



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

ANALÝZA PŮSOBENÍ SPÍNACÍHO SYSTÉMU JISTIČE NN NA TEPELNOU SPOUŠŤ

ANALYSIS OF EFFECT OF THE SWITCHING SYSTEM OF LOW VOLTAGE BREAKER ON THE THERMAL TRIPPING UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Liščák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Dostál

BRNO 2018



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jiří Liščák

ID: 164923

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Analýza působení spínacího systému jističe nn na tepelnou spoušť

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište různé druhy spínacích systémů výkonových jističů včetně jejich výhod a nevýhod.
2. Seznamte se s výkonovým jističem nízkého napětí 3VA5225.
3. Vytvořte teplotní profil proudové dráhy jističe v závislosti na počtu sepnutých cyklů.
4. Analyzujte proudovou dráhu jističe pomocí programů Solidworks Flow Simulation a ANSYS.
5. Získané výsledky analyzujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] Havelka O.: Stavba elektrických přístrojů I. Brno – 1984

[3] ČSN EN 60 947-1 ed. 4: Spínací a řídicí přístroje nn: Část 1: Všeobecná ustanovení. Český normalizační institut. Praha, 2008.

[4] ČSN EN 60 947-2 ed. 3: Spínací a řídicí přístroje nn: Část 2: Jističe. Český normalizační institut. Praha, 2006.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Dostál

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cílem práce je provedení měření a simulací na výkonovém jističi nízkého napětí a analyzovat vliv spínacích cyklů na oteplení tepelné spouště. Simulace jsou provedeny v programu ANSYS a SolidWorks Flow Simulation. Součástí práce je dvou typů zkoušek provedení zkoušek elektrické trvanlivosti a oteplovacích zkoušek. V rámci těchto zkoušek je pak zjišťována hodnota oteplení nejen na tepelné spoušti jističe, ale celkový profil oteplení na proudové dráze.

Klíčová slova

Jistič nízkého napětí, oteplování jističe, elektrická trvanlivost, simulace, ANSYS Maxwell, SolidWorks Flow Simulation

Abstract

Main aims of this master's thesis are executing measurements and simulations on low voltage circuit breaker and analyzing effect of the switching mechanism on the thermal tripping unit. There are two programs used for simulations in this thesis ANSYS and SolidWorks Flow Simulation. As another part of the thesis were done two types of tests. First was electrical durability test and second one was warming test. In this thesis were measured values of warming on whole current path not only on thermal tripping unit.

Keywords

Low voltage circuit breaker, warming of circuit breaker, electrical durability, simulation, ANSYS Maxwell, SolidWorks Flow Simulation

Bibliografická citace:

LIŠČÁK, J. *Analýza působení spínacího systému jističe nn na tepelnou spoušť*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 52s. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Dostál.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Analýza působení spínacího systému jističe nn na tepelnou spoušť 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **21. 5. 2018**

.....
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, dále pak zaměstnancům zkušební laboratoře CVVOZE power laboratory ZL3 za výpomoc při přípravách a realizaci měření a Ing. Marcelu Jandovi Ph.D. za odbornou konzultaci.

V Brně dne **21. května 2018**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Problematika oteplování jistících přístrojů NN	2
2.1	Teplo, šíření tepla a teplota	2
2.2	Zdroje tepla v elektrických přístrojích	3
2.2.1	Oteplení proudové dráhy	3
2.3	Měření teploty	5
2.4	Materiály a jejich vlastnosti	6
2.4.1	Používané materiály	6
2.4.2	Materiálové vlastnosti	7
2.5	Typy používaných spouští	8
3	Popis kontaktních systémů	10
3.1	Jedno kontaktní systém	10
3.2	Rotační systém s dvěma kontaktními plochami	12
4	Měření	14
4.1	Zkoušky elektrické trvanlivosti	14
4.2	Oteplovací zkoušky	15
5	Simulace	17
5.1	Simulace v programu SolidWorks Flow Simulation	17
5.2	Simulace v prostředí ANSYS Maxwell	20
6	Vyhodnocení a Porovnání výsledků	22
6.1	Výsledky měření	22
6.2	Výsledky simulací	26
6.3	Porovnání měření a Solidworks Flow simulation	30
7	Závěr	33
	Literatura	35
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	36
	Seznam příloh	37

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Průběh oteplovací charakteristiky	4
Obr. 2.2 Tepelná a elektromagnetická spoušť výkonového jističe.....	8
Obr. 3.1 Proudová dráha jističe s jedno kontaktním systémem	11
Obr. 3.2 Spoušť jističe s jedno kontaktním systémem	11
Obr. 3.3 Proudová dráha jističe s rotačním systémem.....	13
Obr. 3.4 Spoušť jednoho pólu jističe s rotačním systémem.....	13
Obr. 4.1 Zapojení jističe při zkouškách elektrické trvanlivosti (s pneumatickým pohonem)	14
Obr. 4.2 Úprava pólové kazety pro umožnění měření.....	15
Obr. 4.3 Měřené body	16
Obr. 5.1 Model jističe	18
Obr. 5.2 a) zadání proudu, b) zadání hodnoty odporu.....	19
Obr. 5.3 Model proudové dráhy pro výpočet Joulových ztrát s výslednou sítí.....	20
Obr. 6.1 Pevný kontakt jednoho pólu jističe strana vstupu a) 4000 cyklů, b) 6000 cyklů, c) 8000 cyklů.....	23
Obr. 6.2 Rameno rotačního mechanismu.....	24
Obr. 6.3 Vývoj oteplení na proudové dráze L1 – měření.....	25
Obr. 6.4 Vývoj oteplení na proudové dráze L3 – měření.....	25
Obr. 6.5 Vývoj oteplení na proudové dráze L1 – simulace	26
Obr. 6.6 Vývoj oteplení na proudové dráze L3 – simulace	26
Obr. 6.7 Proudová hustota na fázi L3 po 1000 operačních cyklech.....	27
Obr. 6.8 Teplota na fázi L3 pro 0 operačních cyklů.....	28
Obr. 6.9 Rozložení teplot na bimetalech.....	28
Obr. 6.10 Napětí na fázi L3.....	29
Obr. 6.11 Vývoj oteplení na proudové dráze L1 – simulace a měření.....	30
Obr. 6.12 Vývoj oteplení na proudové dráze L3 – simulace a měření.....	30
Obr. 1 Vývoj oteplení na svorce jističe nn – výstup	37
Obr. 2 Vývoj oteplení na pevném kontaktu jističe nn – výstup	37
Obr. 3 Vývoj oteplení na pohyblivém kontaktu jističe nn – výstup.....	38
Obr. 4 Vývoj oteplení na pohyblivém kontaktu jističe nn – vstup	38
Obr. 5 Vývoj oteplení na pevném kontaktu jističe nn – vstup.....	39
Obr. 6 Vývoj oteplení na patě bimetalu jističe nn	39
Obr. 7 Vývoj oteplení na svorce jističe nn – vstup.....	40
Obr. 8 Vývoj oteplení na proudové dráze L1 – měření a simulace	40
Obr. 9 Vývoj oteplení na proudové dráze L3 – měření a simulace	41

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Typy používaných termočlánků.....	5
Tab. 6.1 Úbytky napětí na proudových drahách.....	22
Tab. 6.2 Velikost kontaktů v závislosti na počtu sepnutí.....	23
Tab. 6.3 Absolutní chyba pro počet operačních cyklů rovno 0	31
Tab. 6.4 Relativní chyba pro počet operačních cyklů rovno 0.....	31
Tab. 1 Vlastnosti okolí při měření oteplovacích zkoušek	41
Tab. 2 Hodnoty oteplení proudové dráhy – měření	42
Tab. 3 Hodnoty oteplení proudové dráhy – simulace.....	42
Tab. 4 Absolutní chyba.....	43
Tab. 5 Relativní chyba	43

1 ÚVOD

Jističe patří k základnímu vybavení určenému k ochraně zařízení proti nadproudům a zkratům, to jak v domácnostech, tak v průmyslu. V praxi se u jističů určených pro výkonovou instalaci používají převážně dva typy mechanismů – jedno kontaktní a rotační se dvěma kontakty. V práci jsou uvedeny rozdíly jednotlivých mechanismů a vlivy jednotlivých mechanismů a proudových drah na oteplení jističe.

