové děje analýza chování elektrického oblouku

Na zcela jinou úroveň by práci mohla posunout analýza dynamických stavů jističe při vypínání a zapínání. Především pak analýza elektrického oblouku.

Elektrický oblouk je stále velká neznámá i přes snahu mnoha vědeckých týmů. Existují numerické metody k výpočtu chování elektrického oblouku v jističích. Ty jsou ovšem na bázi optického záznamu [15], [16], který je dvourozměrný, nebo výpočtové metody taktéž ve dvou dimenzích [17]. Co se trojrozměrných modelů a výpočtů týče, vědeckých prací na toto téma značně ubývá a právě to je téma, které patrně zajímá momentálně výrobce nejvíc. Konkrétně EATON toto téma opakovaně nabízí doktorandům z FEKTu ke spolupráci na zpracování.



8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvořit model jističe NZBM2 s materiálovými vlastnostmi odpovídajícími reálnému přístroji, provést na tomto modelu výpočty oteplení a úbytkový profil jističe. Vypočtené hodnoty doplnit o měřené a provést jejich porovnání a rozbor. Praktická část diplomové práce se tedy dá rozdělit na dvě hlavní části. První z nich je práce v laboratoři, jejíž výstupem byly změřené oteplovací zkoušky, a druhou částí je práce v 3D modelovacím a výpočetním softwaru.

Před samotným měřením v laboratoři bylo nutné přístroj patřičně připravit a vybavit termočlánky a otvory pro měření dotykovým teploměrem. Oteplovací zkoušky probíhaly s různou modifikací přípojného systému, hodnotou proudu i vlastního nastavení přístroje. Výsledky z měření včetně závěrů jsou v kapitole 4. Důležité poznatky z měření:

- Při použití přívodních pasů namísto kabelů stejného průřezu dochází k chybě 3-6 %
- Snížení jmenovitého proudu o 25 % znamená zmenšení oteplení v průměru o 35 %
- Spodní kontakt jističe je díky blízkosti bimetalu o 6,6 K teplejší než horní kontakt
- Při I_n se za 2 hodiny oteplí bimetál o 71,3 K, při $2 \times I_n$ za 77 sekund o 77 K

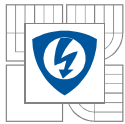
Výpočtové části práce předcházela příprava trojrozměrného modelu. Ten je složen z 62 objemových součástek namodelovaných dle reálného přístroje. Bylo nezbytné správně definovat jednotlivé materiály proudové dráhy a šasi, nastavit elektrické přechodové odpory a tepelné přechodové odpory. Elektrické odpory se pohybovaly v rozmezí 5-110 $\mu\Omega$ a tepelné od 5×10^{-5} do 25×10^{-3} K.m²/W. V takto přípravném modelu se vytvořila výpočetní síť, která obsahovala 176148 výpočetních oblastí, a mohl být proveden výpočet pro různé provozní stavy. Výsledky výpočtů včetně závěrů jsou v kapitole 5. Důležité poznatky ze simulací:

- Napěťový úbytek mezi svorkami je při I_n 72 mV
- Teplota uvnitř jističe se mezi jednotlivými měřicími body při I_n liší až o 40 K
- Kritické místo je na dolním kontaktu
- Pokud by nedošlo k zareagování tepelné nebo zkratové spouště, tak by se na spodním kontaktu objevila kritická teplota 500 K (teplota tání spoje slitiny na bázi SnAg) při $6 \times I_n$ za 37 s, při $7 \times I_n$ za 23 s, při $8 \times I_n$ za 15 s, při $9 \times I_n$ za 10 s a při $10 \times I_n$ za 6,75 s.

