



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**ZVYŠOVÁNÍ JMENOVITÉ HODNOTY PROUDU
SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ S TEPELNOU VYPÍNACÍ
SPOUŠTÍ**

RETERATING ON THE LOW VOLTAGE DEVICES WITH A THERMAL TRIP UNIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Trubák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Dostál

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Vojtěch Trubák

ID: 164791

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Zvyšování jmenovité hodnoty proudu spínacích přístrojů s tepelnou vypínací spouští

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou zvyšování jmenovité hodnoty proudu spínacích přístrojů pro správnou funkčnost tepelné spouště.
2. Seznamte se s vybraným spínacím přístrojem.
3. Připravte laboratorní měření pro analýzu dané problematiky.
4. Vytvořte CAD model spínacího přístroje pro numerický výpočet v programu Solidworks Flow Simulation a ověřte ho
5. Získané poznatky porovnejte

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- 1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 198
- [2] ČSN EN 60 947-2. Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí: Část 2: Jističe
- [3] Jean-Michel Bergheau, Roland Fortunier, Finite element simulation of heat transfer, ISBN 978-1-84821-053-0

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 31.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Dostál

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá bimetalovými tepelnými spouštěmi jističů. Pozornost je zaměřena především na vliv okolní teploty na funkci této tepelných spouští.

V druhé kapitole se tato práce věnuje tepelným a dynamickým účinkům elektrického proudu. Jsou zde uvedeny vztahy pro výpočet maxima a průběhu oteplení proudovodné dráhy, dále vztahy pro výpočet síly, vyvolané elektrickým proudem.

Ve třetí kapitole je popsán základní úvod do jističů. Je zde nastíněna jejich funkce, dělení, konstrukce. Najdete zde také krátce popsáný proudový chránič.

Ve čtvrté kapitole se tato práce věnuje bimetalu. Je zde popsán princip funkce tohoto dvojkovu, vybavovací charakteristika, způsoby jeho výroby a materiály, které se na výrobu používají.

V páté kapitole je představen jistič 3VA12, jeho jmenovité parametry, způsoby využití. Je zde také znázorněné aplikování bimetalu jako tepelné spouště.

V šesté kapitole je popsán postup při vytváření modelu v CAD programu Solidworks. Je zde zobrazena geometrie proudové dráhy a její doplňky tvořící celkový model jističe. Dále jsou zde uvedeny použité materiály a tepelné a elektrické odpory implementované na stykové plochy.

Poslední kapitola je věnovaná výsledkům reratingu. Uvedena je zde výsledná tabulka s korekčními koeficienty jmenovitého proudu a jejich srovnání s hodnotami od výrobce.

Abstract

This work is about bimetal trip unit used in circuit breakers. It focuses on how ambient temperature affects function of this tripping unit.

In second chapter of this work, there are described thermal and dynamic effects of electric current. You can find there equations for calculation of temperature rise caused by electric current, its max temperature change and its process, also equations describing force, caused by electric current.

In third chapter is short introduction of circuit breakers. There is description of their function, classification and construction. Finally there is description of residual current device.

Fourth chapter of this work is focused on bimetal. There is described their function principle, ways of manufacture, used materials and its tripping characteristic.

In fifth chapter, the circuit breaker 3VA12 is introduced, its electrical characteristics and its applications. Also, there is described principal of bimetal application as thermal trip unit.

Sixth chapter is about procedure used to create model in CAD program Solidworks. You can find there individual pieces of current path and its addons connected together and forming model of circuit breaker. There are also showed modifications of the model, using thermal and conduction resistances.

Last chapter is dedicated to results of rerating. There is final table showing correction coefficients of rated operational current and their comparison to real ones.

Klíčová slova

tepelné účinky proudu; dynamické účinky proudu; jistič; bimetal; tepelná spoušť; dvojkov; specifické tepelné zakřivení; 3VA12; inverzní metoda; rerating

Keywords

thermal effects of current; dynamic effects of current; circuit breaker; bimetal; thermal release; specific thermal curvature; 3VA12; inverse method; rerating

Bibliografická citace

TRUBÁK, V. *Zvyšování jmenovité hodnoty proudu spínacích přístrojů s tepelnou vypínací spouští*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Dostál.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Rerating spínacího přístroje nízkého napětí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

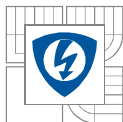
Podpis autora

Poděkování

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

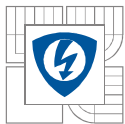
V Brně dne

Podpis autora



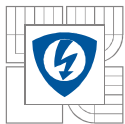
Obsah

1 ÚVOD	10
2 ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU	11
2.1 TEPELNÉ	11
2.2 DYNAMICKE	13
3 JISTIČE	15
3.1 FUNKCE	15
3.2 ROZDĚLENÍ	15
3.3 KONSTRUKCE	18
3.4 PROUDOVÝ CHRÁNIČ	19
4 BIMETAL	21
4.1 PRINCIP FUNKCE	21
4.2 VÝROBA	24
4.3 MATERIÁLY	25
4.4 VYBAVOVACÍ CHARAKTERISTIKA	26
4.4.1 POPIS	26
4.4.2 VLIVY OKOLÍ	26
5 JISTIČ 3VA1225	28
5.1 PARAMETRY	28
5.2 PRINCIP FUNKCE TEPELNÉ SPOUŠTĚ	29
5.3 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKY	30
6 MODEL	32
6.1 KONSTRUKCE A POUŽITÉ MATERIÁLY	32
6.2 KONTROLNÍ BODY:	35
6.3 ÚPRAVY MODELU:	36
6.4 VÝSLEDNÁ SIMULACE:	37
7 RERATING SPÍNACÍHO PŘÍSTROJE:	46
7.1 VÝSLEDKY:	47
7.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	49
8 ZÁVĚR	51
LITERATURA	52



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1.1: Průběh oteplení proudovodné dráhy</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2.2.1: Znázornění silového působení mezi vodiči</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 3.2.1: Časově nezávislá a závislá charakteristika</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3.2.2: Vybavovací charakteristika jističe</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3.3.1: Konstrukce jističe</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3.4.1: Principiální konstrukce proudového chrániče</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4.1.1: Princip funkce bimetalu</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4.1.2: Užití bimetalu v jističích</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4.1.3: Měření specifického zakřivení bimetalu</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4.4.1: Vybavovací charakteristika za studena a za tepla</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 5.1.1: Znázornění rotačního kontaktu</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5.2.1: Zobrazení principu tepelné spouště</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 6.1.1: Jednotlivé části proudovodné dráhy</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 6.1.2: Proudovodná dráha</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 6.1.3: Model s přidávanými částmi</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 6.2.1: Rozmístění kontrolních bodů</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 6.2.2: Rozmístění kontrolních bodů v ose z</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 6.3.1: Zobrazení elektrických odporů, které byly přidány do modelu</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 6.3.2: Zobrazení tepelných odporů v modelu</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 6.4.1: Výpočetní síť</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6.4.2: Výpočetní síť pevných objemů</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 6.4.3: Zobrazení teploty a vektorů proudění vzduchu výsledné simulace</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6.4.4: Úbytky napětí rozložené na proudovodné dráze</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6.4.5: Jouleovy ztráty v objemu proudovodné dráhy</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 6.4.6: Detail Jouleových ztrát v topítku</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 6.4.7: Proudová hustota v ose X</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 6.4.8: Proudová hustota v ose Y</i>	<i>44</i>

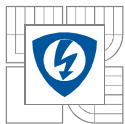


Seznam tabulek

<i>Tab. 5.1: Jmenovité parametry jističe 3VA12</i>	27
<i>Tab. 6.1: Použité materiály</i>	34
<i>Tab. 7.1: Rerating, simulace</i>	49
<i>Tab. 7.2.1: Rerating, manuál</i>	50
<i>Tab. 7.2.2: Porovnání</i>	50

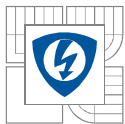
Seznam grafů

<i>Graf 5.3: Cable connection 1,0 x In AC</i>	31
<i>Graf 6.4: Srovnání hodnot simulace a měření</i>	37
<i>Graf 7.1: Výsledná teplota zobrazená po délce bimetalu</i>	47
<i>Graf 7.2: Závislost jmenovitého proudu na teplotě okolí</i>	48



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	vzdálenost vodičů	(m)
A	vzdálenost bodů bimetalu	(m)
B_1	magnetická indukce	(T)
c	měrná tepelná kapacita	(J/m ³ K)
E_1	modul pružnosti vrchní vrstvy	(MPa)
E_2	modul pružnosti dolní vrstvy	(MPa)
F	síla	(N)
H_1	intenzita magnetického pole	(A/m)
I	proud	(A)
I_1	proud vodičem 1	(A)
I_2	proud vodičem 2	(A)
I_n	jmenovitý proud	(A)
K	korekční faktor	(-)
l	délka	(m)
l_0	původní délka	(m)
Δl	změna délky	(m)
L	délka součástky	(m)
nn	nízké napětí	
Q	teplo	(J)
r	poloměr	(m)
T_1	teplota před ohřevem	(K)
T_2	teplota po ohřevu	(K)
R	elektrický odpor	(Ω)
s	tloušťka obou vrstev	(m)
s_1	tloušťka vrchní vrstvy	(m)
s_2	tloušťka dolní vrstvy	(m)
S	plocha	(m ²)
t	čas	(s)
t_{ok}	teplota okolí	(°C)
TK	korekční koeficient	(-)
V	objem	(m ³)
α	koeficient délkové roztažnosti	(/K)
α_0	součinitel přestupu tepla	(W/m ² K)
α_1	teplotní koeficient roztažnosti vrchní vrstvy	(/K)
α_2	teplotní koeficient roztažnosti dolní vrstvy	(/K)
$d\vartheta$	přírůstek tepla	(K)
$\Delta\vartheta$	oteplení	(K)
$\Delta\vartheta_{max}$	maximální oteplení	(K)
κ	specifické tepelné zakřivení	(10 ⁻⁶ /K)
μ_0	permeabilita vakua	(H/m)
τ	časová oteplovací konstanta	(s)
φ	úhel odchýlení	(°)



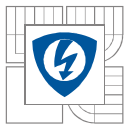
1 ÚVOD

Druhá průmyslová revoluce dala lidstvu již koncem 19. století elektrickou energii. V současném světě je „elektrina“ nezbytnou součástí našeho života a významně ovlivňuje životní styl celé společnosti.

Člověk se naučil využívat obrovské výhody elektrické energie, ale je třeba pozorně vnímat i nebezpečí, která s jejím užíváním souvisí. Při přebytku elektrického proudu může snadno dojít ke zranění osob či zvířat nebo k poškození vedení popř. elektrických strojů což může vést ke zkratu a následnému požáru. Těmto situacím je potřeba se vyvarovat, proto často využíváme jističe, které nás před nechtěnými účinky proudu chrání.

Jističů je několik druhů v závislosti na pracovním napětí, proudu nebo podmínkách, ve kterých bude jistič pracovat.

V bakalářské práci se budeme zabývat reratingem, tedy vlivem okolní teploty na funkci tepelné spouště a změnou jmenovité hodnoty proudu, tak aby tento vliv byl vyrušen. Za tímto účelem bude vytvořen model jističe 3VA12 ve výpočetním systému. Model bude upraven, aby odpovídal reálnému jističi. Následně bude provedena série simulací, jejímž výsledkem bude tabulka s korekčními koeficienty jmenovitého proudu pro dané teploty okolí.



2 ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU

Pojem elektrický proud označuje uspořádaný pohyb přenašečů náboje v daném směru. Elektrony sloužící jako přenašeče náboje cestují ze záporného pólu na kladný, jejich tok je opačný k dohodnutému směru proudu. Pohyb těchto částic ovlivňuje vodič samotný i jeho okolí. Některé tyto vlivy - účinky elektrického proudu budou v této kapitole popsány.

2.1 Tepelné

Elektrický proud je schopen generovat teplo hned několika způsoby. Mezi nejčastější se řadí odporové a obloukové. Tato práce se zabývá pouze součástkami, které využívají odporové generování tepla.

Odporové generování tepla je způsobeno srážkami přenašečů náboje s atomy vodiče. Při tomto jevu vzniká takzvané Jouleovo teplo, které závisí na velikosti proudu, odporu a času, po který proud součástkou prochází. Toto teplo lze vyjádřit vztahem:

$$Q = R * I^2 * t \quad (J) \quad (2.1.1)$$

Kde:

- **Q** je množství vygenerovaného tepla (J)
- **R** je odpor (Ω)
- **I** označuje velikost protékaného proudu (A)
- **t** je doba průchodu (s).

Toto vytvořené teplo se projeví následovně: jedna jeho část se bude z povrchu vodiče uvolňovat do okolí, druhá část se spotřebuje ve vodiči a způsobí jeho oteplení.

Tepelnou bilanci lze vyjádřit vztahem: [1]

$$R * I^2 dt = \alpha_0 * S * \Delta\theta dt + c * V * d\theta \quad (J) \quad (2.1.2)$$

Kde:

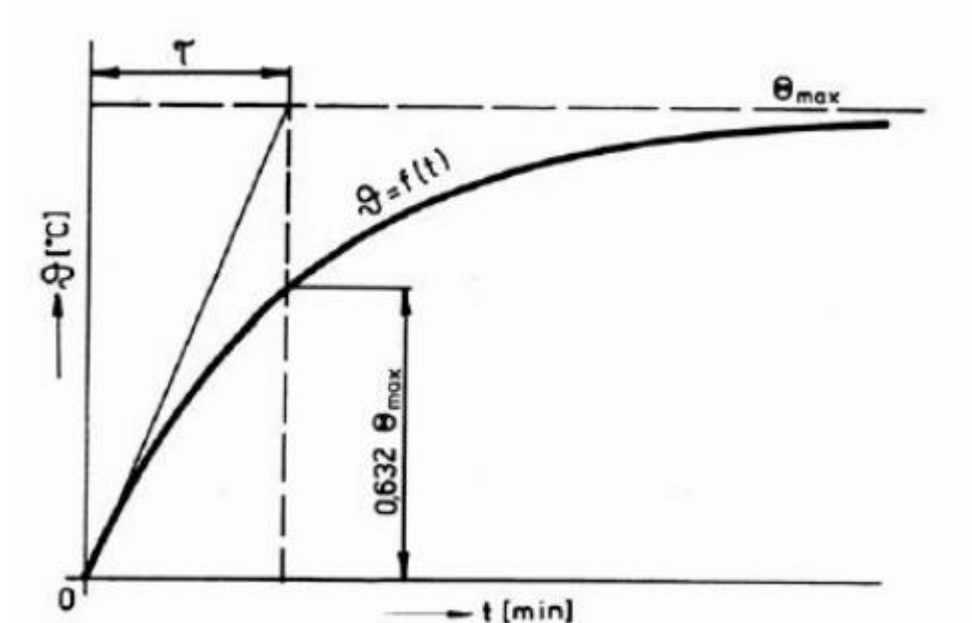
- **α_0** je součinitel přestupu tepla (W/m^2K) (tedy množství tepla, které se přesune do okolí z každého metru čtverečního povrchu při rozdílu tepla 1 K mezi povrchem a okolím)
- **S** je plocha povrchu vodiče (m^2)
- **$\Delta\theta$** je okamžité oteplení povrchu vodiče oproti okolí (K)
- **c** je měrná tepelná kapacita materiálu vodiče (J/m^3K)
- **V** je objem vodiče (m^3)
- **$d\theta$** je přírůstek teploty vodiče (K).

Z rovnice 2.1.2 lze vyjádřit vztah pro výpočet průběhu oteplení: [1]

$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot S} * \left(1 - e^{-\frac{\alpha_0 \cdot S}{c \cdot V} * t}\right) = \Delta\vartheta_{max} * (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (K) \quad (2.1.3)$$

Při přetížení má průběh oteplování vodiče charakter exponenciály asymptoticky se blížíící hodnotě maximálního oteplení. Když vodič dosáhne tohoto maximálního oteplení $\Delta\vartheta_{max}$, nastává okamžik, kdy veškeré generované teplo je spotřebováno převodem do okolí. Nastává tedy stav kdy: [1]

$$R * I^2 = \alpha_0 * S * \Delta\vartheta_{max} \quad (2.1.4)$$



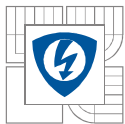
Obr. 2.1.1: Průběh oteplení proudovodné dráhy [1]

Časová oteplovací konstanta vodiče τ znázorněna na obr. 2.1.1 vyjadřuje čas (s), za který by došlo k dosáhnutí maximálního oteplení $\Delta\vartheta_{max}$, kdyby nedocházelo k přenosu tepla mezi vodičem a okolím. Lze ji získat pomocí vztahu: [1]

$$\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot S} \quad (s) \quad (2.1.5)$$

Při zkratu prochází vedením velký proud po krátký čas. Dochází tak k prudkému oteplení vodiče. Krátký čas způsobí, že teplo odvedené do okolí je velmi malé a lze jej tak při výpočtu zanedbat. Je možné tedy uvažovat, že všechna energie je spotřebována na oteplení vodiče. Modifikací vzorce 2.1.2 vznikne: [1]

$$R * I^2 dt = c * V * d\vartheta \quad (2.1.6)$$



2.2 Dynamické

„Velikost elektrodynamických sil působících na proudovodné části je závislá na protékajícím proudu ve vodičích a na intenzitě magnetického pole v místě vodičů. Návrhy se zaměřují především na silové působení při nadproudech, zejména pak maximálních proudech ve vodičích – zkratech. To je dáno závislostí síly na velikosti proudu, v případě interakce dvou vodičů protékaných stejným proudem dokonce na jeho kvadrátu. Dané síly mohou deformovat jak vodiče, tak i nosné nebo přiléhající pevné izolanty. V potaz je třeba brát i významné působení elektrodynamických sil v obvodech se střídavým napětím, a to v případě výskytu mechanické rezonance zařízení nebo jejich částí. Je-li hodnota vlastní mechanické frekvence proudovodné dráhy blízko frekvence elektrodynamické síly, může nastat trvalé namáhání a z toho plynoucí mechanická únava materiálů, končící jejich nevratným poškozením“ [3]

Všechny proudovodné vodiče jsou namáhány silovými účinky proudu. Při průchodu nabitých částic dochází k vytvoření magnetického pole, které pak interaguje s dalšími vodiči nebo s úseky téhož vodiče.