Z důvodu oteplování jističe je součástí práce i princip vzniku tepla a jeho šíření. V návaznosti na teplo se práce zabývá materiálovými vlastnosti, které ovlivňují teplotu nebo jsou teplotou ovlivňovány.

Stěžejní částí práce je měření, které je zaměřeno na zkoušky elektrické trvanlivosti a oteplovací zkoušky. Oteplovací zkoušky jsou provedeny po každé zkoušce elektrické trvanlivosti.

Vzhledem k tomu, že v dnešní době se pro vytváření modelů a výkresové dokumentace používají nejrůznější CAD systémy a s nimi spojená simulační prostředí, ve kterých je možné provádět různé analýzy výrobků, je součástí práce i řešení problému v těchto programech. Pro diplomovou práci jsou vybrány dva programy, ve kterých bude probíhat výpočet. Prvním z nich je program ANSYS a jeho platformy a druhým je SolidWorks Flow Simulation

Po měřeních a simulacích je provedeno porovnání výsledků jednotlivých činností, a zjištění jaký vliv mají spínací cykly na výsledné oteplení jističe. Pokud se výsledky simulace a měření liší je nutné se zamyslet, kde mohly chyby vzniknout a zda by šly odstranit.

2 PROBLEMATIKA OTEPLOVÁNÍ JISTÍCÍCH PŘÍSTROJŮ NN

2.1 Teplo, šíření tepla a teplota

Teplo je energie, která určuje pohyb částic v uzavřené soustavě. Jedná se o popis výsledné energie, ke které dochází při vyrovnávání teplot okolí a tělesa. Výsledná energie závisí na tom, zda byla do soustavy energie dodána nebo z ní odebrána.

Teplota určuje, v jakém stavu je termodynamická rovnováha měřeného tělesa. Jedná se tedy o stavovou veličinu. Teplota se řadí do základní soustavy SI s jednotkou [K] v tomto případě se jedná o termodynamickou teplotu. Častěji se však užívá jednotka [°C].

Šíření tepla v dané soustavě je zprostředkováno třemi principy a to vedením, prouděním a zářením.

Vedení

Přenos energie pomocí vedení se nejvíce projevuje u pevných látek. Při dodání energie do dané části tělesa dochází k většímu kmitání částic a tím pádem dochází k zahřívání této části. Zároveň díky kmitání částic dochází ke srážkám i v částech tělesa, které jsou ve větší vzdálenosti od místa dodávání energie. Obecně se dá říci, že materiály, které dobře vedou elektrickou energii, mají i dobrou tepelnou vodivost.

Proudění

Jedná se o další princip přenosu tepla, uplatňuje se zejména u kapalin a plynů (dále jen tekutin). Přírozené proudění, které nastává, pokud je tekutina v blízkém kontaktu se zahříváním tělesem, může mít dvě podoby a to laminární nebo turbulentní. U laminárního proudění se všechny částice pohybují rovnoběžně s ochlazovanou stěnou. U turbulentního proudění nastává neuspořádaný pohyb částic, výjimku tvoří laminární proudění pouze ve velmi blízkém okolí ochlazovaného povrchu, tato vzdálenost od povrchu se nazývá hraniční vrstva. Pokud by bylo z nějakého důvodu nutno zavést dodatečné chlazení lze použít ventilátor, tímto se z přírozeného proudění stane proudění nucené.

Záření

Tento princip je možné sledovat hlavně v plynech nebo vakuu, přenos energie je zprostředkován pomocí elektromagnetických vln. Množství energie závisí hlavně na teplotě, velikosti, materiálu a emisivitě tělesa. [1],[2]

2.2 Zdroje tepla v elektrických přístrojích

Hlavní zdrojem tepla v elektrických jističích při sepnuté proudové dráze jsou ztráty způsobené průchodem proudu, o tomto typu ztrát se hovoří jako o ztrátách Joulových. Na velikost těchto ztrát má vliv odpor proudové dráhy a velikost proudu, který touto dráhou protéká podle rovnice 2.1.

$$p_j(t) = R \cdot i^2(t)dt \quad (2.1)$$

Dalšími zdroji tepla v tomto případě mohou být odpory ve styku způsobeny ať už nedostatečnou přítláčnou silou působící na kontaktní styk nebo špatným spojením kontaktu k proudové dráze.

Velikost oteplení může být ovlivněna i tvarem proudové dráhy, například při jejím zúžení je možné sledovat větší nárůst teploty právě v tomto místě. Tento princip se využívá například u některých typů topítek u tepelných spouští.

Při vypínání jističího přístroje je hlavním zdrojem tepla hořící oblouk, který může dosahovat teplot v řádech tisíců stupňů Celsia. Tyto velké teploty představují extrémní podmínky, při kterých dochází ke změně materiálových vlastností.

2.2.1 Oteplení proudové dráhy

Teplo vytvořené při průchodu elektrického proudu je v obvodu spotřebováno dvěma způsoby. Část tepla je akumulována do proudové dráhy a zvyšuje její teplotu a druhá část je odváděna z proudové dráhy do okolí. Tento jev popisuje rovnice tepelné rovnováhy.

$$R \cdot I^2 dt = \alpha \cdot S \cdot \Delta\vartheta dt + c \cdot V d(\Delta\vartheta) \quad (2.2)$$

kde: R odpor proudové dráhy [Ω]

I proud [A]

α součinitel přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

S plocha [m^2]

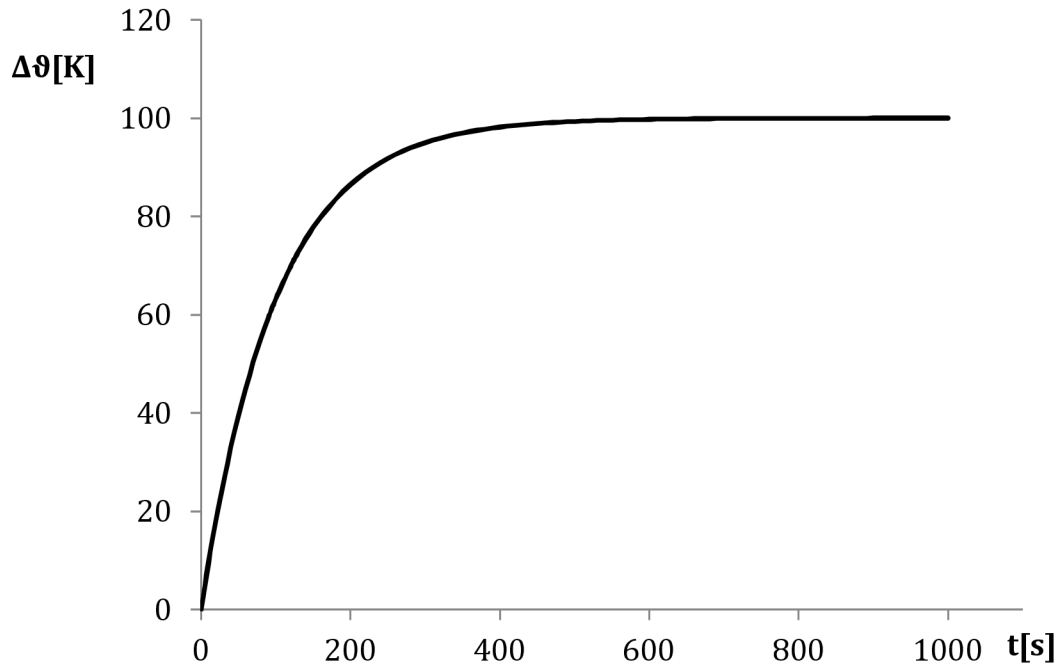
$\Delta\vartheta$ oteplení [K]

c měrná objemová tepelná kapacita [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]

V objem [m^3]

Oteplovací křivka

Oteplovací křivka udává velikost oteplení v závislosti na čase. Tento průběh je závislý především na velikosti ustáleného oteplení a oteplovací časové konstantě obvodu.