Měřené hodnoty byly následně porovnány s výsledky simulací a popsány v kapitole 6. Důležité poznatky:

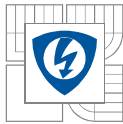
- Odchylka oteplení je uvnitř jističe 1-5 % s výjimkou topítka, kde je 10 %
- Odchylka úbytků napětí uvnitř jističe je 1-5 % s výjimkou topítka, kde je 12 %
- Odchylka pro neustálené hodnoty je až 17 % - vysvětlení je níže

V kapitole 7 je naznačeno několik možných směrů, kterými by se mohla práce v budoucnu ubírat. Jde především o definování kontaktních a přechodových odporů nejen pro ustálený stav, aby bylo možné provádět tranzientní simulace. Zpřesnění simulace by pomohlo využití všech tří pólů jističe a zanedbávaných částí pro výpočty, to by ovšem vyžadovalo dedikované výpočetní servery. Další možnou cestou by bylo zaměření se na přechodové stavy zapínání a vypínání především pak v souvislosti s elektrickým obloukem a jeho účinky.

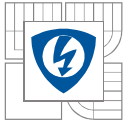


LITERATURA

- [1] ČSN ISO 60898. *Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [2] ZScanner 800 Tearsheet. *ZCorporation* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://www.zcorp.com/documents/182_ZScanner800-tearsheet-v05wb.pdf
- [3] CSANYI, Edvard. MCB – Miniature Circuit Breaker Construction. *Electrical engineering portal*[online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/mcb-miniature-circuit-breaker-construction>
- [4] ŠTĚPÁN, František. Jističe určené pro laickou obsluhu. *Moeller Elektrotechnika s.r.o.* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/jistice-urcene-pro-laickou-obsluhu>
- [5] DOSTÁL, Lukáš. Simulace nadproudové spouště jističe. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 43 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.
- [6] INSTITUT OF ELECTRICAL ENGINEERS. *Power circuit breaker theory and design*. Londýn: Peter Peregrinus Ltd., 1985. ISBN 0-906048-70-2.
- [7] VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A ELEKTROTECNICKÁ V PLZNI. *Konstrukce elektrických přístrojů 1. díl*. Plzeň 1966: ediční středisko VŠSE.
- [8] VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A ELEKTROTECNICKÁ V PLZNI. *Konstrukce elektrických přístrojů 2. díl*. Plzeň 1966: ediční středisko VŠSE.
- [9] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Mechanika pro silnoproudou elektrotechniku a elektroenergetiku*. Brno 2000: VUITIUM. ISBN 80-214-1662-9.
- [10] FREI, P.U. a H.O. WEICHERT. Advanced thermal simulation of a circuit breaker. In: *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts, 2004*. 2004. DOI: 10.1007/springerreference_10019.
- [11] Electrical Circuit Breaker: Operation and Types of Circuit Breaker. Online Electrical Engineering Study Site [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://electrical4u.com/electrical-circuit-breaker-operation-and-types-of-circuit-breaker/>
- [12] Koordinace jisticích přístrojů nn: Selektivita a kaskádování. In: [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://www.schneider-electric.cz/documents/designers/top-downloads/kaskadovani_selektivita.pdf
- [13] Moulded Case Circuit Breakers (MCCB). In: *Study electrical* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.studyelectrical.com/2015/01/moulded-case-circuit-breakers-mccb.html>
- [14] PAULKE; STEINHAUSER; WEICHERT; *Simulation of contact spots*, in Proceedings of the 21st International Conference on Electrical Contacts, Zurich, 2002, pp. 388–393
- [15] AL-AMAYREH, Malik I., Harald HOFMANN, Ove NILSSON, Christian WEINDL a Antonio R. DELGADO. Arc Movement Inside an AC/DC Circuit Breaker Working With a Novel Method of Arc Guiding: Part II—Optical Imaging Method and Numerical Analysis. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2012, vol. 40, issue 8, s. 2035–2044. DOI: 10.1109/tps.2012.2200698.
- [16] DEGUI, Chen, Liu HONGWU, Li ZHIPENG, Li XINGWEN a Hongtae PARK. Experimental investigation on arc motion of MCCB with different configurations of arc chamber using optical fiber measurement system. *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts, 2004*. 2004. DOI: 10.1109/holm.2004.1353139.