Síla mezi dvěma nekonečně dlouhými rovnými vodiči vůči sobě rovnoběžnými ve vakuu je popsána Ampérovým zákonem: [2]

$$F = B_1 * I_2 * l \quad (\text{N}) \quad (2.2.1)$$

A dalších vztahů: [2]

$$B_1 = \mu_0 * H_1 \quad (\text{T}) \quad (2.2.2)$$

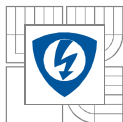
$$H_1 = \frac{I_1}{2 * \pi * a} \quad (\text{A/m}) \quad (2.2.3)$$

Dosazením vznikne vzorec: [2]

$$F = \mu_0 * \frac{I_1}{2 * \pi * a} * I_2 * l \quad (\text{N}) \quad (2.2.4)$$

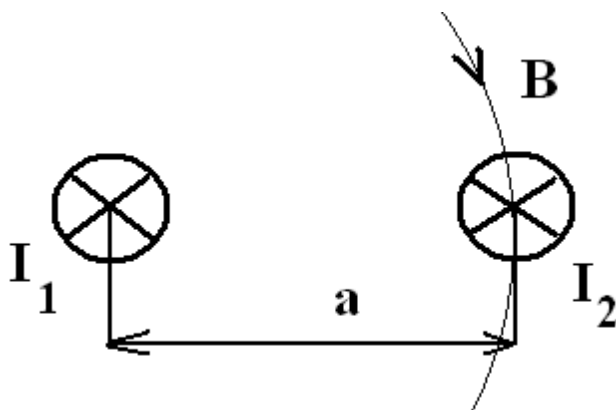
Kde:

- **F** je síla, která působí na vodič (N)
- **B₁** je magnetická indukce (T)
- **I₁** je proud vodičem, který vytváří magnetické pole (A)
- **I₂** je proud vodičem, na který je silově působeno (A)
- **l** je délka úseku vodiče (m)
- **H₁** je intenzita vygenerovaného magnetického pole (A/m)
- **μ₀** je permeabilita vakua a je rovna $4\pi * 10^{-7}$ H/m
- **a** je vzdálenost mezi vodiči (m).

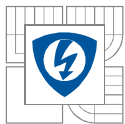


V momentě když přímkový vodič prochází polem odchýlený od vektoru magnetické indukce pod úhlem φ ($^\circ$), použije se tvar:

$$F = B_1 * I_2 * l * \sin \varphi \quad (\text{N}) \quad (2.2.5)$$



Obr. 2.2.1: Znáznornění silového působení mezi vodiči [2]



3 JISTIČE

„Jistič je samočinný vypínač, který zahrnuje v jednom přístroji funkce jištění a vypínání. Při zapínání jističe se mechanicky napne vypínací pružina, která pak zpětně působí na pohyblivé kontakty při vypínání. V zapnuté poloze drží jistič západkou, která je uvolněna spouštěmi při nadproudu nebo zkratu. Jističe jako mechanické vypínače mají reakční dobu při zkratech 3-4 ms. Nehodí se proto pro jištění polovodičových prvků.

Pro vypínání malých nadproudů má jistič obvod s tepelným prvkem, jehož teplota je závislá na proudovém zatížení ($I_2 \cdot t$). Kromě toho toto čidlo teploty integruje i okolní účinky oteplení nebo ochlazení. Velikost a konstrukce tepelného prvku (nadproudové ochrany) jističe určuje jeho proudovou kapacitu. Jističe s tepelnou ochranou jsou vhodné zejména pro jištění vedení.“ [4]

3.1 Funkce

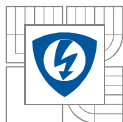
„Jištění vedení nn slouží k ochraně lidí, samotného vedení a přístrojů k němu připojeným. A to před nebezpečným elektrickým proudem. Jde o to, aby jistící prvek odpojil el. energii od chráněného zařízení dříve, než dojde k jeho poškození v důsledku nadproudu tepelnými nebo mechanickými účinky. Proto čím vyšší hodnota nadproudu, tím musí být kratší doba odpojení. Tato závislost doby odpojení na velikosti nadproudu se u jednotlivých typů jistících prvků liší.

Ochranou vodiče vedení před přetížením a zkratem se snažíme docílit toho, aby nedocházelo k dlouhodobému přetěžování vodiče a tím ke zhoršování jeho vlastností. Chrání se jedním nebo více prvky umístěných v místě, kde samočinně přeruší jakékoliv nadproudy nižší nebo rovné zkratovému proudu v místě instalace. A to dříve než dojde k nebezpečnému oteplení jádra vodiče, izolace, spojů, koncovek nebo okolí vedení. Výjimku tvoří vedení, kde jsou nadproudy omezeny nebo bezpečnostní důvody. Omezení nadproudu nastává za podmínek, že zdroj má impedanci takovou, aby jím dodaný proud nepřekročil dovolený proud vodičů.“ [5]

3.2 Rozdělení

Jističe se dělí podle jejich základních parametrů:

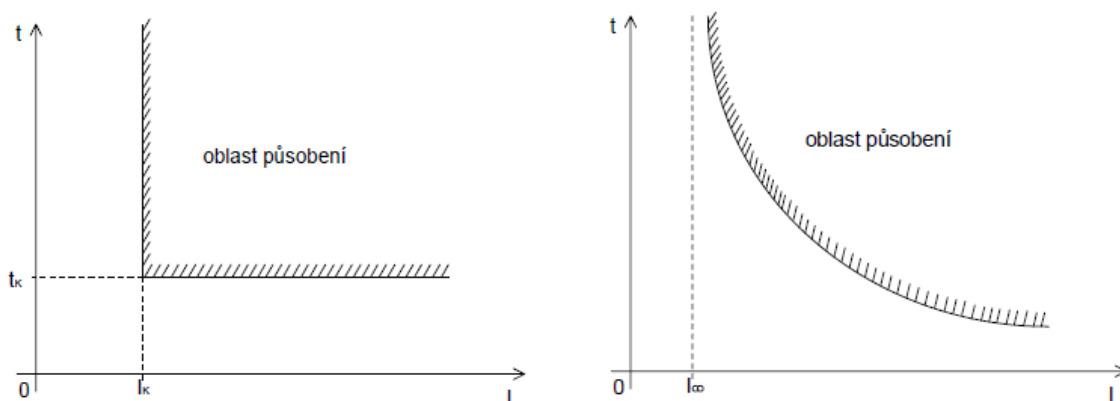
- jmenovité pracovní napětí U_e , které určuje napětí sítě, ve které bude jistič pracovat
- jmenovitý proud I_n , uvádějící velikost proudu, který může jističem protékat po časově neomezenou dobu
- jmenovitý pracovní kmitočet f
- dále se pak udává maximální vypínací schopnost I_{cu} / I_{cs} určující velikost proudu, který je jistič ještě schopen vybavit. [6]



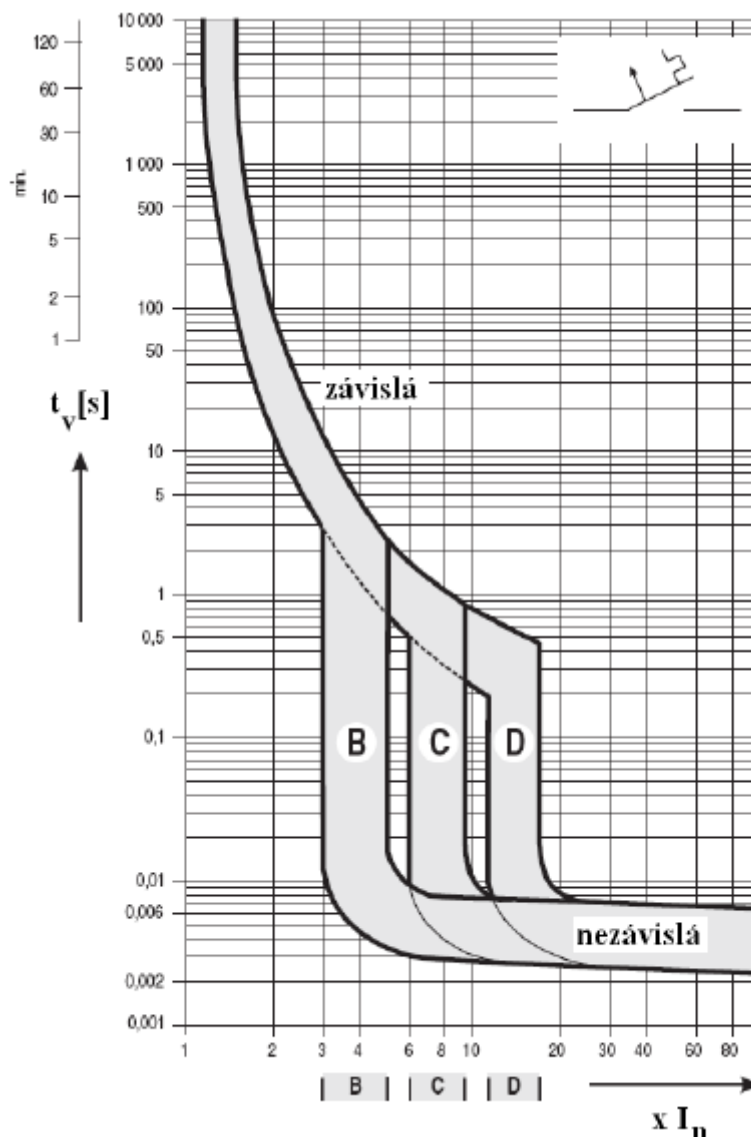
Jednou z hlavních vlastností jističe je typ jeho vypínací charakteristiky, který vyjadřuje čas, za který jistič vybaví v závislosti na protékaném násobku jmenovitého proudu jističe. Tyto charakteristiky se dělí na 4 kategorie: [7]

- časově závislé
- časově nezávislé
- polozávislé
- mžikové

V běžném jističi se nejčastěji využívá kombinace závislé vybavovací charakteristiky u tepelné spouště a nezávislé charakteristiky u elektromagnetické spouště.



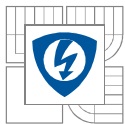
Obr. 3.2.1: Časově nezávislá a závislá charakteristika [7]



Obr. 3.2.2: Vybavovací charakteristika jističe [2]

Na obr. 3.2.2 je také znázorněno další rozdělení jističů podle citlivosti do kategorií B, C, D:

- kategorie B zahrnuje běžné obvody bez výrazných proudových nárazů, zkratová spoušť tak vybavuje už od 3 I_n .
- kategorie C zahrnuje obvody, ve kterých může dojít k proudovým nárazům. Tedy například obvody s elektromotorem s lehkým rozběhem. Zkratová spoušť obvod vybaví při 5-10 násobku I_n .
- kategorie D zahrnuje obvody, ve kterých dochází k velkým proudovým nárazům. Používá se v obvodech, které obsahují elektromotory s těžkým rozběhem nebo transformátory. Zkratová spoušť vybavuje při 10-20 (až 100) násobku I_n . [2]



3.3 Konstrukce

Jistič se skládá z:

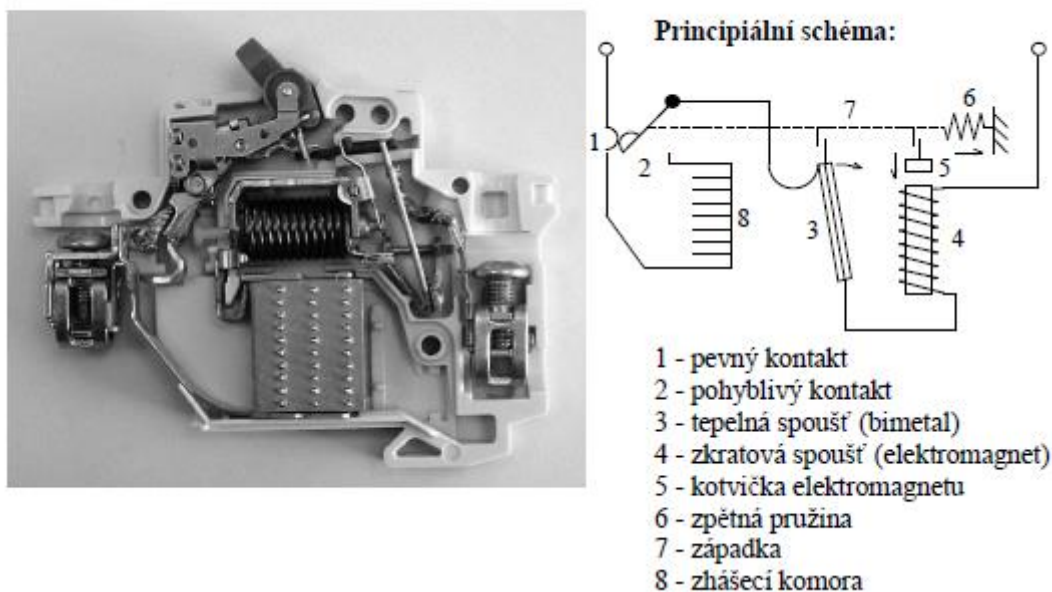
- Kontakty
- Vybavovací mechanismus
- Zhášecí komora
- Nadproudové spouště
 - o Tepelné
 - o Elektrodynamické

Kontakty jističe se dělí na jeden statický a druhý pohyblivý. Při aktivaci tepelné nebo elektrodynamické spouště dojde k oddálení kontaktů a odpojení od zdroje za vzniku vypínacího oblouku. Materiál kontaktů by měl být dobře vodivý, aby nedocházelo ke ztrátám. Měl by mít dobrou tepelnou odolnost, aby odolával tepelným účinkům spínacích oblouků. A měl by mít i dobrou mechanickou odolnost, aby při sepínání nedocházelo k deformacím kontaktů. [2]

Vybavovací mechanismus je ovládací prvek jističe. Je důležité, aby vypínací pochod měl přednost před spínacím. Při sepnutí jističe se tak musí vynaložit větší síla. Ta se uloží nejčastěji v pružinách jako mechanická energie, která pak na případný popud některé ze spouští, oddálí kontakty. [6]

Zhášecí komora je místo v jističi speciálně navržené pro uhašení vypínacích oblouků. Při vypínání obvodu se mezi oddalujícími kontakty vlivem termické nebo nárazové ionizace vytvoří elektrický oblouk. Jeden z hlavních způsobů uhašení tohoto oblouku spočívá v jeho veohnání na žebra zhášecí komory pomocí elektromagnetického pole, které bylo vytvořeno vypínacím proudem. Žebra jsou tvořena buď z izolačního nebo z feromagnetického materiálu. V případě použití izolačního materiálu, dochází k veohnání oblouku mezi jednotlivá žebra a tím k prodloužení oblouku a tedy zvýšení jeho odporu, což vede k jeho uhašení. V případě použití feromagnetického materiálu, dochází k rozdělení oblouku na malé segmenty mezi žebry. Vzroste tak počet přechodů proudu mezi kovovými částmi a ionizovaným plynem, které mají velký odpor. Dochází tak opět ke zvýšení odporu oblouku a následně k jeho uhašení. [1]

Nadproudové spouště jsou zpravidla provedené kombinací bimetalové spouště, chránící proti přetížení a elektromagnetu, který chrání proti zkratům. Při velkých jmenovitých proudech se využívají spouště elektronické, které analyzují signál snímaný proudovými transformátory. Bimetalová spoušť využívá tepelných účinků proudu. Teplo způsobené průchodem proudu způsobí ohnutí bimetalu, který pak při dostatečně velkém ohnutí, způsobeném přetížením, vybaví obvod. Blíže se této součástce bude věnovat další kapitola. Zkratová ochrana využívá dynamických účinků proudu. Elektromagnet, jehož vinutím prochází proud obvodu, silově působí na západku, která při dostatečné síle, způsobené zkratovým proudem, vybaví obvod. [6]



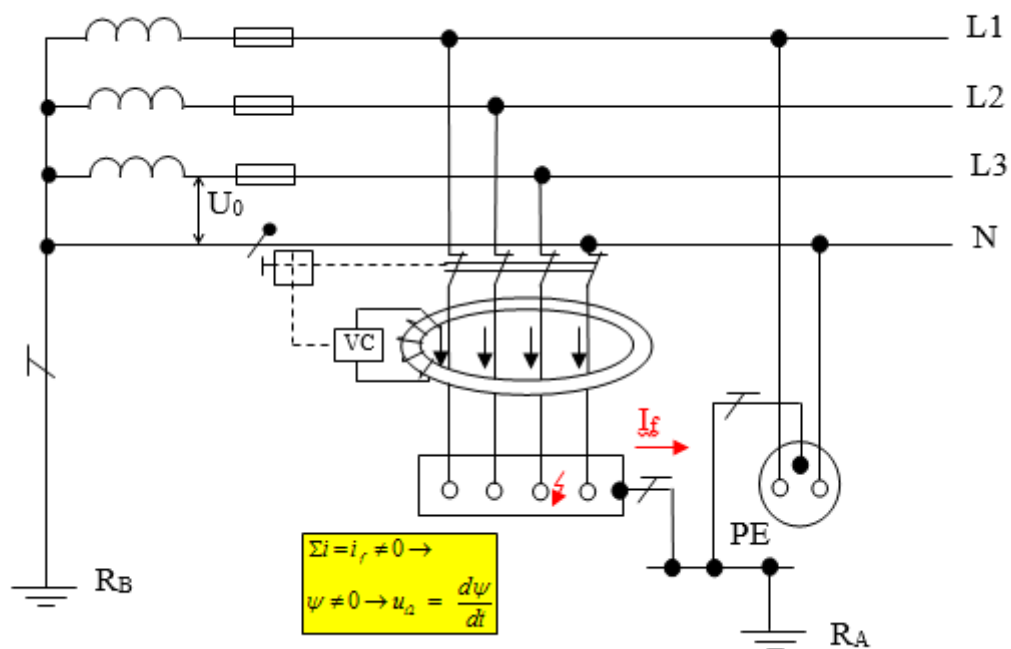
Obr. 3.3.1: Konstrukce jističe [8]