Obr. 2.1 Průběh oteplovací charakteristiky

Oteplovací časová konstanta

Je definována jako doba, za kterou by těleso dosáhlo ustáleného oteplení, pokud by se všechna energie spotřebovala pouze na zvýšení teploty vodiče proudu.

$$\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha \cdot S} \quad (2.3)$$

Ustálené oteplení

Ustálené oteplení nastává, pokud nedochází k dalšímu navyšování teploty proudové dráhy a všechno vznikající teplo je odváděno do okolí. V praxi se o ustáleném oteplení mluví, pokud během jedné hodiny nedošlo ke zvýšení teploty o jeden °C.

$$R \cdot I^2 dt = \alpha \cdot S \cdot \Delta\vartheta_{inf} \quad (2.4)$$

2.3 Měření teploty

Měření teploty se provádí pomocí různých čidel. Nejznámější teplotní čidlo jako je rtuťový nebo lihový teploměr, tyto čidla pracují na principu teplotní roztažnosti dané látky. Pro měření v této práci však bude použito termočlánků, které jsou v technické praxi nejvíce rozšířené.

Termoelektrické články

Pracují na principu Seebeckova jevu. Jedná se o převod tepelné energie na energii elektrickou. V místech s vyšší teplotou jsou náboje s vyšší energií, ty difundují ve větším množství do místa s nižší teplotou. Z chladnějších míst probíhá difuze náboje do místa s vyšší teplotou. V tomto případě vzniká na každé straně převaha jednoho z nábojů. Při přiložení voltmetru se na něm zobrazí elektromotorické napětí, které po přepočtu udává měřenou teplotu.

V praxi existuje mnoho typů termoelektrických článků. Hlavními rozdíly u těchto článků jsou v použitých materiálech jednotlivých vodičů, dále pak v rozsahu teplot, ve kterém mohou být použity a také na napětí, které je schopno daný termočlánek generovat při rozdílu teploty 1 °C.

Tab. 2.1 Typy používaných termočlánků

kód	složení	dlouhodobé měření teploty [°C]	krátkodobé měření teploty [°C]	převod při 100°C [μV/°C]	převod při 500°C [μV/°C]	převod při 1000°C [μV/°C]
K	NiCr(+) NiAl(-)	0 až 1100	-180 až 1350	42	43	39
T	Cu(+) CuNi(-)	-185 až 300	-250 až 400	46	-	-
J	Fe(+) CuNi(-)	20 až 700	-180 až 750	54	56	59
N	NiCrSi(+) NiSiMg(-)	0 až 1100	-270 až 1300	30	38	39
E	NiCr(+) CuNi(-)	0 až 800	-40 až 900	68	81	-
R	PtRh13(+) Pt(-)	0 až 1600	-50 až 1700	8	10	13
S	PtRh10(+) Pt(-)	0 až 1550	-50 až 1750	8	9	11
B	PtRh30(+) PtRh6(-)	100 až 1000	100 až 1280	1	5	9
G	W(+) WRh(-)	20 až 2320	0 až 2600	5	16	21
C	WRh5(+) WRh26(-)	50 až 1820	20 až 2300	15	18	18

Pokud by byla potřeba zvýšit citlivost měření, mohou se jednotlivé termočlánky zapojit sériově, pomocí tohoto zapojení je možné vyhodnotit i průměrnou hodnotu teploty ve zvoleném místě. Paralelní zapojení termoelektrický článků umožňuje přesné vyhodnocování teplotních rozdílů při vysokých teplotách.[3]

2.4 Materiály a jejich vlastnosti

V následující kapitole se práce věnuje používanými materiály v elektrotechnické praxi a jejich hlavními vlastnostmi.

2.4.1 Používané materiály

Měď

V jisticích přístrojích se na vytvoření proudových drah používá převážně měděný materiál. Pro kvalitu měděného elektrovodného materiálu je zaveden i mezinárodní standard IACS (International Annealed Copper Standard) podle tohoto standardu má mít čistá elektrovodná měď 95,85 až 99,97 % obsahu samotnou měď zbytek jsou příměsi a nečistoty. Vodivost musí odpovídat 96,5 až 100 % vodivosti dané IACS. Nejčastěji je možné vidět měď v přístrojích v podobě flexi lan nebo různě profilovaných vodičů. Profily se vytvářejí různými metodami jako je například řezání, vypalování, ohýbání a jiné. Těmito postupy dochází ke změnám vodivosti v určitých místech, tyto změny lze částečně odstranit pomocí žhání mědi.[4]

Stříbro a jeho podoby

Hlavní použití stříbra u elektrických přístrojů je při pokovování míst, kde dochází ke kontaktnímu styku. U jističů to jsou převážně přívodů jednotlivých pólů jističe. Stříbro je zde nanášeno z důvodů lepší vodivosti a také pro její lepší kontaktních vlastností než má samotná měď.

Stříbro se rovněž používá pro vytvoření hlavních kontaktů jisticích přístrojů. Protože v těchto přístrojích jsou příčinou vypínání oblouku vysoké teploty, samotné stříbro by tyto teploty nevydrželo, proto se zde používá ve formě kompozitních materiálů. Kompozitní materiál se vyrábí pomocí práškové metalurgie. Tyto materiály mají podstatně větší odolnost vůči opalu obloukem díky příměsi wolframu. Po přidání uhlíku vzniká karbid wolframu tato kombinace, zajišťuje větší odolnost proti svaření kontaktů.[5]

Ocel

Ocel má u jističů převážně dvě využití. První využití je u mžikové spouště, kdy se z tvarovaného ocelového plechu vytváří magnetický obvod vybavovacího elektromagnetu. Další použití je u zhášecích komor, kdy jsou právě jednotlivé segmenty roštu tvořeny z ocelových plechů, které mohou být následně poměděny.

2.4.2 Materiálové vlastnosti

Znalost materiálových vlastností je velmi důležitá, jak pro realizaci simulací, tak pro samotnou výrobu elektrických přístrojů. V této části jsou uvedeny nejpodstatnější materiálové vlastnosti související s teplem a teplotou.

Teplotní roztažnost

Při zahřívání tělesa dochází k jeho rozpínání a při ochlazování ke smršťování. Teplotní roztažnost může být délková nebo objemová. U elektrických přístrojů se nejvíce využívá délkové teplotní roztažnosti, protože na tomto principu pracuje tepelná spoušť jističe tvořená bimetalovým páskem. Hlavním parametrem je teplotní součinitel délkové roztažnosti α_R [K⁻¹]. Výsledné prodloužení je dáno vztahem:

$$\Delta d = d \cdot \alpha_R \cdot \Delta \vartheta \quad (2.5)$$

kde: Δd výsledné prodloužení [m]

d je délka tělesa [m]

$\Delta \vartheta$ je rozdíl teplot [K]

α_R teplotní součinitel délkové roztažnosti [K⁻¹]

Tepelná vodivost

Vlastnost materiálu, která vyjadřuje jeho schopnost vést teplo. Tato schopnost je vyjádřena pomocí součinitele tepelné vodivosti λ [W·m⁻¹·K⁻¹]. Jde tedy o tepelný výkon, který projde krychlí o straně 1 m při rozdílu teplot 1 K.