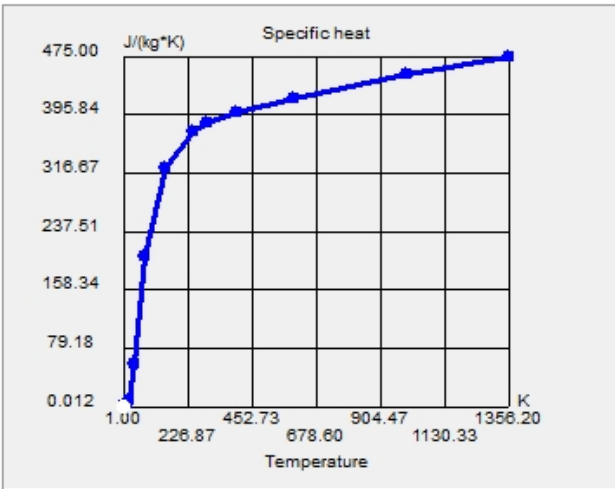
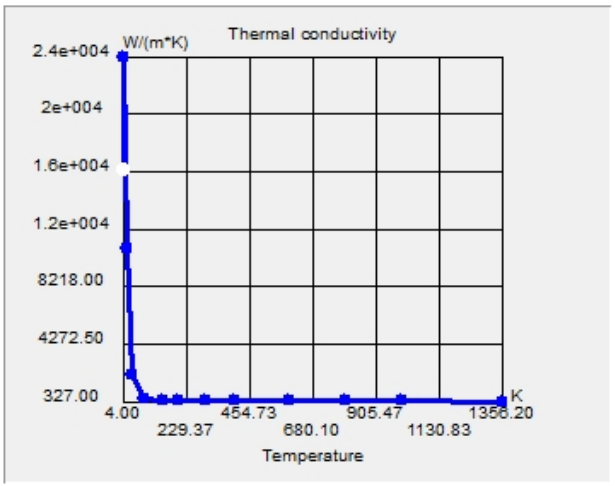
-
- [17] WU, Yi, Mingzhe RONG, Zhiqiang SUN, Xiaohua WANG, Fei YANG a Xingwen LI. Numerical analysis of arc plasma behaviour during contact opening process in low-voltage switching device. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007, vol. 40, issue 3, s. 795-802. DOI: 10.1088/0022-3727/40/3/016.
- [18] EATON. *Výkonové jističe* [Katalog]. 2009-2010. Dostupné z:
http://www.eatonelektrotechnika.cz/pdf/tiskoviny_pdf_358.pdf
- [19] SHIVALIK BIMETAL CONTROLS LTD. SHIVALIK THERMOSTATIC BIMETALS. Kalkaji, New Delhi-110 019 INDIA.

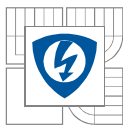


PŘÍLOHY

8.1 Příloha 1: Definice materiálů pro výpočet

Měď

Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota	8960	kg/m ³
Měrná tepelná kapacita		
Tepelná vodivost		