3.4 Proudový chránič

“Proudový chránič (angl. residual current device - RCD) je samočinný spínací přístroj nízkého napětí, který samočinně vypíná, jestliže reziduální (poruchový) proud dosáhne určité hodnoty. Slouží jako ochrana před nebezpečným dotykem neživých částí a jako doplňková ochrana při dotyku se živou částí.” [2]

Nejedná se o jistič jako takový, protože nechrání obvod před vlivy nadproudů, ale často je používán spolu s jističi a to zejména v sítích nn. Jeho použití je dnes povinné u téměř všech zásuvkových obvodů v domácnostech do 20 A. [6]

Princip funkce proudového chrániče spočívá v součtovém transformátoru, přes který musí vést veškeré pracovní vodiče, tedy všechny fázové i nulový, které tak tvoří primární vinutí. Nikdy nesmí takto být jištěn ochranný vodič. Tento transformátor provádí součet všech vodičů, který je za bezporuchového stavu roven nule a i magnetický indukční tok je tak nulový. Při poruše, kdy dojde k přechodu části proudu do země, se v magnetickém obvodu transformátoru objeví střídavý magnetický tok. Ten indukuje napětí na měřicím vinutí a začne jím téct reziduální proud. V momentě, kdy tento proud překročí jistou hranici, dojde k vybavení citlivého relé, které následně vybaví celý obvod. Jelikož se jedná o velmi citlivý prvek, je nutné, aby proudový chránič měl zkušební tlačítko, kterým lze kontrolovat správnou funkci relé. Tato kontrola by se měla provádět obvykle jednou za 6 měsíců. [2] [6]



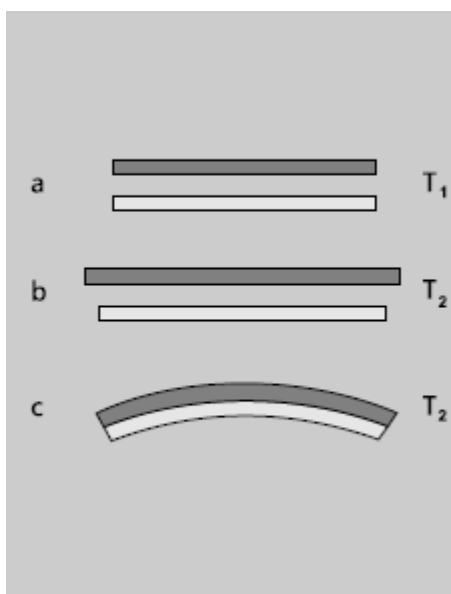
Obr. 3.4.1: Principiální konstrukce proudového chrániče [6]

4 BIMETAL

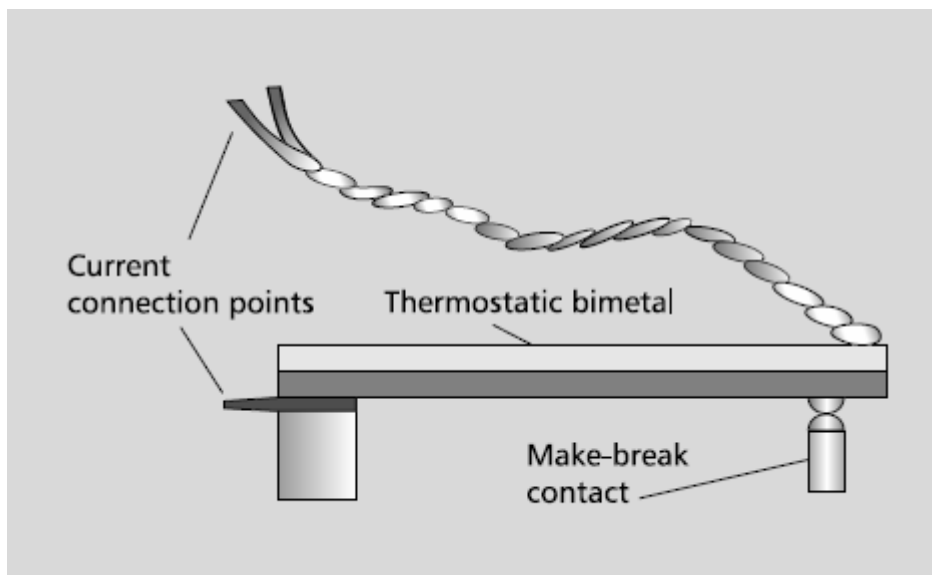
“Ohybové dvojkovy (bimetaly), u kterých jsou celoplošně ve vrstvách spojeny různé kovy, využívají jejich různé tepelné roztažnosti. Používají se ve formě pásků nebo destiček, jedna vrstva má roztažnost velkou, druhá malou. Ohřátím se bimetal deformuje do tvaru části kružnice, po ochlazení se opět napřímí.” [9]

4.1 Princip funkce

Pro funkci bimetalu je využita teplotní roztažnost látek. Při zvýšení teploty materiálu, dojde ke změně jeho objemu. Toho lze využít spojením destiček dvou, nebo více, různých materiálů s různými koeficienty teplotní roztažnosti. Docílí se tak toho, že při zvýšení teploty dojde k nárůstu objemu, tedy i délky obou destiček, první více a druhé méně. Jestliže je spojení obou částí pevné, dojde k deformaci původního tvaru, v případě bimetalu se součástka ohne a vytvoří část kružnice, jejíž vnitřní část tvoří materiál s menší tepelnou roztažností.



Obr. 4.1.1: Princip funkce bimetalu [10]



Obr. 4.1.2: Užití bimetalu v jističích [10]

Velikost teplotního koeficientu délkové roztažnosti α je závislá na teplotě. Pro malé změny teploty jej však lze považovat za konstantní. Změnu délky v závislosti na teplotě je tak možné vyjádřit takto:

$$\Delta l = \alpha * l_0 * \Delta \vartheta \quad (\text{m}) \quad (4.1.1)$$

Kde:

- Δl je změna délky tělesa (m)
- α je koeficient délkové roztažnosti materiálu tělesa (/K)
- l_0 je délka tělesa před změnou teploty
- $\Delta \vartheta$ je změna teploty tělesa (K).

Ze vztahu 4.1.1 se odvodí vztah pro délku tělesa:

$$l = l_0 * (1 + \alpha * \Delta \vartheta) \quad (\text{m}) \quad (4.1.2)$$

Kde l je výsledná délka tělesa po změně teploty (m).

Jednou z nejdůležitějších charakteristik pro bimetal jako součástku je jeho specifické teplotní zakřivení. Toto zakřivení je vztaženo k poloměru hypotetické kružnice, jejíž oblouk je tvořen zahřátým bimetalem.

$$\kappa = \frac{1}{r} \quad (10^{-6}/\text{K})(4.1.3)$$

Kde:

- κ je specifické teplotní zakřivení ($10^{-6}/\text{K}$)
- r je poloměr hypotetické kružnice (m).

Pro výpočet této hodnoty slouží vzorec: [10]

$$\kappa = \frac{6 * (\alpha_1 - \alpha_2) * \left(1 + \frac{s_1}{s_2}\right)^2 * \frac{s_1 * E_1}{s_2 * E_2}}{3 * \left(1 + \frac{s_1}{s_2}\right)^2 * \frac{s_1 * E_1}{s_2 * E_2} + \left(1 + \frac{s_1 * E_1}{s_2 * E_2}\right) * \left(1 + \frac{s_1^3 * E_1}{s_2^3 * E_2}\right)} \quad (10^{-6}/K)(4.1.4)$$

Kde:

- α_1 je teplotní koeficient roztažnosti vrchní vrstvy (vrchní podle obr. 4.1.1) (/K)
- s_1 je tloušťka vrchní vrstvy (m)
- E_1 je modul pružnosti vrchní vrstvy (MPa)
- α_2 je teplotní koeficient roztažnosti dolní vrstvy (/K)
- s_2 je tloušťka dolní vrstvy (m)
- E_2 je modul pružnosti dolní vrstvy (MPa).

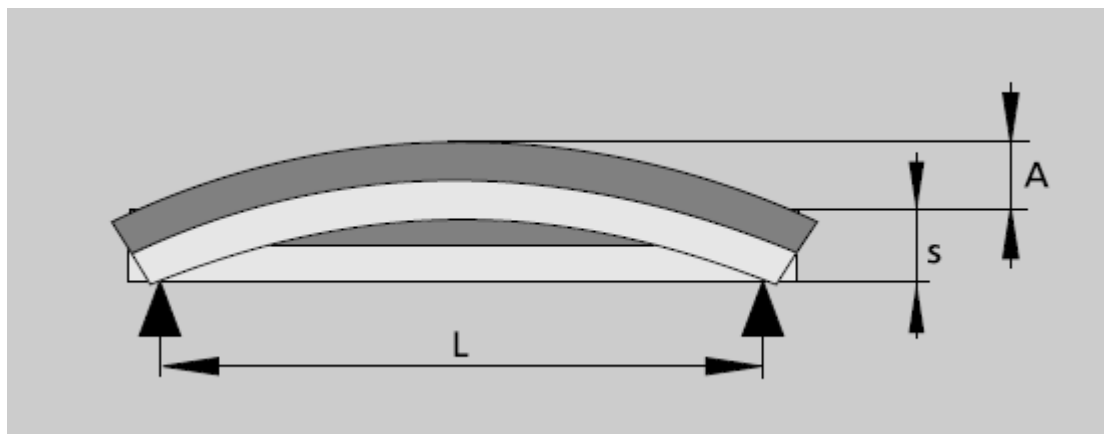
Za předpokladu, že teplotní koeficienty roztažnosti obou vrstev jsou konstantní, je možné vyjádřit poměr tlouštěk jednotlivých vrstev, při kterém se dosáhne největšího zakřivení vztahem: [10]

$$\frac{s_1}{s_2} = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \quad (-) \quad (4.1.5)$$

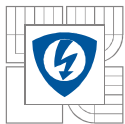
Za předpokladu, že se použije nejvýhodnější poměr tlouštěk vrstev, lze vztah 4.1.4 výrazně zjednodušit do vztahu: [10]

$$\kappa = \frac{3}{2} * (\alpha_1 - \alpha_2) \quad (10^{-6}/K)(4.1.6)$$

Uvedené vztahy pomáhají získat přibližný výsledek, podle kterého lze navrhnout součástku, ovšem pro přesnější zjištění specifického teplotního zakřivení je potřeba provést měření. Měřené parametry jsou zobrazeny na následujícím obrázku:



Obr. 4.1.3: Měření specifického zakřivení bimetalu [10]



Získané hodnoty se pak použijí ve vztahu: [10]

$$\kappa = \frac{8 \cdot s}{T_2 - T_1} * \frac{A}{L^2 + 4 \cdot A^2 + 4 \cdot A \cdot s} \quad (10^{-6}/K)(4.1.7)$$

Kde:

- s je tloušťka celé součástky (m)
- T_1 je teplota před ohřevem (K)
- T_2 je teplota po ohřevu (K)
- A je vzdálenost měřených bodů bimetalu (m)
- L je délka součástky (m).

4.2 Výroba

Nejdůležitější proces při výrobě bimetalu je spojení všech vrstev dohromady. Jelikož momentální technologie není schopna efektivně dosáhnout požadované tloušťky součástky při samotném spojení, jsou již spojené materiály válcovány za studena nebo za tepla do výsledné podoby.

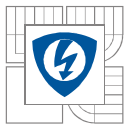
Před spojením jsou materiály ohřívány vysokofrekvenčními nebo středofrekvenčními indukčními pecemi a to buď vystavené okolnímu prostředí, v ochranné atmosféře nebo v určitém stupni vakua. [10]

Existuje několik způsobů, jak dochází k samotnému spojení materiálů:

- Lití jedné roztavené slitiny na druhou, která je v pevném stadiu
- Lisové svařování za vysoké teploty
- Obvodové svaření již dříve snýtovaných částí
- Válcování při vysokých teplotách
- Difúzním žíháním

Všechny uvedené způsoby jsou následované již výše zmíněným válcováním.

Při procesu výroby je nutné zajistit co nejnižší přítomnost cizích vrstev ve svaru obou slitin, které mohou vzniknout vlivem oxidace. Toho lze dosáhnout ohřevem v ochranné atmosféře nebo použitím ochranného obalu, který je po prvním spojení odstraněn. Výsledkem by měl být bimetal, který dobře zvládá tepelné i mechanické namáhání.



4.3 Materiály

Materiály použité pro výrobu bimetalu musí splňovat určité vlastnosti. Měly by mít dostatečnou ohebnost, aby zahřátím a následným ohnutím součástky nedocházelo k trvalé deformaci. Nelze opomenout i dostatečně velkou odolnost vůči změnám vlivem trvalého magnetického pole. A samozřejmě by všechny použité materiály měly být levné a snadno dostupné.

Dnes je klasický bimetal tvořen ze dvou vrstev, jedna s vysokým teplotním koeficientem roztažnosti, druhá s nízkým. Jelikož většina použitých kovů má podobnou velikost modulu roztažnosti, je poměr šířek těchto vrstev je přibližně 1:1 (vzorec 4.1.5). Tím se dosáhne maximálního možného zakřivení dané kombinace kovů.

K optimalizaci některých vlastností, jako třeba elektrický odpor, tepelná vodivost nebo odolnost vůči korozi, je použit tenký obal (např. z chromu pro odolnost vůči korozi), nebo 3. kov jako mezivrstva (např. měď pro lepší vodivost) čímž vznikne trimetal. Dosáhne se tak lepších vlastností v určitých oblastech, ale musí se počítat s tím, že dojde ke zhoršení tepelné citlivosti součástky. [10]

Bimetalové komponenty s vysokou tepelnou expanzí:

- MnCu18Ni10
- MnNi16Cu10
- FeNi20Mn6
- FeNi14Mn7 (X60Ni14Mn7)
- FeNi22Cr3
- Ni

S využitím proti korozivním vrstev z Cr a Ni.

Bimetalové komponenty s nízkou tepelnou expanzí:

- FeNi32Co6
- FeNi36
- FeNi38
- FeNi39
- FeNi42
- FeNi46

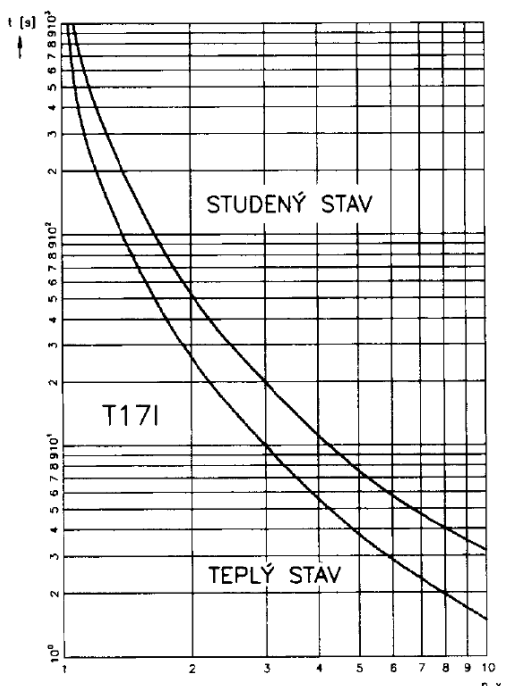
S využitím proti korozivním vrstev z Cr, Ni a Co.

4.4 Vybavovací charakteristika

„Funkci tepelné spouště a relé popisuje vypínací charakteristika, což je závislost doby vypnutí na n násobku jmenovitého proudu spouště nebo relé: $t = f(nI_n)$.“ [6]

4.4.1 Popis

„Je to charakteristika časově závislá jak udává Obr. 4.4.1. Charakteristiky tepelných spouští a relé se měří vždy buď z teplého, nebo studeného stavu. První případ znamená, že příslušný prvek je ohřátý průchodem jmenovitého proudu, druhý případ předpokládá, že spoušť nebo relé je ochlazené na teplotu okolí.“ [6]

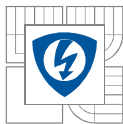


Obr. 4.4.1: Vybavovací charakteristika za studena a za tepla [6]

4.4.2 Vlivy okolí

Vybavovací charakteristika je funkcí teploty, proto je výrazně ovlivněna okolní teplotou.

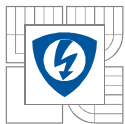
Aby došlo k vybavení obvodu, musí dojít k ohnutí bimetalu do takové míry, že bude sepnut vybavovací mechanismus. Míra ohnutí bimetalu je dána jeho specifickým teplotním zakřivením, které je funkcí teploty. Součástka tedy musí dosáhnout dostatečné teploty, aby došlo k vypnutí obvodu.