Tepelná kapacita

Vyjadřuje, jaké množství energie musí být dodáno tělesu, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K. Značka tepelné kapacity je C [J·K⁻¹]. Vzhledem k tomu, že mohou existovat dvě tělesa ze stejného materiálu o různé tepelné kapacity, zavádí se měrná tepelná kapacita. V tom případě se tepelná kapacita nevztahuje k danému tělesu, ale k materiálu ze kterého je vyroben, poté je výsledná tepelná kapacita závislá na hmotnosti nebo na celkovém objemu. [6]

Rezistivita

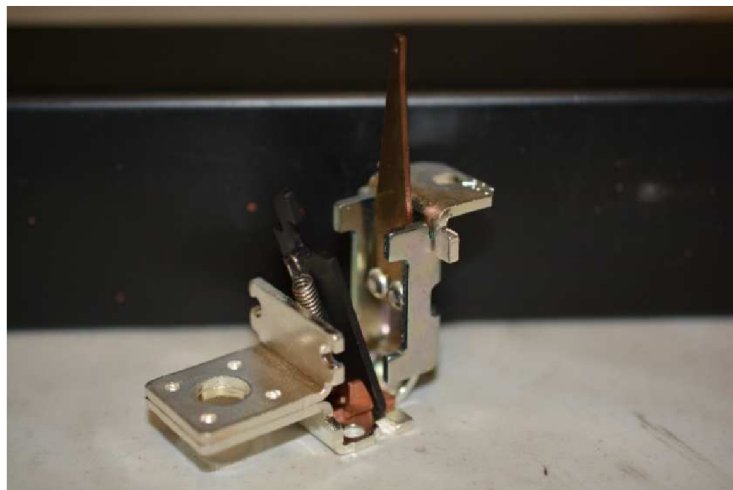
Neboli měrný elektrický odpor, jedná se o množství srážek elektronů, které vedou elektrický proud, s kmitajícími atomy nebo příměsemi a defekty v krystalické mřížce. Díky tomu je možné říci, že rezistivita je velmi závislá na teplotě s rostoucí teplotou mají totiž atomy větší energii a dochází ke větším počtům srážek, tudíž roste měrný elektrický odpor. [4]

2.5 Typy používaných spouští

Pro registraci a působení na vypínací mechanismus jistících přístrojů při průchodu malých nadproudů nebo zkratových proudů se používají různé typy spouští. V této kapitole jsou vybrány nejvíce používané typy spouští v jistících přístrojích a popsána jejich funkce.

Tepelná spoušť

V jistících přístrojích se jako tepelná spoušť nejčastěji používá bimetal. Jedná se o dva pevně spojené kovy s různými činiteli tepelné roztažnosti. Tyto vrstvy se označují jako pasivní (menší činitel tepelné roztažnosti) a aktivní (větší činitel tepelné roztažnosti). Při průchodu proudu se bimetalový pásek zahřívá a tím pádem i roztahuje. Vzhledem k rozdílným činitelům tepelné roztažnosti dochází k deformaci bimetalu (ohyb), protože pasivní část bimetalu brání aktivní části, aby se roztáhla na plnou délku. Na pasivní vrstvu se nejčastěji používá slitina železa a niklu (invar). Na aktivní vrstvy se používají slitiny železa, ale i slitiny neželezných kovů (kanthal, mosaz).



Obr. 2.2 Tepelná a elektromagnetická spoušť výkonového jističe

Způsob vytápění bimetalu

přímý

bimetal je přímo v obvodu - teče jím nadproud, který jej ohřívá

nepřímý

je zde použito tělesa, kterým protéká nadproud a generuje teplo, v těsné blízkosti tohoto tělesa se nachází bimetal, který přijímá teplo

kombinovaný

jedná se o kombinaci obou předchozích způsobu vytápění [1]

Elektromagnetická spoušť

Další spoušť, kterou je možné najít u jisticích přístrojů je elektromagnetická spoušť, jedná se o spoušť, která působí při průchodu zkratových proudů. Někdy se jí říká mžiková vzhledem k její rychlé reakci. Tato spoušť je tvořena elektromagnetem. Cívkou elektromagnetu protéká stejný proud, jako protéká jištěným obvodem. Pokud není v obvodu porucha, působí kotva elektromagnetu jako zámek. Tím pádem jisticí přístroj nevybaví. Při průchodu zkratového proudu je kotva přitažena elektromagnetem a uvolní vypínací pružinu – dojde k vybavení přístroje. [9]

Elektronická spoušť

V dnešní době čím dál více využívaný typ spouště. V podstatě se jedná o proudové transformátory, které slouží jako snímače proudu v jednotlivých fázích jističe. Primární vinutí transformátoru je tvořeno jedním závitem, sekundární vinutí má velké množství závitů. Signál ze sekundárního vinutí je veden do mikroprocesoru. Z mikroprocesoru je poté dávám povel na speciální vybavovací elektromagnet. Pomocí elektronické spouště je v daný okamžik změřena okamžitá hodnota proudu a pomocí matematických operací se zjišťuje skutečná efektivní hodnota procházejícího proudu. Další součástí elektronických spouští přepínače. Pomocí těchto přepínačů a softwaru si lze zvolit námi požadovanou vypínací charakteristiku jističe. Jedná se o největší výhoda těchto spouští - nabízí velkou variabilitu vypínacích charakteristik. Mezi další výhody se dá zařadit i možnost komunikace s ostatními jisticími prvky - nastavení selektivity. [10]

Tlaková spoušť

Jedná se rotační prvek detekující změnu tlaku v části výfuku oblouku. Při průchodu zkratového proudu dochází v některých případech k nadskočení kontaktů, toto nadskočení má za příčinu vznik oblouku. Vzniklý oblouk je vtažen do zhášecí komory – nastává změna tlakových poměrů v části výfuků plynů. Rotační prvek tuto změnu tlaku zaregistruje svým pootočením, čímž působí na vypínací systém jističe a dojde k plnému rozpojení proudové dráhy a uhašení oblouku ve zhášecí komoře.

3 POPIS KONTAKTNÍCH SYSTÉMŮ

Tato část se zabývá různými typy kontaktních systémů jističů nízkého napětí, jejich konstrukcí a také výhodami a nevýhodami jejich použití. Pro porovnání je zde použit jednoduchý jedno kontaktní systém a rotační systém s dvěma kontakty.

3.1 Jedno kontaktní systém

Poznatky k oteplování jednotlivých částí proudové dráhy

Jako vývod proudu od spouští je zde použito flexi lanek – tyto flexi lanka musí být navařena z obou stran na proudovou dráhu vyrobenou z pásoviny. Tyto návary mohou způsobovat v daném místě větší přechodový odpor a větší zahřívání v tomto místě při průchodu proudu. Tímto zvýšeným oteplováním místa může docházet k degradaci materiálu.

Dále může u flexi lanek dojít postupem času ke zlomení některých vláken, čímž může dojít ke změně odporu flexi lanka a prohřívání v dané oblasti. Navíc pokud jsou zlomená lanka ve své blízkosti, může docházet k lokálním přeskokům oblouku a z tohoto důvodu k většímu oteplování lanka v daném místě.