Elektrická vodivost		
Teplota tání	1356,2	K

Pohyblivé kontakty

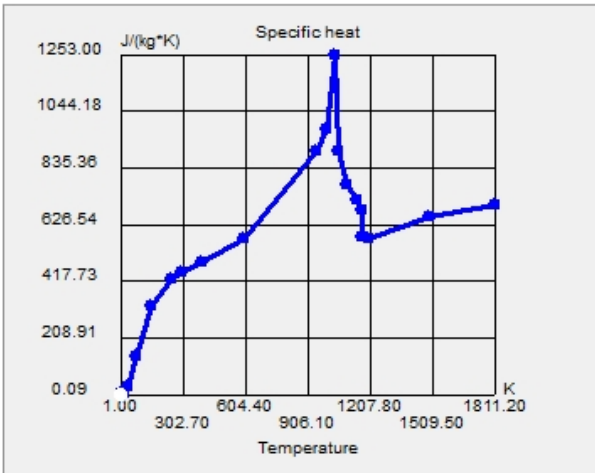
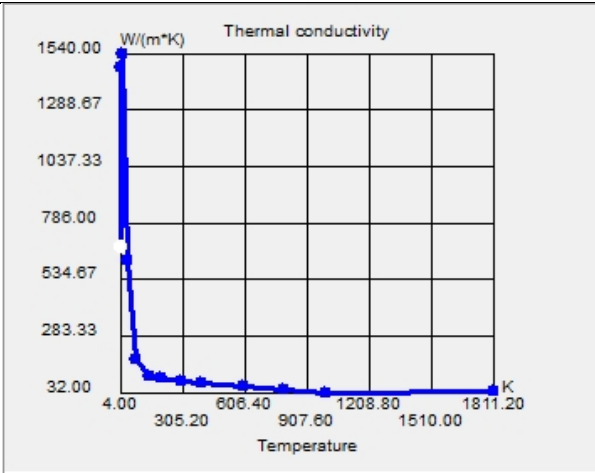
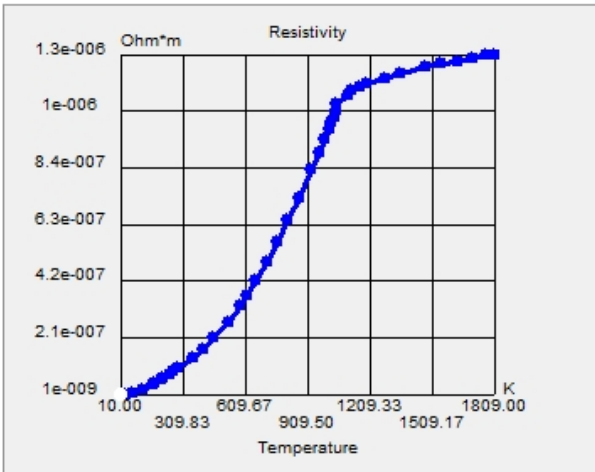
Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota	15500	kg/m ³
Měrná tepelná kapacita	180	J/(kg*K)
Tepelná vodivost	430	W/(m*K)
Elektrická vodivost	1,9*10 ⁻⁸	Ω*m
Teplota tání	1233,15	K

Pevné kontakty

Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota	9500	kg/m ³
Měrná tepelná kapacita	180	J/(kg*K)
Tepelná vodivost	430	W/(m*K)
Elektrická vodivost	3,85*10 ⁻⁸	Ω*m
Teplota tání	1233,15	K



Zhášecí komory a spojovací materiály ať už jde o nýty, nebo šrouby, jsou ze železa o následujících vlastnostech.

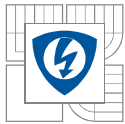
Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota	7874	kg/m ³
Měrná tepelná kapacita		
Tepelná vodivost		
Elektrická vodivost		
Teplota tání	1811,2	K



Bimetal a topítko. Na základě materiálu [19] a konzultace s Michalem Zelenkou z FEKT bylo určeno, že aktivní části bimetalu bude přiřazen niku a pasivní části invaru. Topítku pak byla přiřazena mosaz.

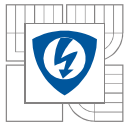
Mosaz

Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota	8400	kg/m ³
Měrná tepelná kapacita		
Tepelná vodivost		
Elektrická vodivost		
Teplota tání	1158,15	K



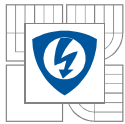
Invar

Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota	7874	kg/m ³
Měrná tepelná kapacita	515	J/(kg*K)
Tepelná vodivost		
Elektrická vodivost		
Teplota tání	1811,2	K