Změnou teploty okolí se změní hned dva parametry, které při oteplení vodiče hrají roli, jak vyplývá ze vzorce 2.1.2. První změnou je rozdíl teplot $\Delta\theta$, o který se bimetal musí oteplít, aby dosáhnul požadované teploty. Druhou změnou je teplota, ke které se vztahuje rozdíl $\Delta\theta$, ten přímo ovlivňuje množství energie vyzařené do okolí.

Budou-li se tedy předpokládat rozdílné teploty okolí T_1 a T_2 , pro které platí $T_1 < T_2$ a na které je bimetal ustálen. Platí, že při teplotě T_1 bude potřeba více energie na oteplení tepelné spouště a zároveň se během tohoto procesu vyzaří více energie do okolí než při teplotě T_2 . Při konstantním proudu I a téměř konstantním odporu součástky R je pro zachování platnosti rovnice 2.1.2 potřeba zvětšit dt , tedy čas po který bimetalem proud prochází.

Aby byly garantovány vybavovací časy jističe i při nižších než optimálních teplotách okolí, je potřeba změnit nastavení tepelné spouště nebo jeho jmenovitý proud.



5 JISTIČ 3VA1225

Rating bude prováděn na jističi siemens 3VA12. Jedná se o kompaktní výkonový jistič, který chrání před přetížením i zkratovými proudy. Kryt i nosná konstrukce kompaktních jističů je odlita z izolační hmoty a je spojená se zbylými částmi jističe do jednoho celku. [6]

Typ jističů 3VA1 slouží k ochraně:

1. Kabelového vedení.
2. Startérů motorů, kdy pomocí nastavitelné tepelné spouště lze přizpůsobit vybavovací schopnosti danému motoru.
3. Před dotykem živých částí nebo, pomocí měření reziduálního proudu.

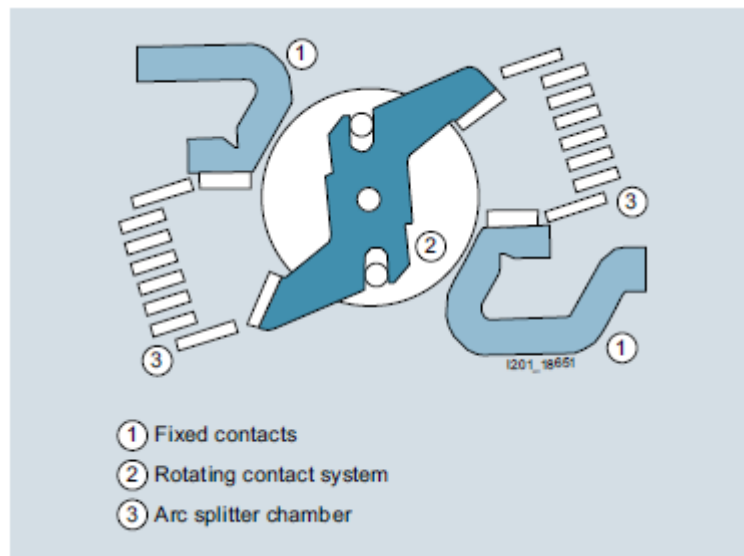
Lze je také použít pouze jako hlavní vypínače bez ochrany proti přetížení nebo zkratu. Tento typ nelze použít jako ochranu motorů nebo generátorů. [12]

5.1 Parametry

Tab. 5.1: Jmenovité parametry jističe 3VA12	
Parametr	hodnota
Jmenovitý proud I_n	160, 250 A
Jmenovité pracovní napětí U_e	690 V
Maximální pracovní napětí U_i	800 V
Maximální impulsní napětí U_{imp}	8 kV
Jmenovitý kmitočet	50/60 Hz
*Maximální vypínací schopnost I_{cu} / I_{cs}	
- pro 220-240 V střídavého napětí:	100/100 kA
- pro 380-415 V střídavého napětí:	70/70 kA
- pro 690 V střídavého napětí:	10/5 kA

*) I_{cu} udává proud, který musí jistič bezpečně vypnout. I_{cs} udává proud, který musí jistič bezpečně vypnout a zachovat si přitom svoji funkčnost.

Dobré vypínací schopnosti dosahuje jistič pomocí dvojitého rotačního kontaktu, který na základě popudu zkratové spouště rozpojí proudovodnou dráhu ještě předtím, než procházející proud dosáhne své nejvyšší hodnoty.



Obr. 5.1.1: Znáznornění rotačního kontaktu [12]

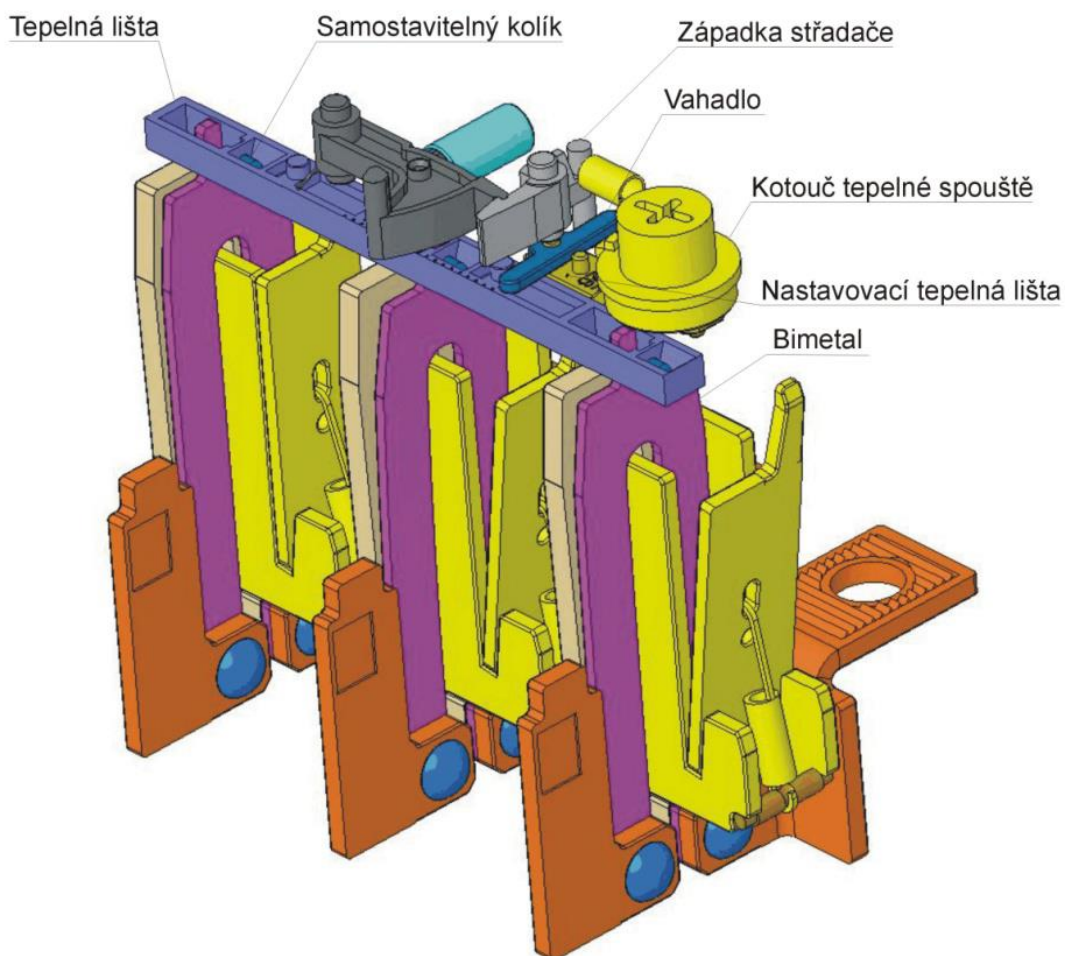
Dobrá schopnost zhášení oblouku při rozpojení proudovodné dráhy vlivem zkratu je dána tím, že oblouk se vytváří na obou koncích pohyblivého kontaktu. Zvýší se tak úbytek napětí na oblouku, což napomáhá jeho uhašení.

Udávaná životnost je 15000 mechanických sepnutí a 8000 sepnutí pod napětím. [12]

5.2 Princip funkce tepelné spouště

V situaci, kdy procházející proud je větší než jmenovitý, tedy při přetížení, dojde ke zvýšení teploty a tudíž i zakřivení bimetalu. Vlivem toho jeho konec zatlačí do tepelné lišty, která pomocí vahadla přenesení svůj posun na západku střadače. Ta po dostatečném vychýlení uvolní páku střadače, která rozpojí proudovou dráhu jističe. Uspořádání jednotlivých částí je ukázáno na následujícím obrázku 5.2.1.

Polohu tepelné lišty lze měnit pomocí kotouče tepelné spouště. Změnou polohy se mění i posuv tepelné lišty nutný k vybavení tepelné spouště. Lze tak nastavovat velikost jmenovitého proudu jističe. [13]



Obr. 5.2.1: Zobrazení principu tepelné spouště [13]

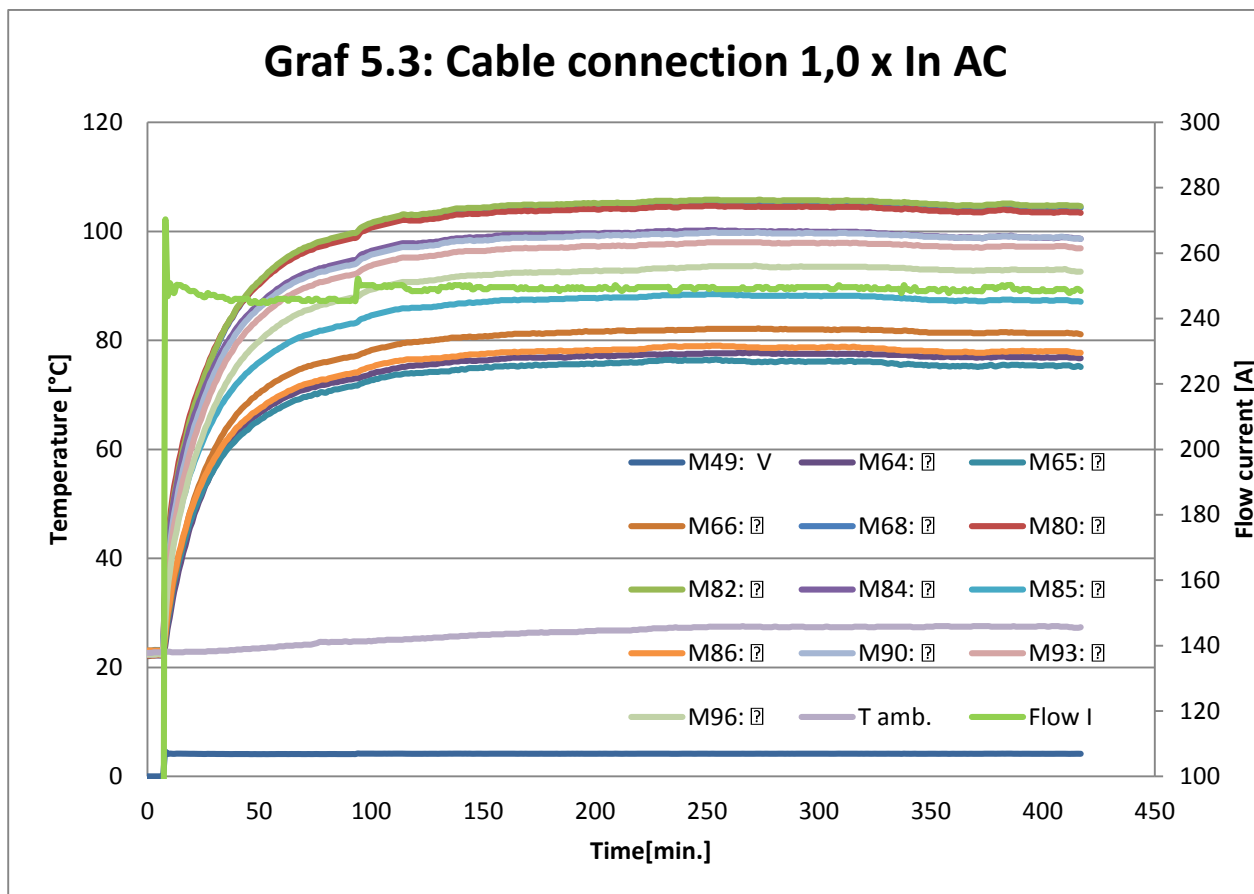
5.3 Oteplovací zkoušky

Na tomto typu jističů byly provedeny oteplovací zkoušky ve spolupráci se společností OEZ s.r.o. – Letohrad.

Jistič byl připevněn na podklad z ocelové desky. Přípojní kabely byly s proudovodnou dráhou spojeny šrouby, které byly utáhnuty momentem 20 Nm.

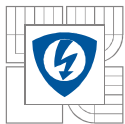
Při okolní teplotě 23-28 °C byly na kontrolních bodech změřené průběhy oteplení doku dnebylo dosaženo ustáleného stavu. Jistič se v ustáleném stavu nachází v momentě, kdy změna teploty během 1 hodiny není větší než 1 K.

Průběh oteplení a průchodu proudu je znázorněn v následujícím grafu.



V grafu je použité jiné značení kontrolních bodů, než bude použito v modelu. Označení jednotlivých bodů odpovídá:

- | | |
|-------------|-------------|
| - M64 = MP0 | - M90 = BM1 |
| - M66 = MP1 | - M93 = BM2 |
| - M80 = MP2 | - M96 = BM3 |
| - M68 = MP4 | |
| - M82 = MP5 | |
| - M84 = MP6 | |
| - M85 = MP7 | |
| - M86 = MP8 | |
| - M65 = MP9 | |



6 MODEL

Cílem této práce bylo zjistit, jak je potřeba změnit jmenovitý proud jističe, aby byla zajištěna správná funkce jeho tepelné spouště v prostředí s nižší okolní teplotou, než na kterou je přístroj dimenzován. Aby se tohoto cíle dosáhlo, byla od vedoucího bakalářské práce poskytnuta proudová dráha uvnitř jističe 3VA1225. Geometrie této dráhy bude namodelována v programu Solidworks a následně bude provedena simulace v rozšíření tohoto programu Flow Simulation.

Simulace ve Flow Simulation jsou prováděny metodou konečných objemů – MKO (anglicky finite volume method - FVM). Při této metodě se celý objem modelu i jeho okolí, určeném výpočetní doménou, rozdělí na jednotlivé krychle - objemy, pro které se zvlášť počítají veškeré potřebné parametry. Tyto parametry závisí na počátečních podmínkách a na vlivu okolních objemů, ze kterých se informace přenáší přes stěny.

Jelikož nebyla dodána výkresová dokumentace, bylo potřeba veškeré potřebné rozměry naměřit pomocí posuvného měřítka. Důsledkem chyby měření, tak není zaručena 100% shoda mezi namodelovanou a skutečnou proudovou dráhou.

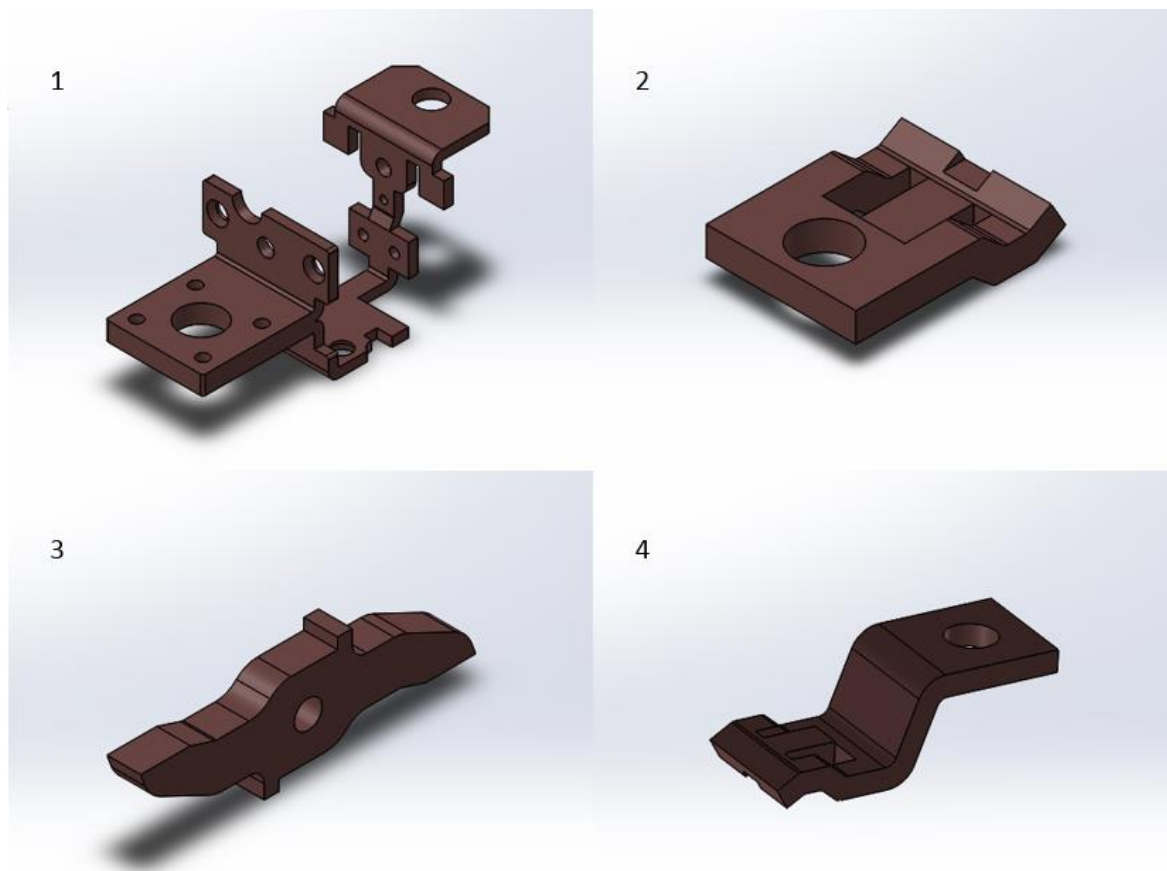
6.1 Konstrukce a použité materiály

Celou proudovodnou dráhu jističe lze rozdělit na 4 části:

1. Topítko, na kterém je umístěna zkratová a tepelná spoušť.
2. Spoj mezi topítkem a pohyblivým kontaktem.
3. Rotační pohyblivý kontakt.
4. Odvodní kontakt.