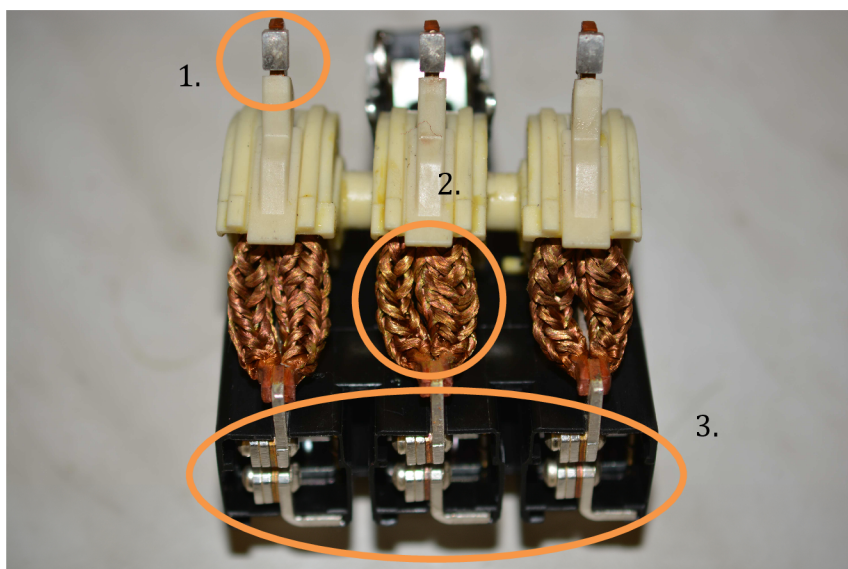
Tento typ mechanismu má pouze hlavní kontakt, na kterém dochází jak k vedení proudu tak při vypínání nadproudů a zkratů k opalu obloukem. Působení oblouku má vliv na kontakt a jeho materiálové vlastnosti. Ve většině případů se zde používá jako kontaktní materiál kompozit Ag s příměsemi.

U každého pohyblivého kontaktu se nachází kontaktní pružina. U této pružiny může vlivem elektrodynamických nebo tepelných účinků docházet k degradaci materiálu a tím pádem i k menší přítlačné síle do kontaktu. Velikost této síly opět souvisí s velikostí oteplení kontaktní plochy. Pokud bude tato síla malá, může docházet k nadskokům kontaktů a tvorbě částečných oblouků (tím pádem většímu zahřívání). Případně může dojít vlivem nadskoků kontaktů i ke svaření kontaktů.

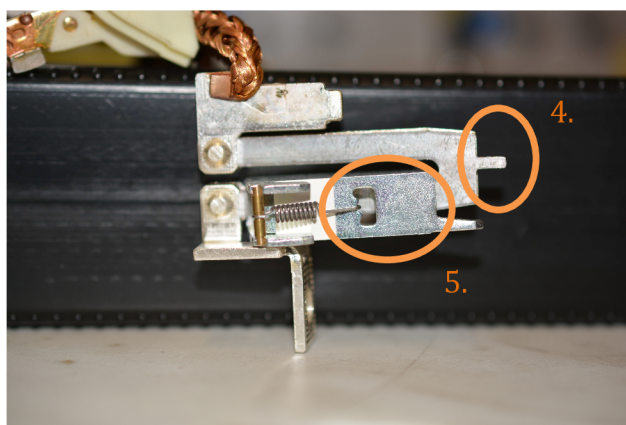
Místo rozpojení obvodu je zde pouze jedno, proto má oblouk velkou energii. Zhášení oblouku je zprostředkováno pomocí roštové zhášecí komory. Oblouk je do zhášecí komory veden pomocí arc runneru, který chrání hlavní kontakt před opalem, a za pomocí roštů zhášecí komory je oblouk rozdělen na několik menších oblouků, tím se zvětší jeho odpor a dochází k jeho zhasínání.

Hlavní výhodou tohoto systému je jednoduchost provedení - s touto jednoduchostí souvisí i nižší pořizovací cena přístroje. Jako další výhodu lze považovat lepší odvod tepla vzniklého při jeho hoření, protože při rozpojení kontaktů oblouk hoří v jednom místě.

Mezi nevýhody pak lze uvést nižší omezovací schopnost těchto přístrojů a mohou vypínat menší nadproudy než například rotační systémy.



Obr. 3.1 Proudová dráha jističe s jedno kontaktním systémem



Obr. 3.2 Spoušť jističe s jedno kontaktním systémem

1. pohyblivý kontakt jističe
2. flexi lanka použitá jako přívod proudu ke kontaktnímu systému
3. uložení spouští jističe
4. bimetalová spoušť
5. mžiková spoušť

3.2 Rotační systém s dvěma kontaktními plochami

Poznatky k oteplování jednotlivých částí proudové dráhy

V tomto případě je rotační kontakt tvořen dvěma rameny, avšak některé firmy mají vymyšleny rotační kontakty i s více než dvěma rameny, rozdíl je v tomto případě ve velikosti zkratového proudu, který jsou schopny tyto jističe vypnout a samozřejmě v ceně přístroje.

U rotačního systému s dvěma kontakty je při nadproudu nebo zkratu obvod vypínán na dvou místech zároveň hoří tedy dva oblouky. Z důvodu, že tyto oblouky hoří v sérii, je napětí poměrově rozděleno na oba oblouky. Díky tomuto řešení je výsledná energie každého oblouku působícího na kontakty menší, než kdyby zde hořel pouze jeden oblouk, proto dochází k menší erozi kontaktů vlivem oblouku.

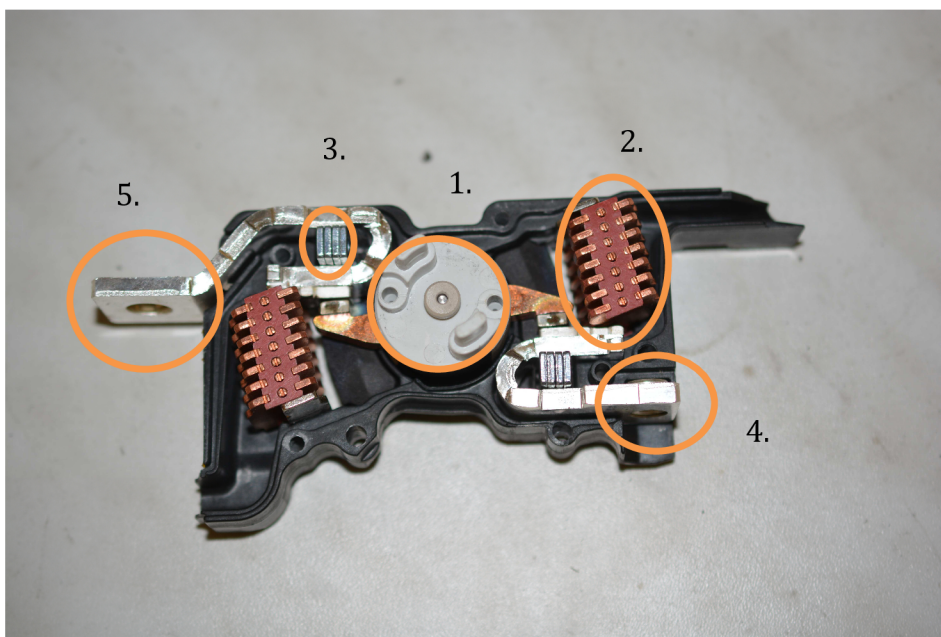
Jak je možné si všimnout, tak rotační kontakt je vyroben z několika kusů na sebe poskládaných měděných plechů, to je způsobeno výrobní technologií, kdy při menším průřezu plechu dochází k menšímu opotřebení řezacích nástrojů. Avšak při spojování zde mohou vznikat místa, kde jsou uzavřeny vzduchové bubliny, tyto bubliny poté působí jako tepelný izolant a mohou znesnadňovat přestup tepla.

I zde se nacházejí kontaktní pružiny, které vlivem tepelných a elektrodynamických jevů mohou ztrácet své vlastnosti, snižovat přítlak kontaktních ploch a tím zvyšovat jejich teplotu. Může opět docházet k nadskokům kontaktů a tvorbě částečných oblouků. Případně může dojít vlivem nadskoků kontaktů i ke svaření kontaktů.