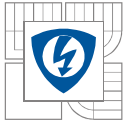
Nikl

Veličina	Hodnota	Jednotka																
Hustota	8910	kg/m ³																
Měrná tepelná kapacita	<p>Specific heat</p> <table border="1"> <caption>Approximate data points for Specific heat</caption> <thead> <tr> <th>Temperature (K)</th> <th>Specific heat (J/(kg*K))</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.00</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>250.83</td><td>102.77</td></tr> <tr><td>500.67</td><td>308.06</td></tr> <tr><td>750.50</td><td>410.71</td></tr> <tr><td>1000.33</td><td>513.35</td></tr> <tr><td>1250.17</td><td>513.35</td></tr> <tr><td>1500.00</td><td>616.00</td></tr> </tbody> </table>		Temperature (K)	Specific heat (J/(kg*K))	1.00	0.12	250.83	102.77	500.67	308.06	750.50	410.71	1000.33	513.35	1250.17	513.35	1500.00	616.00
Temperature (K)	Specific heat (J/(kg*K))																	
1.00	0.12																	
250.83	102.77																	
500.67	308.06																	
750.50	410.71																	
1000.33	513.35																	
1250.17	513.35																	
1500.00	616.00																	
Tepelná vodivost	<p>Thermal conductivity</p> <table border="1"> <caption>Approximate data points for Thermal conductivity</caption> <thead> <tr> <th>Temperature (K)</th> <th>Thermal conductivity (W/(m*K))</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.00</td><td>1950.00</td></tr> <tr><td>234.17</td><td>1007.80</td></tr> <tr><td>467.33</td><td>693.73</td></tr> <tr><td>700.50</td><td>379.67</td></tr> <tr><td>933.67</td><td>65.60</td></tr> <tr><td>1166.83</td><td>65.60</td></tr> <tr><td>1400.00</td><td>65.60</td></tr> </tbody> </table>		Temperature (K)	Thermal conductivity (W/(m*K))	1.00	1950.00	234.17	1007.80	467.33	693.73	700.50	379.67	933.67	65.60	1166.83	65.60	1400.00	65.60
Temperature (K)	Thermal conductivity (W/(m*K))																	
1.00	1950.00																	
234.17	1007.80																	
467.33	693.73																	
700.50	379.67																	
933.67	65.60																	
1166.83	65.60																	
1400.00	65.60																	
Elektrická vodivost	<p>Resistivity</p> <table border="1"> <caption>Approximate data points for Resistivity</caption> <thead> <tr> <th>Temperature (K)</th> <th>Resistivity (Ohm*m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>15.00</td><td>3.7e-010</td></tr> <tr><td>292.33</td><td>1.1e-007</td></tr> <tr><td>569.67</td><td>2.1e-007</td></tr> <tr><td>847.00</td><td>3.2e-007</td></tr> <tr><td>1124.33</td><td>4.2e-007</td></tr> <tr><td>1401.67</td><td>5.3e-007</td></tr> <tr><td>1679.00</td><td>6.3e-007</td></tr> </tbody> </table>		Temperature (K)	Resistivity (Ohm*m)	15.00	3.7e-010	292.33	1.1e-007	569.67	2.1e-007	847.00	3.2e-007	1124.33	4.2e-007	1401.67	5.3e-007	1679.00	6.3e-007
Temperature (K)	Resistivity (Ohm*m)																	
15.00	3.7e-010																	
292.33	1.1e-007																	
569.67	2.1e-007																	
847.00	3.2e-007																	
1124.33	4.2e-007																	
1401.67	5.3e-007																	
1679.00	6.3e-007																	
Teplota tání	1728,2	K																



Plastové šasi – pro definici plastů se vycházelo z materiálů používaných v průmyslu a vzala střední hodnota používaných plastů v praxi. Šasi je na obrázcích ze SolidWorksu nastaveno jako neviditelné, neboť by jinak zakrývalo proudovou dráhu.

Veličina	Hodnota	Jednotka
Hustota	1200	kg/m ³
Měrná tepelná kapacita	1200	J/(kg*K)
Tepelná vodivost	0,2	W/(m*K)
Elektrická vodivost	-	Ω*m
Teplota tání	1000	K



8.2 Příloha 2: DVD

Na přiloženém DVD jsou 3 složky:

Diplomová práce – obsahuje PDF verzi této diplomové práce

Autocad – zde je k dispozici model jističe v Autocadu

SolidWorks – tato složka obsahuje model v SolidWorksu a veškeré výsledky simulací

K souborům je také možné získat přístup přes tento odkaz: <https://goo.gl/c65qrZ>.