Materiálem pro základ všech čtyř částí byla zvolena měď, pro kontakty mezi částmi 2-3 a 3-4 byl použit materiál, jehož vlastnosti lze nalézt v tab. 6.1, totéž platí pro materiál přiřazený bimetalu.

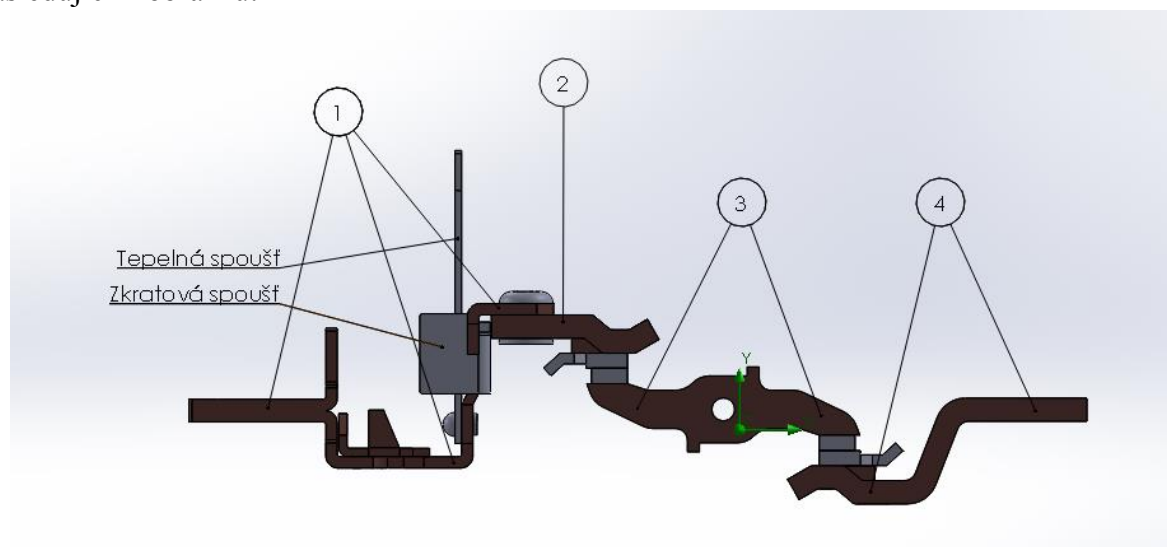
Všechny čtyři části proudovodné dráhy bez přidáných prvků jsou zobrazeny na následujícím obrázku:



Obr. 6.1.1: Jednotlivé části proudovodné dráhy

Geometrie zkratové spouště s jedním závitem byla částečně pozmeněna. Byla úplně vynechána její pohyblivá část, která by na výsledný model neměla významný dopad a jejím vynecháním se tak ušetří čas při kalkulaci simulace. Zkratové spouští společně se všemi spojovacími nýty použitými v modelu bylo jako materiál přiřazeno železo.

Vzhled celé proudovodné dráhy s kontakty, nýty, tepelnou a zkratovou spouští je znázorněn na následujícím obrázku:



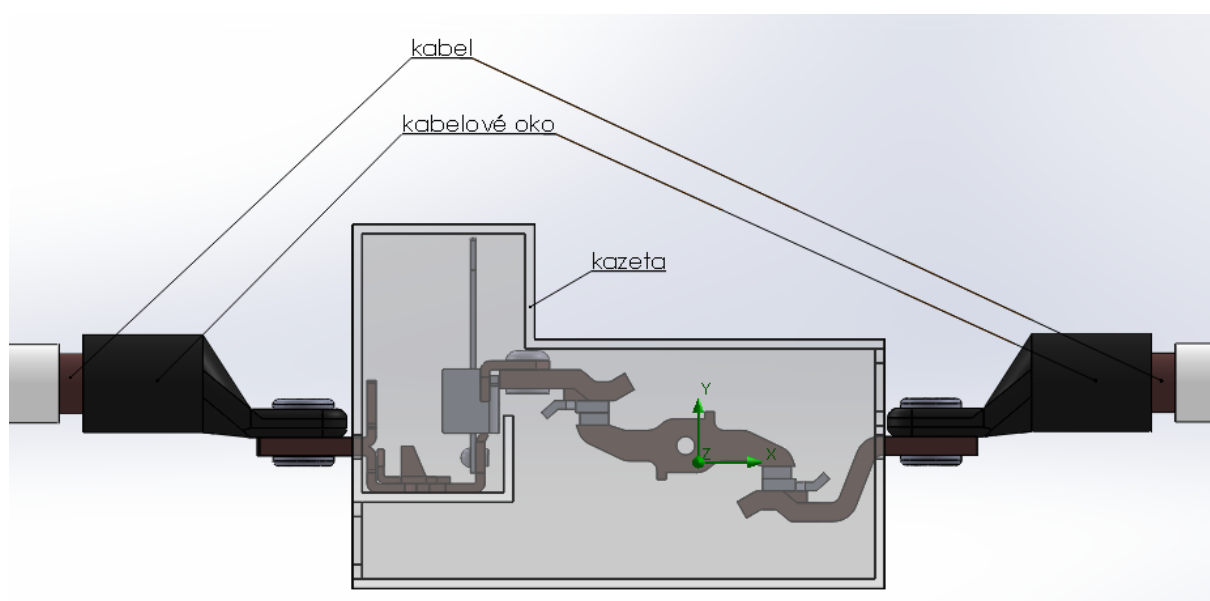
Obr. 6.1.2: Proudovodná dráha

Aby simulace lépe odpovídala reálné situaci použití přístroje, byly do modelu přidány další prvky.

Na přívodní a odvodní kontakt byl přes kabelové oko připojen kabel o délce přibližně 130cm a s průřezem 120mm². Krom zakončení u kabelového oka je celý kabel potažen PVC izolací o tloušťce 2 mm. Pro jádra kabelů a kabelová oka je použita měď.

Dále byla celá proudovodná dráha jističe uzavřena do plastové kazety s otvory pro připojení kabelu a pro průchod vzduchu.

Detail na proudovodnou dráhu výsledného modelu je zobrazen na následujícím obrázku:



Obr. 6.1.3: Model s přidanými částmi

Všechny dílčí části byly pospojované pomocí vazeb v programu Solidworks, tak aby byla zajištěna podoba, odpovídající reálné součástce.

Tepelné a elektrické parametry použitých materiálů:

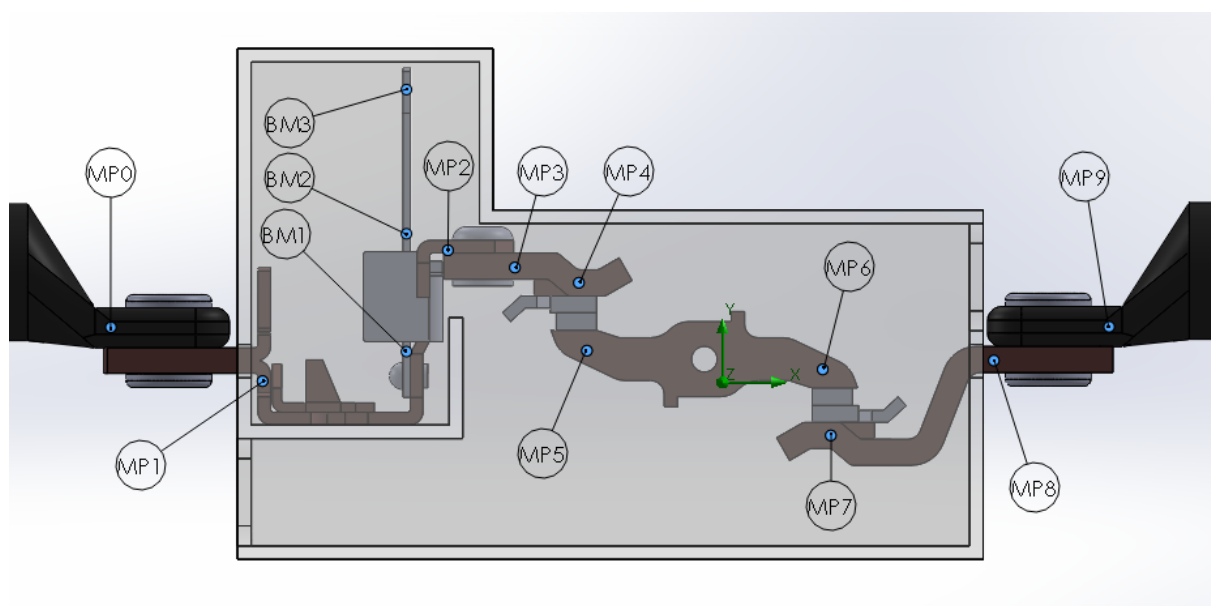
Tab. 6.1: Vlastnosti použitých materiálů						
	měď*	železo*	PVC	plast**	BM**	kontakt**
ρ [kg/m ³]	8960	7874	1300	1800	8000	8500
c [J*kg/K]	384	447	1355	837	460	180
λ [W/m*K]	401	80	0,147	0,3	90	430
ρ [Ω*m]	1,63E-08	1,01E-07	-	-	8,00E-08	2,17E-08

*) pro tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost a rezistivitu těchto materiálů se uplatňuje závislost na teplotě, jejich hodnoty v tabulce jsou uvedeny pro teplotu 25 °C

**) tyto materiály se nenachází v knihovnách programu solidworks, jejich parametry byly zvoleny na základě hodnot dodaných vedoucím práce

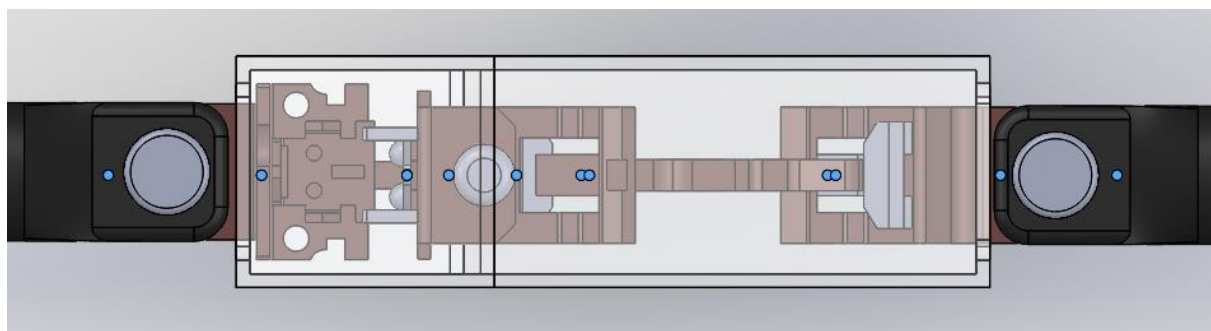
6.2 Kontrolní body:

Pro zajištění věrohodnosti simulací bude použita takzvaná inverzní metoda, kdy se budou porovnávat výsledky simulace s hodnotami měření, které byly naměřeny při oteplovacích zkouškách. Model je tedy potřeba upravit tak, aby výsledné hodnoty oteplení a úbytky napětí v kontrolních bodech simulace korespondovaly s hodnotami měření. Kontrolní body byly rozmístěny tak, aby co nejvíce odpovídaly pozici kontrolních bodů při oteplovací zkoušce. [11]



Obr. 6.2.1: Rozmístění kontrolních bodů

Hloubka umístění byla zvolena na střed proudovodné dráhy. Liší se tak od umístění termočlánku, které se nacházely na povrchu materiálu.



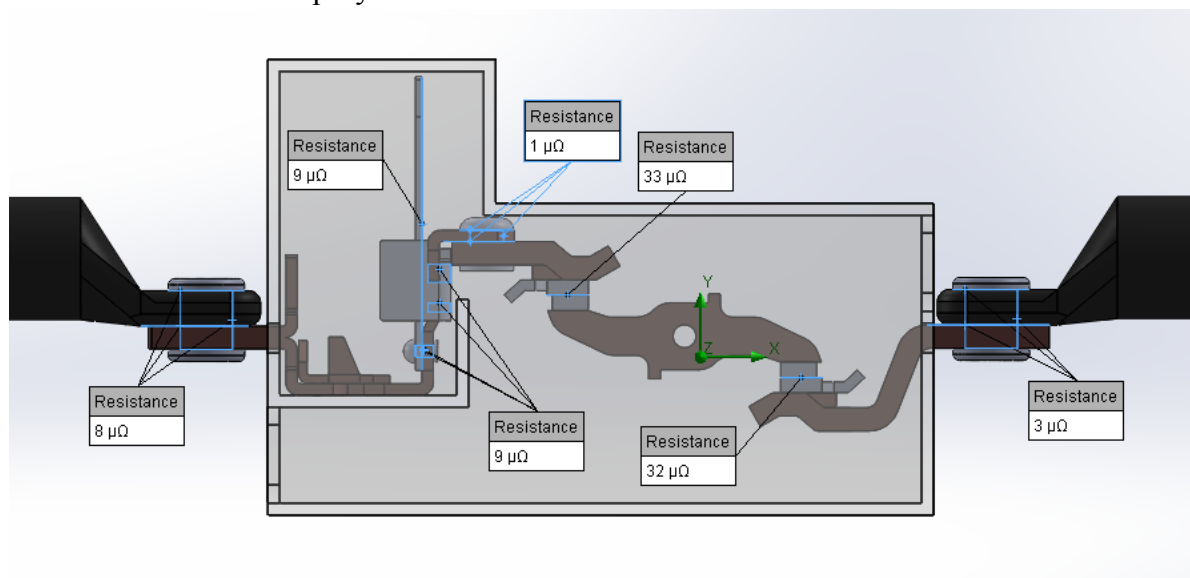
Obr. 6.2.2: Rozmístění kontrolních bodů v ose z

6.3 Úpravy modelu:

Oteplovací zkoušky byly provedeny při okolní teplotě 23-28 °C. Počáteční teplota materiálu a okolí modelu byla tedy zvolena 25 °C a procházející proud byl nastaven na jmenovitou hodnotu 250 A. Jelikož proud prochází i připojeným kabelem, musí se výsledné hodnoty upravit tak, aby byly úbytky napětí počítány od začátku proudovodné dráhy, tedy aby úbytky napětí na kabelu nebyly počítány.

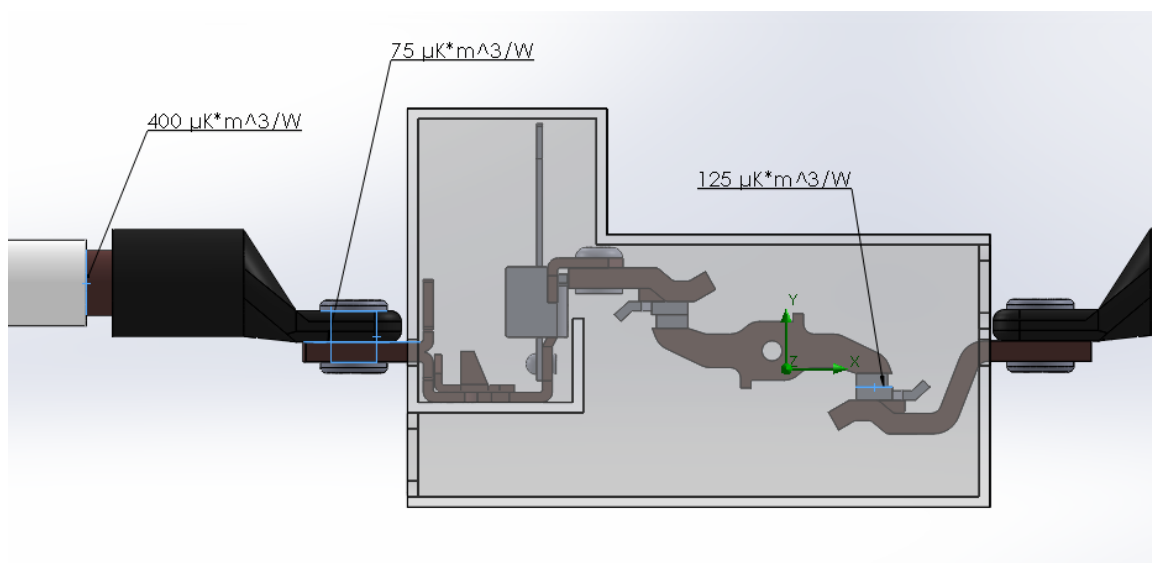
Program vyhodnocuje dotýkající se části jako jednu část, ve skutečnosti ovšem mezi dotýkajícími se částmi vzniká přechodový odpor a to tepelný i elektrický. V další fázi je tedy potřeba tyto přechodové odpory implementovat do modelu. Jejich velikost je těžko určitelná a na jejich přibližné hodnoty je potřeba přijít postupnými optimalizacemi modelu.