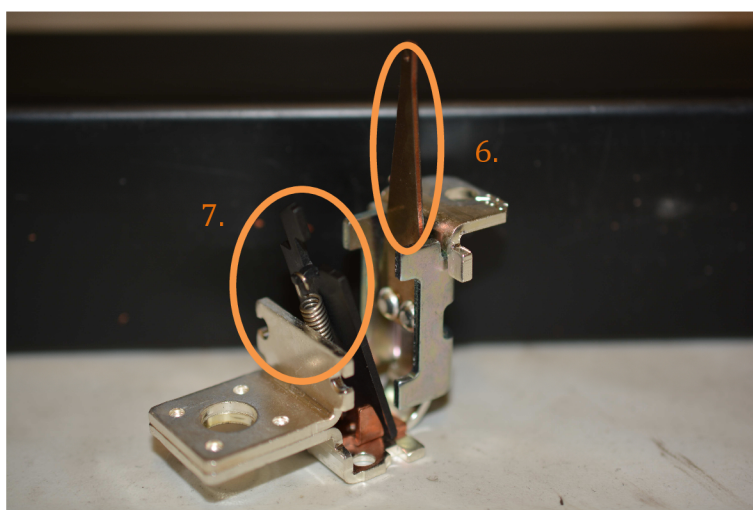
I v tomto případě je použito roštové zhášecí komory, avšak se zde nacházejí dvě a jsou menší než u jedno kontaktního systému. Oblouk je do zhášecích komor vtlačován pomocí elektromagnetických sil vyvolaných transformátorovými plechy, tvořící U-smyčku umístěnými v blízkosti kontaktního styku.

Mezi hlavní výhody přístrojů s rotačními kontakty patří: možnost vypínat větší zkratové proudy než u jedno kontaktního systému a větší omezovací schopnost těchto jisticích přístrojů.

Velkou nevýhodou (protože většina tepla je odváděna vedením) je působení dvou oblouků na ramena rotační části, právě ty se vlivem působení oblouku zahřívají nejvíce, protože zdroje tepla působí z obou stran.



Obr. 3.3 Proudová dráha jističe s rotačním systémem



Obr. 3.4 Spoušť jednoho pólu jističe s rotačním systémem

1. rotační systém jisticího přístroje
2. zhášecí komora
3. transformátorové plechy pomáhající vhánění oblouku do zhášecí komory
4. část proudové dráhy pro umístění spouští
5. vývod pólové kazety jističe
6. bimetálová spoušť
7. mžiková spoušť

4 MĚŘENÍ

V diplomové práci byly provedeny dva typy zkoušek. Zkouška elektrické trvanlivosti, při které se ověřuje kolik spínacích cyklů za provozu daný přístroj vydrží a v návaznosti na tento typ zkoušky byly provedeny oteplovací zkoušky, které mají za úkol zjistit, zda nedochází k příliš velkému oteplení na svorkách přístroje při průchodu jmenovitého proudu.

4.1 Zkoušky elektrické trvanlivosti

Během zkoušek elektrické trvanlivosti bylo provedeno celkově 8000 spínacích cyklů na jističi nn. Pro zkoušku byl zvolen jmenovitý proud 250 A a provozní napětí 415 V, obě hodnoty mají toleranci +5 %. Účinit u tohoto typu zkoušek by měl být 0,8 s tolerancí $\pm 0,05$. V tomto případě byl nastaven na hodnotu 0,813. Počet sepnutí byl nastaven na 4 cykly za minutu, spínání probíhalo pomocí pneumatického pohonu, který plně nahrazoval anatomický pohyb lidské ruky při zapínání přístroje.



Obr. 4.1 Zapojení jističe při zkouškách elektrické trvanlivosti (s pneumatickým pohonem)
V průběhu každého spínacího cyklu, musí jistič zůstat zapnutý dostatečně dlouhou dobu, tak aby došlo k ustálení proudu, avšak tato doba nesmí být delší než 2 s. Během zkoušky elektrické trvanlivosti byla doba zapnutí jističe 270 ms. Delší doba nebyla potřebná, protože za tuto doby došlo k ustálení proudu. Při delších dobách zapnutí vzniká více ztrát, proto je vhodné dobu zapnutí omezit na co jak nejkratší

čas. Od 0 do 4000 cyklů byl zvolen postup po 1000 cyklech. Po 4000 spínacích cyklech byl přístroj rozebrán a provedena analýza jednotlivých elementů spínacího mechanismu včetně eroze kontaktů. Od 4000 do 8000 cyklů byl zvolen postup po 2000 cyklech z důvodu obsazenosti zkušební laboratoře CVVOZE power laboratory ZL3. Po posledních 2000 spínacích cyklech byl opět přístroj rozebrán na jednotlivé elementy a důsledně analyzován.

Jedním z hlavních poznatků nalezených uvnitř pólové kazety spínacího mechanismu, bylo zjištění velké eroze pevných kontaktů, ke kterým dochází vlivem spínání. To je zapříčiněno několika vlivy. Prvním z vlivů je opal obloukem, jak zapínacím, tak vypínacím. Při oblouku dochází z důvodů vysokých teplot k uvolňování materiálu. Dalším vlivem je mechanické tření a síla působící na rotační mechanismus. Při uvažování vysoké teploty na kontaktech, vzniklé obloukem, může materiál kontaktů částečně změknout a při dopadu rotační páky na pevný kontakt dochází k mechanickému opotřebení. Výsledek měření pevných kontaktů je zaznamenán v tab. 6.2.

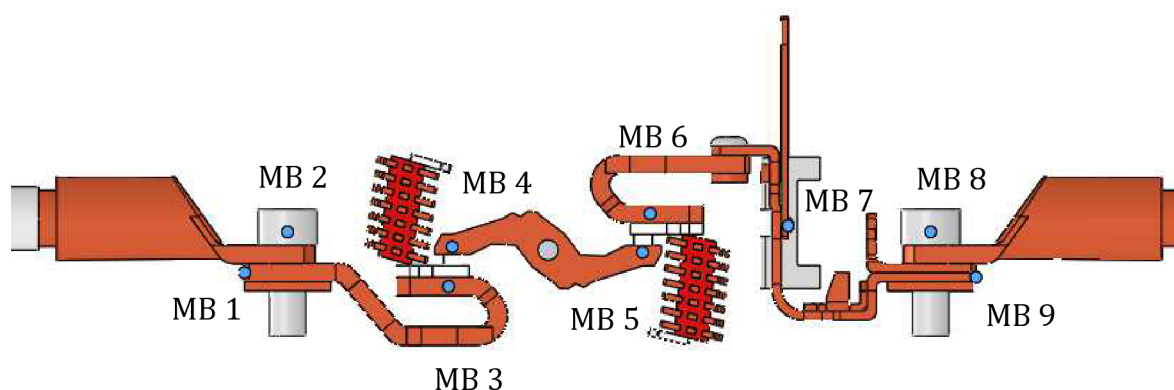
4.2 Oteplovací zkoušky

Po každém zvoleném cyklu elektrické trvanlivosti byla provedena oteplovací zkouška. Přístroj byl namontován na hliníkovou desku a připojení na zdroj bylo realizováno pomocí kabelů o průřezu 120 mm² a délce 2 m. Vzhledem ke špatné přístupnosti byly přímo na bimetál přidělaný termočlánky. Na body u pevných a rotačních kontaktů nebyly termočlánky instalovány z obavy, že by při životnostní zkoušce nemusely vydržet namáhání. Pokud by termočlánky upadly, bylo by nutné je znovu přidělat, to by mělo za následek větší prodlevy v měření.



Obr. 4.2 Úprava pólové kazety pro umožnění měření

Z důvodů měření kontaktní termočlávkovou sondou musely být upraveny kazety prvního a třetího pólu. Úprava spočívala v tom, že v místech, kde jsou kontaktní styky došlo k propilování kazety, to mělo za následek ubrání jednoho arc runneru, tím pravděpodobně došlo ke změně vhánění oblouku do zhášecí komory viz obr. 4.2. Dále se díky otvorům v kazetě změnily tlakové poměry uvnitř kazety, tato změna byla částečně odstraněna pomocí speciální fólie, která byla přítomna po dobu zkoušky elektrické trvanlivosti i oteplovacích zkoušek a odstraněna pouze při měření teploty daného kontaktního styku. Měření bylo provedeno na předem vybraných bodech viz obr. 4.3. Na prostřední fázi sice bylo možné provést stejné úpravy jako na krajních pólech, avšak vzhledem k uspořádání jednotlivých pólů jističe nebylo možné měřit sondou teploty a napěťové úbytky na kontaktních stycích. Během oteplovacích zkoušek byly rovněž měřeny napěťové úbytky na celé proudové dráze a mezi jednotlivými kontaktními styky. Okolní podmínky, které byly při měření jsou zaznamenány v tab. 1. v příloze.



Obr. 4.3 Měřené body

MB 1 – svorkovnice výstup, MB 2 – šroub výstup, MB 3 – pevný kontakt výstup, MB 4 – pohyblivý kontakt výstup, MB 5 – pohyblivý kontakt vstup, MB 6 – pevný kontakt vstup, MB 7 – pata bimetalu, MB 8 – šroub vstup, MB 9 – svorkovnice vstup.

Použité přístroje a zdroje

Teplotní čidlo Agilent U1182A

Teploměr AHLBORN ALMEMO THERM 2420 - 1L (In 100 A AC/DC, Out 100–10 mV/1 V peak)

Proudová sonda Chauvin Arnoux E3N

Multimetr HEX 340A 0534

Datalogger AHLBORN ALMEMO 5690 -2M

termočláanky typ K

Proudový zdroj CTR 2–230 V/16 A na 2 V/1500 A, 3600 W

5 SIMULACE

Ve většině případů pracují simulační programy na bázi metody konečných prvků, případně metody konečných objemů. V této práci jsou k simulacím použity programy od společnosti ANSYS a SolidWorks. Aby bylo možné simulační výpočty aplikovat, je nutné určit síť bodů (mesh), ve kterých proběhne výpočet diferenciálních rovnic. Z tohoto důvodu jsou kladeny nároky na použitý model. Pokud by došlo k rozpadu modelu, nebo by docházelo ke kolizím jednotlivých součástí, program by nebyl schopen vytvořit síť bodů a následně provést výpočet. Pomocí těchto výpočtů je možné odhalit místa, kterým je třeba věnovat zvýšenou pozornost při návrhu, a která by mohla negativně ovlivňovat výsledné vlastnosti výrobku. Ve velkém množství případů se mohou jednotlivé modely považovat za jakési prototypy, tím odpadá nutnost vyrábět větší množství prototypů. Obecně se dá říci, že simulační programy v dnešní době hrají čím dál větší roli. Pokud člověk dostatečně ovládá problematiku spojenou se simulačními programy a oborem, ve kterém dané výpočty aplikuje, může se ve velkém množství případů podstatně zkrátit doba vývoje výrobků, snížit výrobní a vývojové náklady s tím spojené. Inovace stávajících výrobků může probíhat rovněž rychleji, a navíc je možné dosáhnout lepší kvality než u stávajících výrobků.

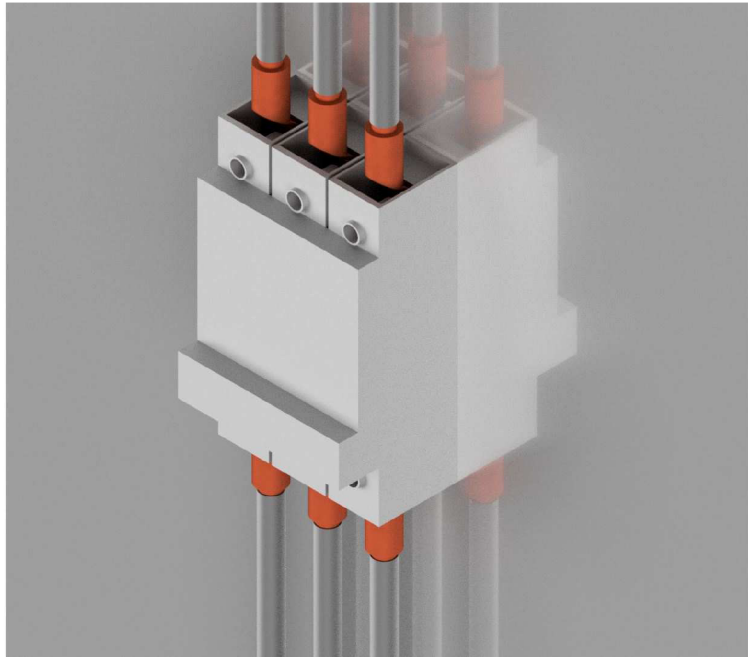
5.1 Simulace v programu SolidWorks Flow Simulation

SolidWorks jakožto CAD systém nabízí i možnosti simulací. Součástí produktu je například pevnostní analýza. Další nástroje pro tvorbu simulací se ve většině dokupují v balíčcích. SolidWorks Flow simulation je primárně určen pro simulace proudění, avšak jeho upravená verze Electronics cooling umožňuje generování tepelných ztrát vlivem průchodu elektrického proudu. V případě tohoto simulačního programu je používána metoda konečných objemů, a to z toho důvodu, že byl program primárně určen právě pro výpočet proudění. Simulační program Electronics cooling pracuje pouze se stejnosměrnými proudy. Tato skutečnost může ovlivnit výsledky simulací z důvodu, že přístroj je určen na střídavý proud a simulace by měla být provedena rovněž při střídavém proudu.

Model

Pro účely výpočtů byl v CAD programu vytvořen zjednodušený model jističe. Tvorba modelu spočívala ve změření všech komponentů jističe se snahou se co nejvíce přiblížit reálnému přístroji. Kromě samotného přístroje je součástí modelu i hliníková deska, na kterou je přístroj namontovaný a přívodní kabely. Orientace celého modelu odpovídá reálnému namontování přístroje. Na obr. 5.1 je na první

pohled patrné kde bylo provedeno zjednodušení, v modelu se nenachází spínací mechanismus a kryt jističe.



Obr. 5.1 Model jističe

Zadání materiálů

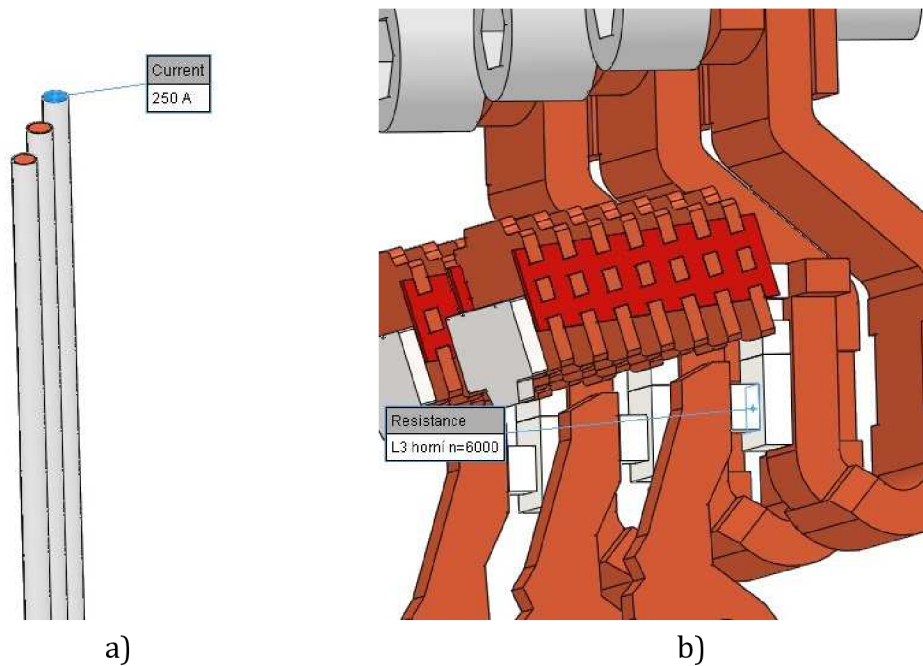
Z materiálové knihovny, kterou nabízí Solidworks byla pro proudovou dráhu použita měď, pro ocelové součásti byla použita ocel (mild) a pro desku, na kterou je přístroj namontován byl použit hliník. Vzhledem k tomu, že materiály kontaktů nejsou součástí knihovny musely být ručně zadány jejich vlastnosti. Izolační materiál používaný při výrobě pólových kazet jističů rovněž není součástí knihovny.