Použité elektrické odpory:



Obr. 6.3.1: Zobrazení elektrických odporů, které byli přidány do modelu

Použité tepelné odpory:



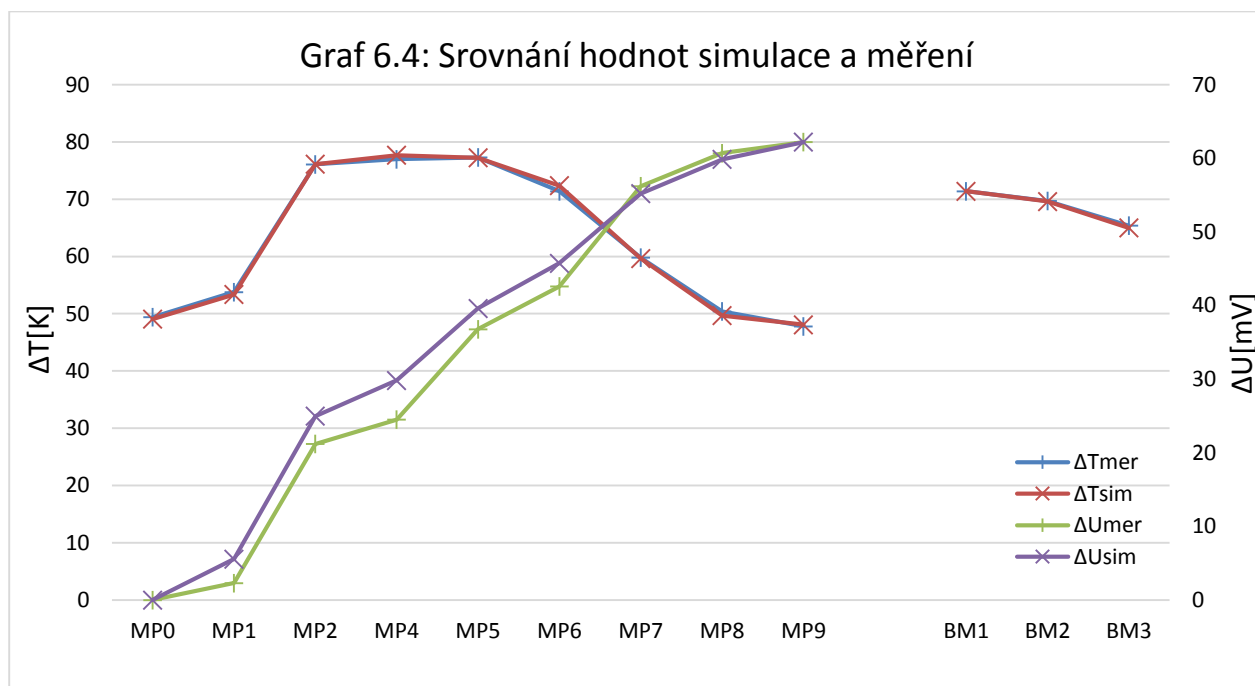
Obr. 6.3.2: Zobrazení tepelných odporů v modelu

6.4 Výsledná simulace:

Rozdíl mezi hodnotami vypočtenými simulací a hodnotami naměřenými by měl být co nejmenší. Ve výsledné simulaci bylo dosaženo přesnosti, kdy rozdíly oteplení v každém bodě byly menší než 1 K a rozdíl celkového úbytku napětí do 1 mV.

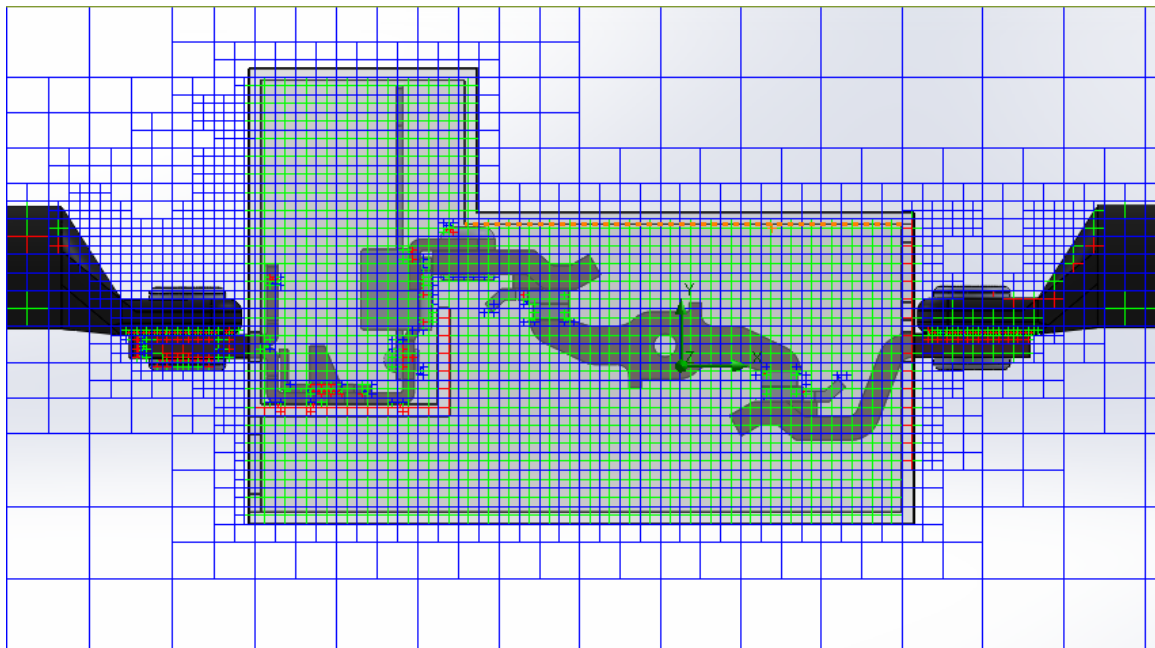
Plastová kazeta použitá v modelu je velmi zjednodušená a neodpovídá té, která je použita v jističi. Rozdílné chlazení v simulaci a při měření, způsobené touto nepřesností, mělo za následek nemožnost shody oteplení i úbytku napětí v každém bodě. Použitím odporů, při kterých seděly úbytky napětí ve všech bodech, bylo oteplení, zejména v bodech MP4-7, vyšší než požadované. Odpory byly tedy pozměněné, aby odpovídalo oteplení, které je pro tuto práci podstatnější.

Porovnání jednotlivých hodnot výsledné simulace a měření naleznete v následujícím grafu:



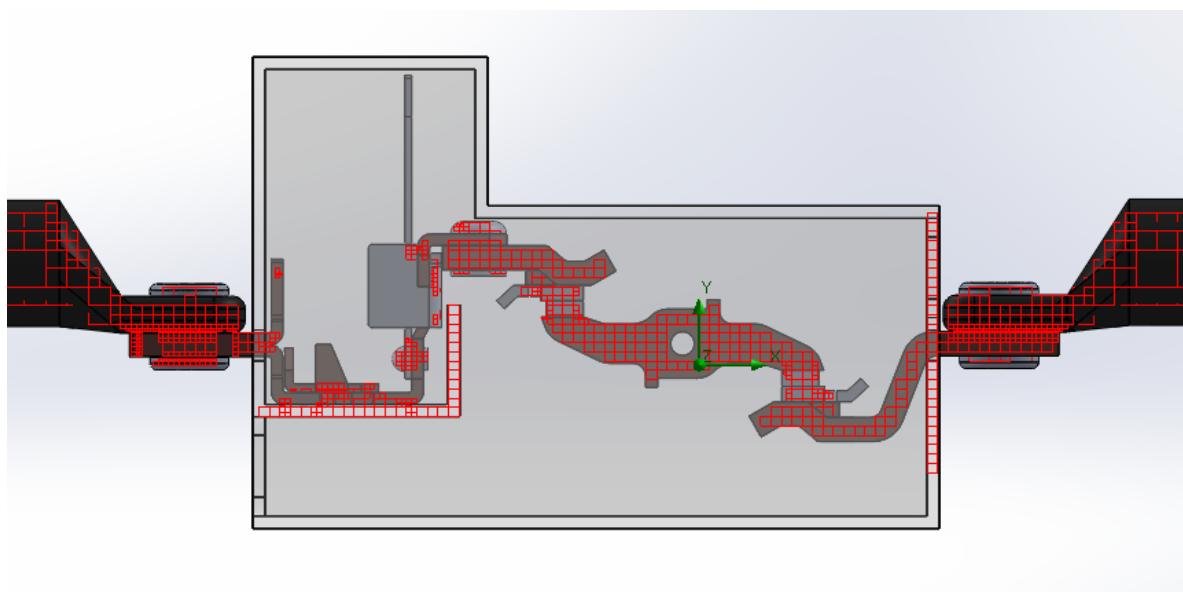
Kontrolní bod MP3 byl použit při jiných měřeních. V provedené oteplovací zkoušce nebyla v tomto bodě měřena teplota ani úbytek napětí, proto v grafu 6.4 chybí.

Dostáváme tak zoptimalizovaný model, ze kterého se bude nadále vycházet při samotném reratingu. Výsledná výpočetní síť má 99351 kontrolních objemů, z toho 56752 jich je tekutého objemu, 7095 je pevného objemu a 35504 jich je smíšeného objemu. Tuto síť si můžete prohlédnout na následujícím obrázku.



Obr. 6.4.1: Výpočetní síť

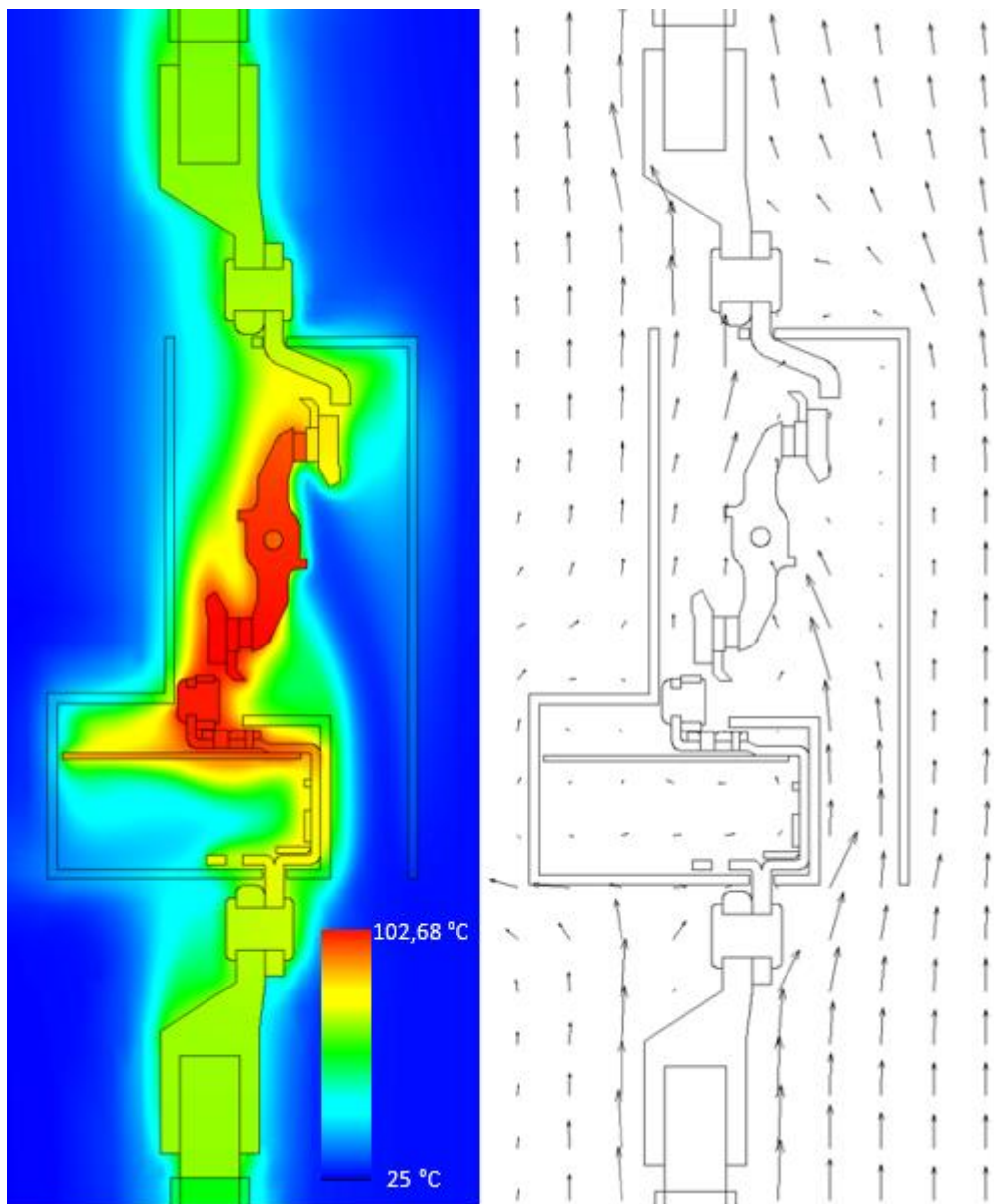
Každý čtverec, který vidíte, je přední stranou jednoho výpočetního objemu. Modré jsou tekutého objemu, červené pevného objemu a zelené smíšeného objemu. Obr. 6.4.1 a obr. 6.4.2 jsou jen ilustrativní, celá výpočetní síť má několik vrstev do hloubky a její celé zobrazení by bylo zmatené.



Obr. 6.4.2: Výpočetní síť pevných objemů

Z výše uvedeného obrázku vyplývá, že pevné objemy se nenachází po celé proudovodné dráze. Vynechaná místa jsou vyplněna smíšenými objemy, kdy program počítá s vlastnostmi jak pevných i tekutých látek.

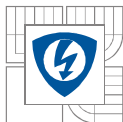
Některé výsledky simulace lze zobrazit například v řezu modelem, vedeném středem rotačního spouště. Veškeré obrázky byly pro názornost natočeny, aby gravitační síla mířila směrem dolů, tedy v záporném směru osy x.



Obr. 6.4.3: Zobrazení teploty a vektorů proudění vzduchu výsledné simulace

Z obrázku je patrné, že nejvíce se zahřívá část mezi zúženou částí topítka a koncem pohyblivého kontaktu. Je zde také vidět, že prvky přidávané do modelu mají velkou roli na průběh simulace.

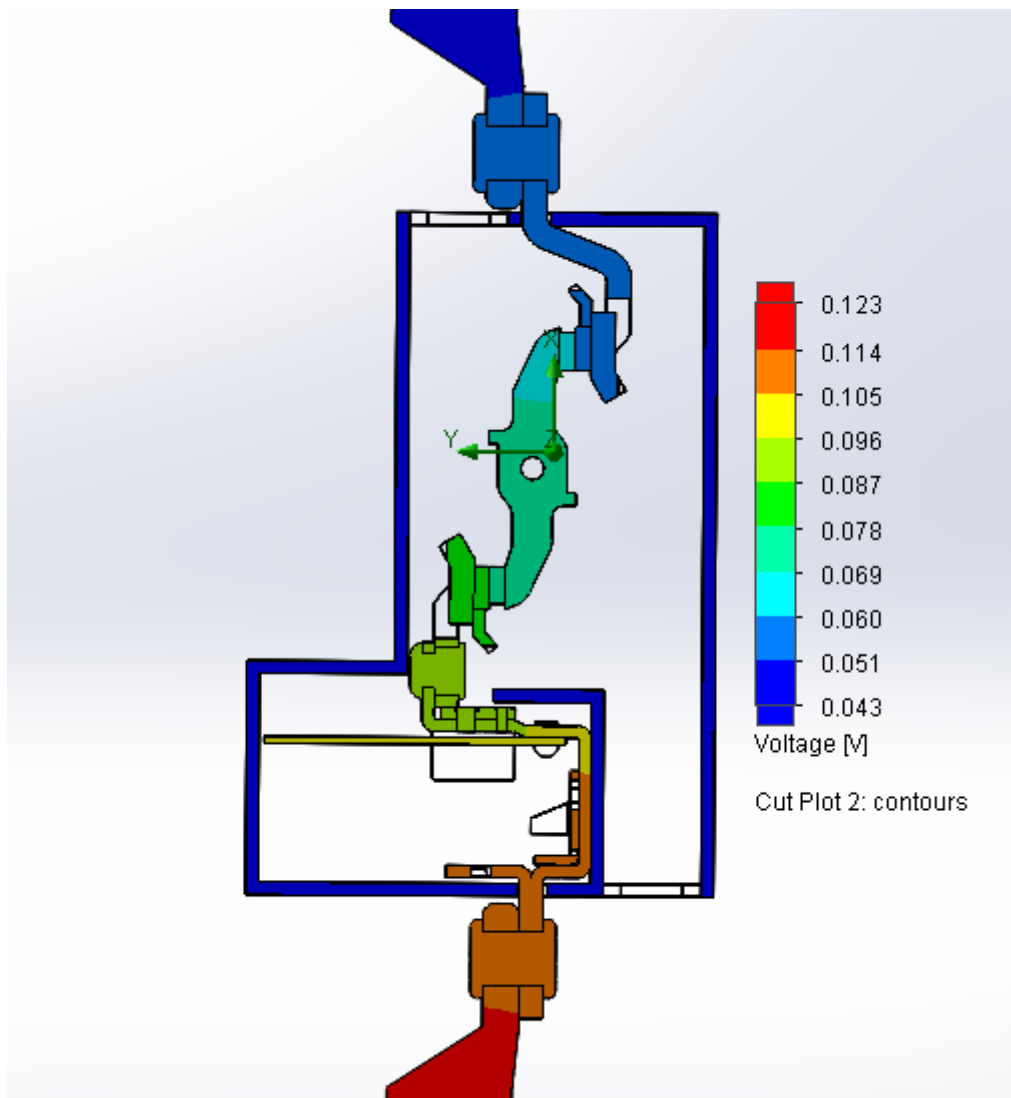
Plastová kazeta má razantní dopad na přirozené proudění vzduchu, které je přímo spojené s účinností chlazení. Vliv velikosti a umístění vzduchových otvorů, lze pozorovat na samotných hodnotách oteplení v jednotlivých bodech, kdy oteplení na začátku pohyblivého kontaktu MP5 je o 5 K vyšší, než oteplení na jeho konci v bodě MP6.



Další demonstrací tohoto jevu je i porovnání oteplení v bodech MP4 a MP7, které se liší o 18 K. Tento rozdíl je ovšem ovlivněn i jinými prvky, než jen prouděním vzduchu. I když jsou do oblasti v okolí bodu MP4 vloženy vyšší odpory, jejich dopad nebude tak veliký v porovnání s teplem, které se do této oblasti šíří z topítka.

Kabely s kabelovými oky významně ochlazují celý model tím, že slouží jako *heat sink*. I když jimi protékající proud do jisté míry otepluje jak jádro, tak i izolaci kabelu, je výsledná teplota podstatně nižší, než teploty v modelu. Teplo se tak z modelu šíří do kabelu, který jej pak snáze předá okolnímu vzduchu.

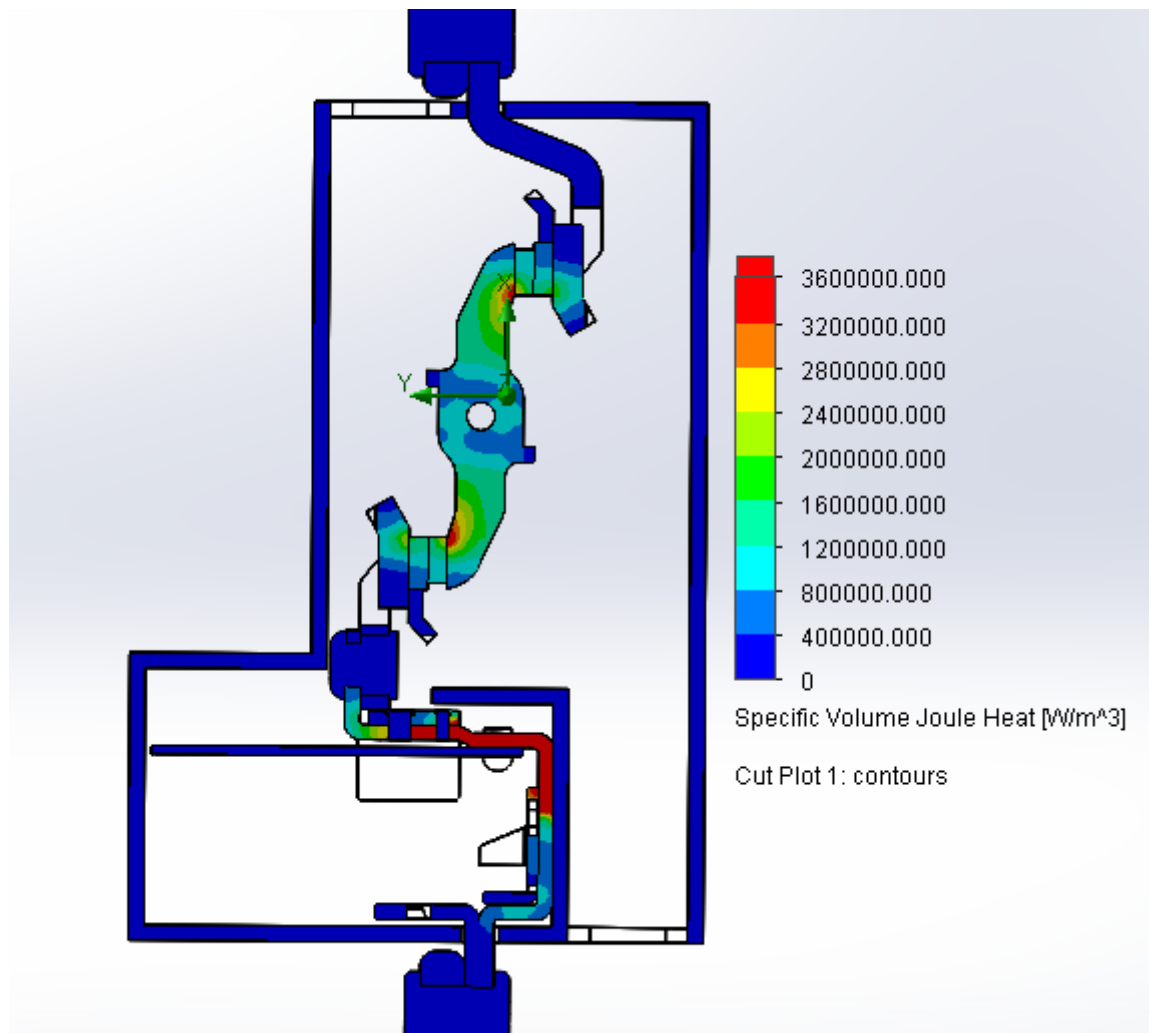
Dále lze vidět, jak na model měly dopad implementované tepelné odpory. Názorné to je zejména na kontaktech 3. a 4. části, kdy odpor zabraňuje přechodu tepla z pohyblivého kontaktu do odvodního kontaktu. Důsledkem je velký rozdíl mezi oteplením v bodě MP6 a MP7, jehož hodnota je přibližně 12,5 K i přes to, že vzdálenost mezi body je velmi malá. Podobný náhlý rozdíl teplot lze sledovat i v dolní části obrázku na kabelu, kde byl přidělen tepelný odpor $400 \mu\text{K m}^3/\text{W}$, který tak do jisté míry zabraňuje přechodu tepla do jádra kabelu.



Obr. 6.4.4: Úbytky napětí rozložené na proudovodné dráze

Úbytky napětí jsou rozprostřeny po celé proudovodné dráze, s největšími úbytky na topítku a přechodových odporech pohyblivého kontaktu. Minimum a maximum barevného rozlišení bylo navoleno tak, aby byly názorně vidět změny potenciálu od bodu MP0 do bodu MP9. Z obrázku vyplývá, že úbytek napětí na proudové dráze měl hodnotu 63 mV. Přesná hodnota celkového úbytku napětí na jističi byla ve výsledné simulaci naměřena 62,26 mV.

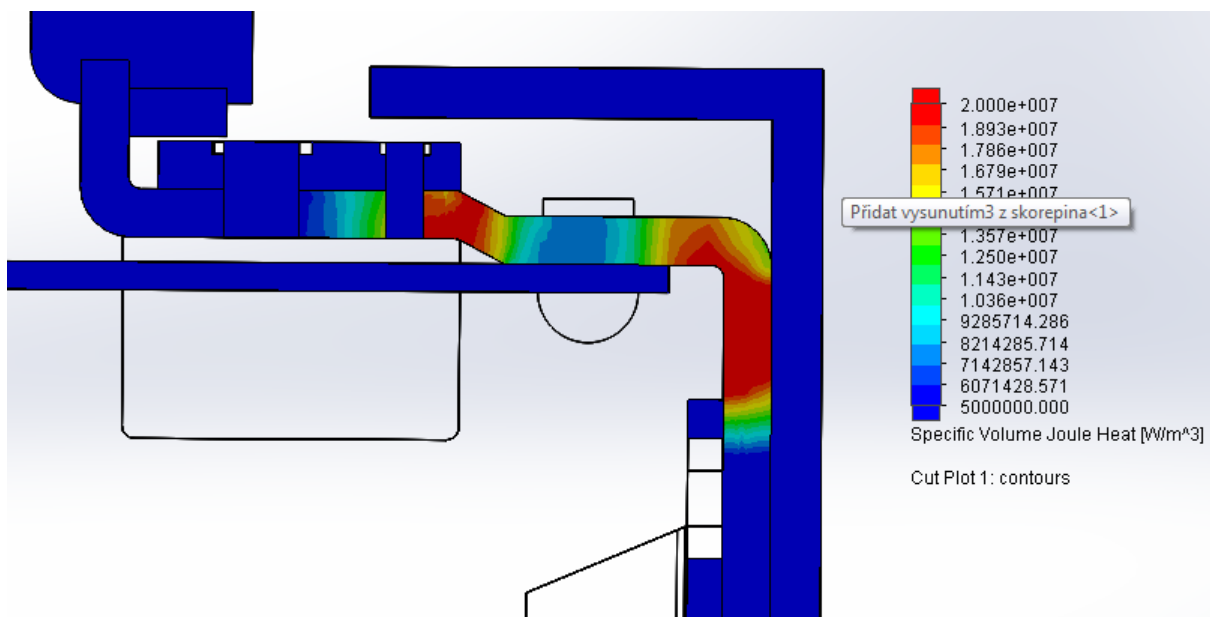
V oblasti od zúžené části topítka po konec pohyblivého kontaktu, je naměřen úbytek napětí přibližně 45mV, tedy 72 % z celkového úbytku. Tomu odpovídá i obr. 6.4.3, kde je v této oblasti naměřena také nejvyšší teplota.



Obr. 6.4.5: Jouleovy ztráty v objemu proudovodné dráhy

Tento obrázek znázorňuje pouze ztráty v objemu, ztráty způsobené přechodovými odpory se v něm nezobrazují. Můžeme si všimnout, že většina těchto ztrát vzniká, v k tomu určené, zúžené části topítka, která se nachází blízko tepelné spouště. Dochází tak k dobrému přenosu tepla na bimetal.

Rozdíl mezi ztrátami v topítku a ve zbytku proudovodné dráhy je více jak pětinasobný, v přepočtu na objem. Toho si můžete všimnout na detailu ztrát v zúžené části na obr. 6.4.6. Objem materiálu v zúžené části topítka ovšem není příliš velký, takže rozdíl v celkovém množství generovaného tepla nebude natolik markantní.



Obr. 6.4.6: Detail Jouleových ztrát v topítku

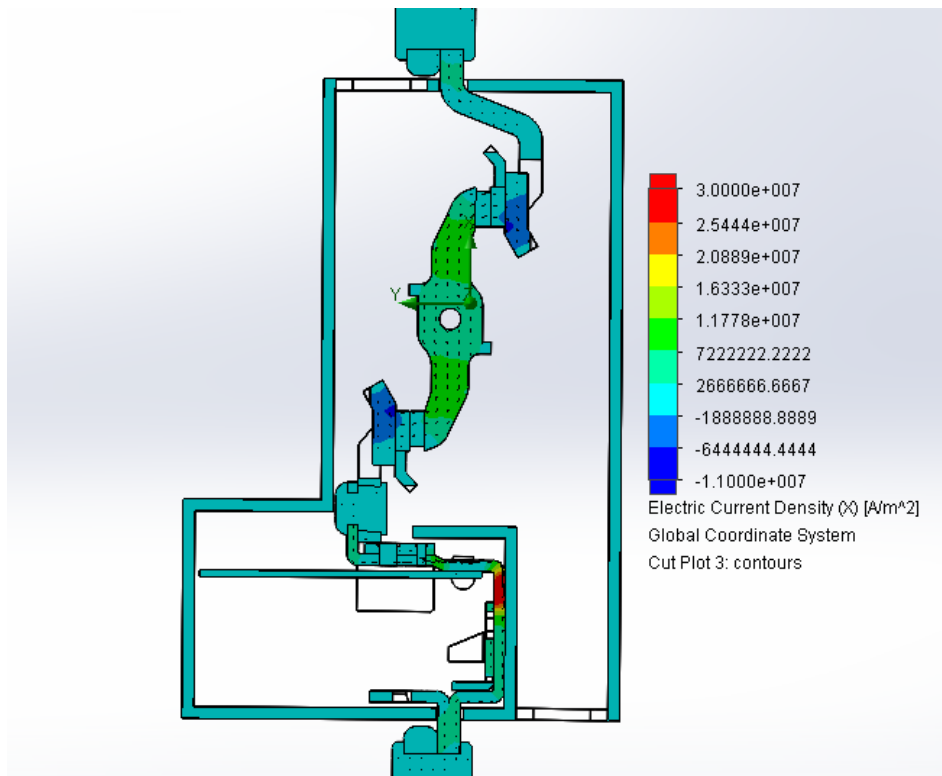
Z tohoto detailu vyplývá, že v rozšířené části, kde je připevněna tepelná spoušť nedochází k velkým jouleovým ztrátám a v samotném bimetalu jsou ztráty téměř nulové. Oteplení tepelné spouště není tak generováno samotným průchodem proudu součástkou.

Hlavním zdrojem tohoto tepla bude pravděpodobně vedení tepla v kovu, kdy se teplo na patu bimetalu přenesou z míst s velkými ztrátami. Zejména pak ze zúžené části topítka a z přechodových odporů na koncích pohyblivém kontaktu. Z paty bimetalu se teplo vedením rozšíří po celé jeho délce.

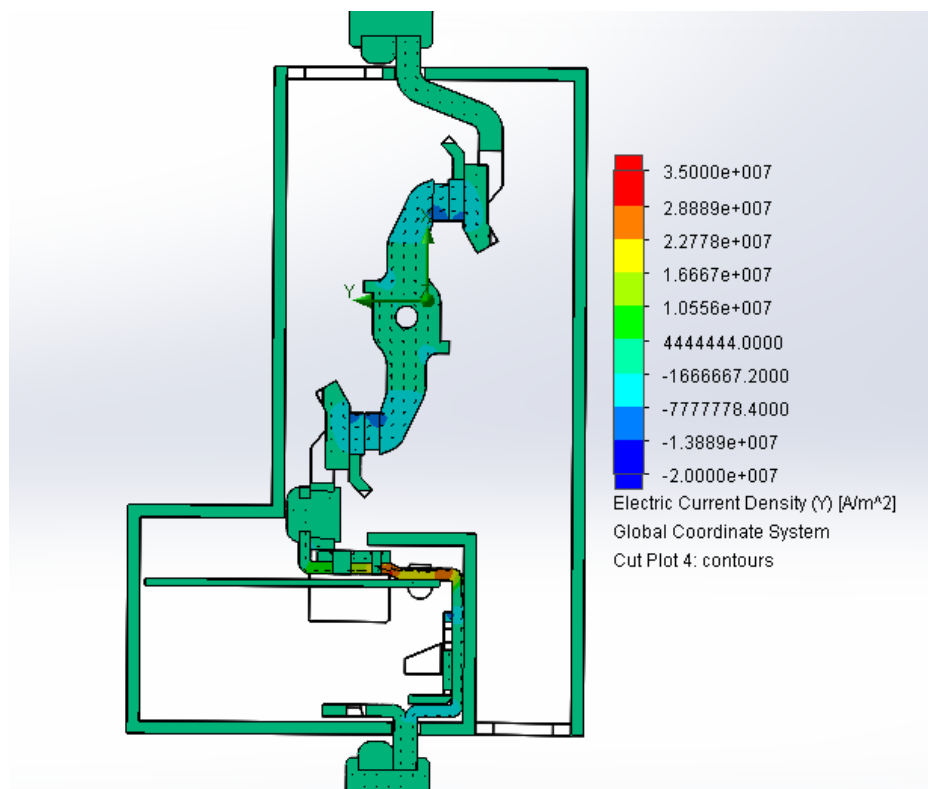
Z obr. 6.4.3 také vyplývá, že teplota vzduchu ve vzduchové mezeře mezi bimetalem a oblastí topítka, kde je připevněna zkratová spoušť, je vyšší než teplota samotného bimetalu. Dalším zdrojem tepla je tak jeho přenos přes vzduchovou mezeru.

V modelu má na teplotu vliv i nastavená emisivita prostředí. Když byla nastavena emisivita na hodnotu 1, která odpovídá absolutně černému tělesu, bylo oteplení ve všech kontrolních bodech menší než požadované. Z tohoto důvodu byla emisivita, ve výsledné simulaci, změněna na více odpovídající hodnotu 0,76 zoxidované mědi. Tato hodnota ovšem také plně neodpovídá skutečné hodnotě, protože všechny 4 části proudovodné dráhy byly pokoveny technickým stříbrem, skutečná hodnota emisivity bude tedy menší, než která byla použita v modelu.

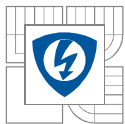
Dále si zobrazíme proudovou hustotu v modelu. Program ovšem dokáže zobrazit proudovou hustotu pouze v určeném směru. Zobrazíme si jej tedy ve směru osy x a y .



Obr. 6.4.7: Proudová hustota v ose X

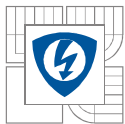


Obr. 6.4.8: Proudová hustota v ose Y



Záporné hodnoty v obrázcích 6.4.7-8 označují velikost proudové hustoty proti vytyčenému směru. Vektory v těchto místech mají opačnou orientaci proti vektorům v oblastech s kladnými hodnotami. Jejich vliv na výsledný model je ovšem způsoben velikostí těchto vektorů, nikoliv jejich směrem, program tak počítá s absolutními hodnotami proudové hustoty v jednotlivých částech.

Nejvyšší proudová hustota byla podle očekávání naměřena v zúžené části topítka a na koncích pohyblivého kontaktu. Poměrně překvapivá je proudová hustota v pohyblivém kontaktu, následkem čehož jsou zde generované zbytečné ztráty. Tyto ztráty by se daly redukovat zvětšením této části, tedy zvýšením průřezu proudovodné dráhy. Změna by ovšem měla za následek i zvýšení hmotnosti pohyblivé části a tím patrně i snížení rychlosti rozpojení proudovodné dráhy v případě zkratové poruchy.



7 RERATING SPÍNACÍHO PŘÍSTROJE:

Přístroj má jmenovitý proud 250 A dimenzovaný na okolní teplotu 50 °C. Oteplovací zkouška však byla prováděna při teplotách 23-28 °C, takže nejsou k dispozici přesné hodnoty teploty jističe při jmenovitých podmínkách. Aby bylo dosaženo přibližné hodnoty konečné teploty při 50°C, bude se vycházet z hodnot oteplení, které vyšly ve výsledné simulaci.

Další problém nastává, když se při rozdílných teplotách okolí mění i rozdíly oteplení mezi jednotlivými kontrolními body. Body MP0, MP1, MP8 a MP9 se nacházejí vně plastové kazety a jejich chlazení je tak výraznější, než u zbývajících bodů nacházejících se uvnitř kazety. Musíme se tedy rozhodnout, kterým bodům dáme přednost a budeme se snažit upravit proudy tak, aby konečná teplota odpovídala právě v těchto bodech na úkor ostatních.

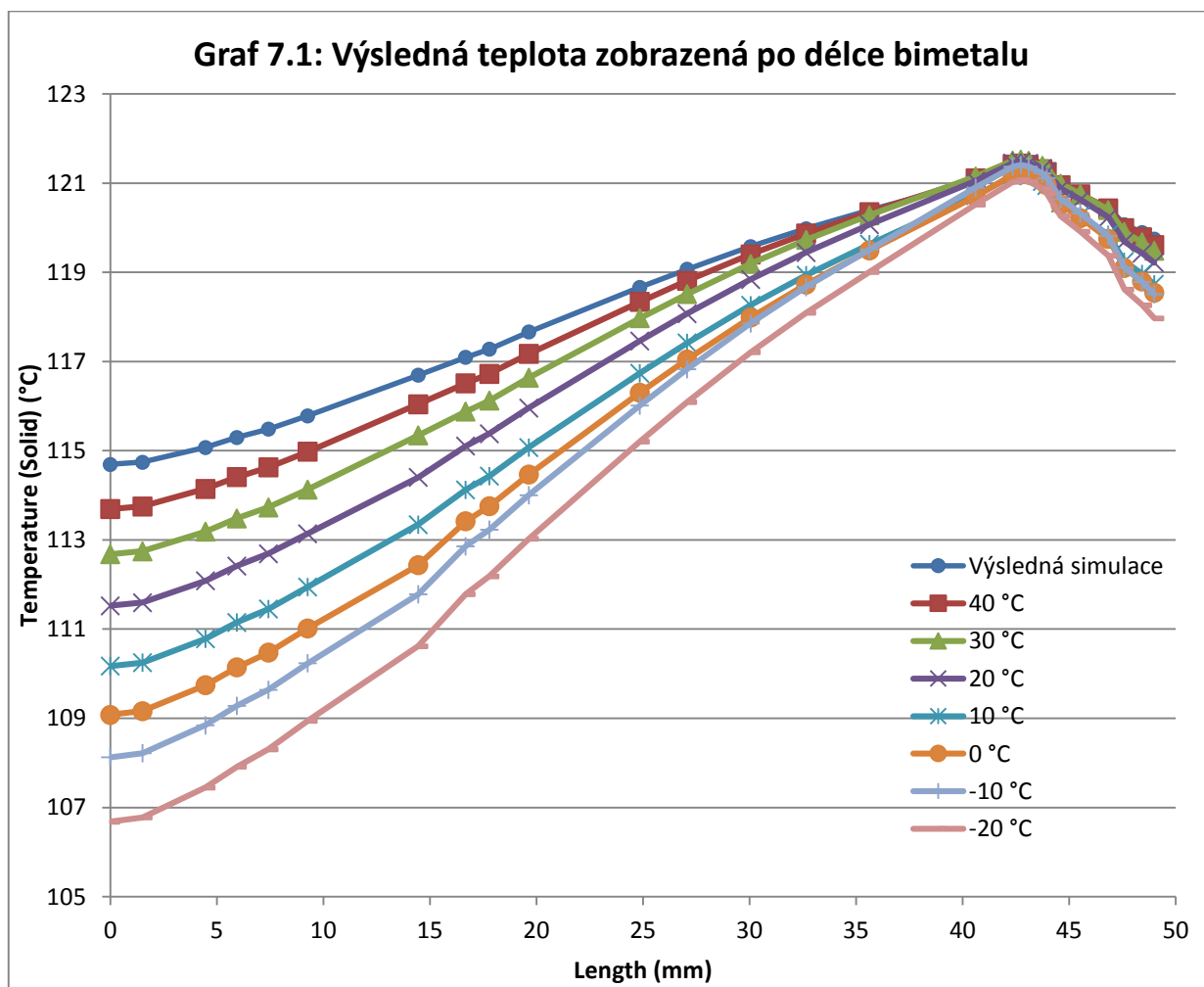
Pro správnou funkci tepelné spouště je nejdůležitější teplota u paty bimetalu, protože změny zakřivení v místě ukotvení se projeví nejvíce na pozici konce součástky. Jako referenční bod byl zvolen BM1. Vezme-li se hodnota oteplení v bodě BM1, z výsledné simulace 71,34 K a přičte-li se k ní jmenovitá teplota okolí 50 °C, bude výsledná teplota, které je v bodě BM1 potřeba dosáhnout, mít hodnotu 121,34 °C. Toho se docílí zvýšením procházejícího proudu.

V katalogu jističe je uvedeno, že rozsah provozních teplot, na které jsou jističe tohoto typu konstruovány, je od -25 °C do 70 °C. Je tedy potřeba najít korekční koeficienty jmenovitého proudu pro teploty okolí 40, 30, 20, 10, 0, -10 a -20 °C. [12]

7.1 Výsledky:

Postupnými změnami proudu pro výše zmíněné teploty okolí bylo dosaženo výsledků, kdy se konečné teploty v bodě BM1 od sebe lišily o méně než 0,5 °C.

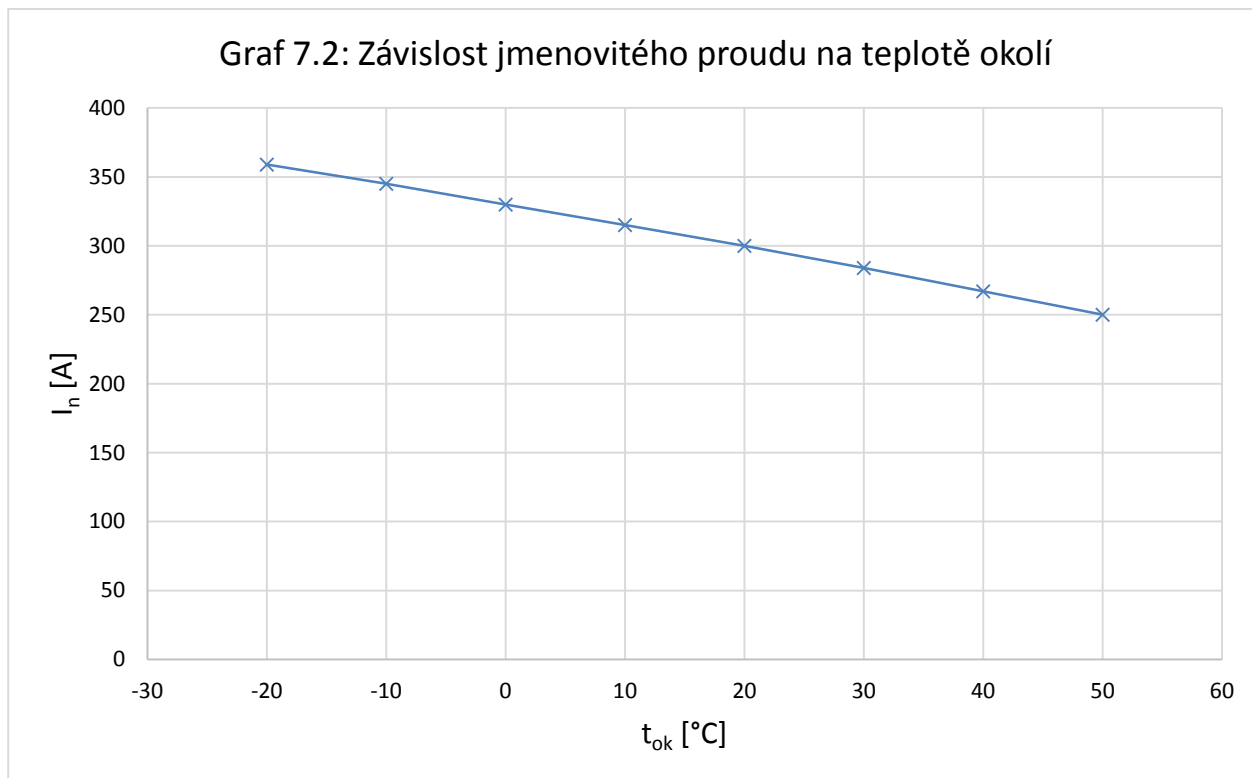
Pro zobrazení teploty, napříč celým bimetalem, byla v jeho středu načrtnuta čára, na které byly zobrazeny teploty v závislosti na délce. Výsledné grafy pak byly spojeny do jednoho:



Na ose x je zobrazena vzdálenost od špičky bimetalu. Uchycení k proudovodné dráze, se nachází přibližně ve vzdálenost od 42 do 49 mm.

Jak lze vidět, cílená shoda teplot byla směřována do kolene charakteristiky. Je zde také patrné, že čím nižší je teplota okolí, tím více se bimetal ke konci ochlazuje. To je způsobeno patrně tím, že součástka oproti proudovodné dráze vyčnívá do okolí. Vzduch proudící kolem výčnělku plastové kazety okolo bimetalu, tak účinněji odvádí teplo z této oblasti.

Další graf zobrazuje charakteristiku závislosti výsledného jmenovitého proudu na teplotě okolí.

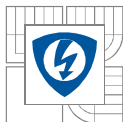


Charakteristika není lineární, napovídá tomu i vzorec 2.1.4, který popisuje ustálený stav oteplení, způsobené procházejícím proudem.

$$R * I^2 = \alpha_0 * S * \Delta\vartheta_{max} \quad (2.1.4)$$

Za předpokladu neměnnosti parametrů R , α_0 a S , by pak na dvojnásobnou hodnotu oteplení nad teplotu okolí bylo potřeba jen $\sqrt{2}$ násobek proudu. Charakteristika by tak měla mít exponenciální tvar.

Náznak exponenciální charakteristiky lze pozorovat, ale není tak výrazný, jaký by měl být. To je způsobeno tím, že bimetal není zahříván přímo procházejícím proudem, ale teplem, které se na něj přeneslo z proudovodné dráhy. Kdyby byl jmenovitý proud dimenzován, aby shodné teploty bylo dosaženo v některém z bodů proudovodné dráhy, byla by exponenciála výraznější.



Výsledné hodnoty jmenovitého proudu pro zvolené teploty okolí, korekční koeficienty a ustálené teploty v bodě BM1, získané ze simulací jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 7.1: Rerating, simulace			
t_{ok} [°C]	I_n [A]	k [-]	t_{BM1} [°C]
50	250	1	121,34
40	267	1,068	121,44
30	284	1,136	121,52
20	300	1,2	121,47
10	315	1,26	121,19
0	330	1,32	121,21
-10	345	1,38	121,39
-20	359	1,436	121,05

7.2 Porovnání výsledků

Z manuálu pro jistič 3VA12 byl získán vzorec pro výpočet korekčních koeficientů v závislosti na okolní teplotě:

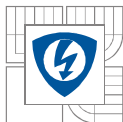
$$TK(t_{ok}) = \frac{K \cdot (50 - t_{ok})}{100} + 1 \quad (-) \quad (7.2.1)$$

Kde:

- **TK** je korekční koeficient (-)
- **K** je korekční faktor, pro jistič 3VA12 a jmenovitý proud 250 A má hodnotu 0,54 (-)
- **t_{ok}** je teplota okolí (°C)

Pomocí těchto korekčních koeficientů se potřebný proud vypočítá pomocí:

$$I_n = 250 \cdot TK \quad (A) \quad (7.2.2)$$

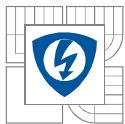


Výsledkem je tabulka pro rerating s hodnotami z manuálu:

Tab. 7.2.1: Rerating, manuál		
t_{ok} [°C]	I_n [A]	TK [-]
50	250	1
40	263,5	1,054
30	277	1,108
20	290,5	1,162
10	304	1,216
0	317,5	1,27
-10	331	1,324
-20	344,5	1,378

Dále je uvedena tabulka s porovnáním výsledných proudů vypočtených z manuálu a proudů získaných ze simulací a jejich relativní chyba:

Tab. 7.2.2: Porovnání			
t_{ok} [°C]	$I_{n,man}$ [A]	$I_{n,sim}$ [A]	δI [%]
50	250	250	0,00
40	263,5	267	1,31
30	277	284	2,46
20	290,5	300	3,17
10	304	315	3,49
0	317,5	330	3,79
-10	331	345	4,06
-20	344,5	359	4,04



8 ZÁVĚR

Za účelem reratingu jističe 3VA12, byla dodána proudovodná dráha s dotykovými kontakty, tepelnou a elektromagnetickou spouští. Geometrii bylo potřeba naměřit pomocí posuvného měřítka a následně vytvořit její model v programu Solidworks. Do modelu tvořeného 17 částmi, byly následně přidány spojovací prvky, kabelové připojení a plastová kazeta. Výsledný model byl vytvořen z 29 jednotlivých částí, pospojovaných vazbami programu Solidworks.

Do proudové dráhy modelu bylo vloženo celkem 13 kontrolních bodů, ve kterých se vypočetlo oteplení a úbytek napětí. Dále bylo na některé dotykové plochy v modelu přidáno 7 elektrických odporů a 3 tepelné odpory.

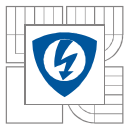
Výsledná simulace byla provedena při okolní teplotě 25 °C a jmenovitém proudu 250 A. Největší rozdíl hodnot oteplení, naměřených při oteplovací zkoušce a hodnot vypočtených při simulaci, byl v kontrolním bodě MP6 a to do 1 K. Nejmenšího rozdílu oteplení bylo dosaženo v bodech MP2 a BM1 a to do 0,1 K. Rozdíl celkového úbytku napětí na jističi byl do 0,1 mV.

Pro rerating přístroje byl jako výchozí zvolen bod BM1 a jeho výsledná teplota 121,34 °C, která byla získána součtem hodnoty oteplení v bodě BM1 ve výsledné simulaci a optimální teploty okolí přístroje 50 °C.

Následně byla provedena řada simulací s teplotou okolí 40, 30, 20, 10, 0, -10 a -20 °C a s pozměněnou hodnotou procházejícího proudu. Velikost proudu byla volena, aby ustálená teplota v bodě BM1 byla přibližně 121,34 °C.

Výsledné velikosti proudů a z nich vypočtené korekční koeficienty, jsou vypsány v tab. 7.1. Nejvyšší hodnota proudu byla nastavena při teplotě okolí -20 °C na 359 A, nejvyšší korekční koeficient má tak hodnotu 1,436.

Porovnáním s hodnotami vypočtenými pomocí manuálu jističe, se získá chyba pohybující se mezi 1,31 % u teploty okolí 40 °C a 4,06 % u teploty okolí -10 °C. Obecně platí, že chyba se zvyšuje v závislosti na rostoucí odchylce okolní teploty od 50 °C. Velikosti jednotlivých proudů jsou uvedeny v tab. 7.2.2. Chyba byla pravděpodobně způsobena výpočetní chybou programu Solidworks a odchylkou geometrie reálného jističe a modelu.



LITERATURA

[1] BUŠOV, Bohuslav. *Učební texty – Elektrické přístroje (BEPR)* [Elektronické učební texty]. [cit. 2016-01-04].

[2] KOBRLE, Pavel. *Elektrické přístroje (PB116, KB 116, BK 116)* [online]. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2014 [cit. 2016-01-04].

[3] ŠIC, P. *Dimenzování proudovodné dráhy elektrických přístrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 59 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

[4] Jističe. In VŠB - TU OSTRAVA. *Silnoprúdová elektrotechnika*. [s.l.] : [s.n.], 2006 [cit. 2010-05-12]. Dostupné z WWW: <feil.vsb.cz/kat453/www453/>. 453-512/1.

[5] KONŠEL, Ladislav. *JISTENÍ VEDENÍ PROTI PŘETÍŽENÍ A ZKRATU* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 46s [cit. 2016-01-04]. Vedoucí bakalářské práce Ing. JIŘÍ VALENTA, Ph.D.

[6] BUŠOV, Bohuslav. *Laboratorní návody – Elektrické přístroje (BEPR)* [Elektronické učební texty]. [cit. 2016-01-04].

[7] *Učební texty – Rozvodná zařízení (BRZB)* [Elektronické učební texty], Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

[8] VAVŘIŇÁK, Petr. *ELEKTRICKÉ STROJE A PŘÍSTROJE* [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2016-01-04].

[9] KVÍTEK, Emil. *MATERIÁLY PRO ELEKTROTECHNIKU* [online]. Pardubice, 2007 [cit. 2016-01-04].

[10] UHLIG, Wolfgang, Joachim SCHUSTER, Matthias GLÄSER a Uwe BRÜCKNER. *THERMOSTATIC METAL: Manufacture and Application* [online]. Aue/Saschen, 1996, 2007 [cit. 2016-01-04].

[11] Jean-Michel Bergheau, Roland Fortunier, *Finite element simulation of heat transfer*, ISBN 978-1-84821-053-0

[12] Siemens AG, 3VA Molded case circuit breakers, Regensburg 2015. Dostupné z WWW: www.siemens.com/lowvoltage.

[13] DOSTÁL, L. *Simulace nadproudové spouště jističe*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.