Meshování

Program SolidWorks Flow Simulation jak již bylo zmíněno pracuje s metodou konečných objemů. Výsledná síť objemových těles je rozdělena na 3 druhy. První druh je solid – jedná se o síť aplikovanou pouze na pevných částech, dalším druhem je fluid – tato síť je pouze na tekutinách v tomto případě vzduchu, poslední druh je parcial – jedná se o síť, vytvořenou na rozhraní pevné části a tekutiny. Tyto sítě jsou vzájemně provázány a tvoří celkovou síť. Součástí meshovacího nástroje jsou i různé možnosti, jak výslednou síť dále upravovat, jak uživatel potřebuje. V modelu je například na kontaktech a bimetalu zjemněna síť, aby zde docházelo k přesnějším výpočtům než s původní sítí. Výsledná síť zde není zobrazena z důvodů nepřehlednosti.

Nastavení výpočtu

Kromě zadání materiálů a vytvoření sítě je dále pro výpočet důležité zadat okrajové podmínky, za kterých bude výpočet probíhat. V tomto případě se jedná o okolní teplotu ta byla zadána podle hodnot změřených při každé oteplovací zkoušce (pokud by se jednalo o prvotní výpočet byla by zadána pracovní teplota prostředí ve kterém přístroj pracuje). Dále pak počáteční teplota pevných částí. Vzhledem k tomu, že program Flow Simulation počítá i s prouděním vzduchu je nutné zadat v jaké ose působí gravitační síla a jaký druh proudění se v modelu nachází. Pro účel simulace bylo použito pouze proudění laminární, které je na výpočet méně náročné. Pro výpočet je důležité i zadání proudu, který způsobuje Joulovy ztráty. Proud se v tomto případě zadává na plochy a volí se směr toku obr. 5.2 a). Hlavní faktor, který ovlivňuje výslednou teplotu jsou přechodové odpory v kontaktním styku obr. 5.2 b).



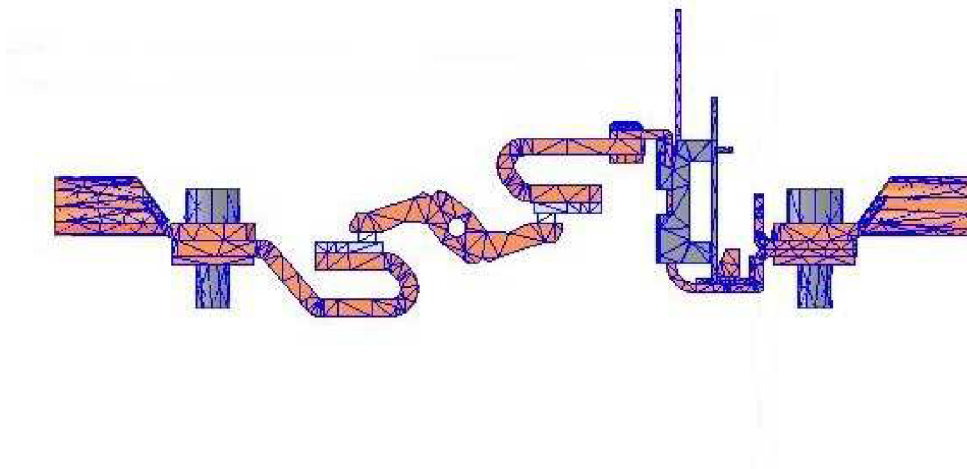
Obr. 5.2 a) zadání proudu, b) zadání hodnoty odporu

5.2 Simulace v prostředí ANSYS Maxwell

Program ANSYS Maxwell umí pracovat na rozdíl od Solidworks Flow Simulation i s časově proměnnými proudy, proto měla být provedena simulace v obou programech. V prostředí programu ANSYS Maxwell by musel být tento výpočet proveden pomocí transientních metod, protože proud se v čase mění. Z důvodu, delšího trvání transientní analýzy než doba výpočtu analýzy ustáleného stavu, bylo rozhodnuto, o provedení výpočtu velikostí ztrát vznikajících průchodem střídavého a stejnosměrného proudu. Pokud by se zjištěné hodnoty lišily velmi málo, byla by součástí práce teplená simulace pouze v programu Solidworks Flow Simulation a tedy v ustáleném stavu při stejnosměrném proudu.

Model

S přihlédnutím na počítanou veličinu nebylo nutné používat celý model jističe jako je tomu u simulace v SolidWorksu. V tomto případě je použita pouze proudová dráha jednoho pólu jističe. Tím bylo dosaženo zjednodušení celého modelu a tím pádem i k rychlejšímu výpočtu hledaných hodnot.



Obr. 5.3 Model proudové dráhy pro výpočet Joulových ztrát s výslednou sítí

Zadání materiálů

Pro všechny části proudové dráhy byla použita měď z knihovny programu ANSYS Maxwell, pro ocelové součásti steel_1008 rovněž z knihovny. Pro materiálové vlastnosti kontaktů byly použity poznatky o moderních materiálech vyráběných pomocí spékání stříbra s dalšími příměsemi.

Meshování

Program ANSYS Maxwell používá pro výpočet adaptivní meshování, to znamená, že při každém výpočtu, který proběhne je analyzována chyba výpočtu, pokud je chyba větší, než nastavená hodnota dochází k přemeshování celého modelu. V tomto případě bylo adaptivní meshování použito pouze pro první analýzu a pro další analýzy byla použita poslední síť z adaptivního meshování. Výsledná síť je vykreslena na obr. 5.3.

Analýza Joulových ztrát při průchodu střídavého proudu

Pro střídavou analýzu je nutné použít typ analýzy Electric transient. Aby bylo možné zjistit Joulovy ztráty je nutné určit velikost proudu a kudy proud poteče. Protože jmenovitý efektivní proud jističe je 250 A bylo nutné dopočítat maximální hodnotu proud zadat pomocí vztahu $i = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot time)$ frekvence je 50 Hz, time je čas a je automaticky počítán od 0 po zvoleném kroku, velikost maxima proudu je v tomto případě 353,55 A.

Proud je zadán na vstupní a výstupní část proudové dráhy. V případě střídavého proudu vycházejí ztráty v proudové dráze rovněž střídavé. Proto je nutné u střídavé analýzy vykreslit průběh ztrát a vyhodnotit střední hodnotu. V tomto případě vyšla velikost ztrát $P_j = 9,2 \text{ W}$.

Analýza Joulových ztrát při průchodu stejnosměrného proudu

Pro stejnosměrnou analýzu je možné použít DCConduction nebo opět Electric transient. Stejně jako střídavé analýzy je nutné i zde definovat velikost proudu a směr proudu. Zadání je tedy provedeno stejným způsobem jako u analýzy střídavého proudu viz obr. 5.7. Při simulaci v DCConduction je možné vypočítat Joulovy ztráty v ustáleném stavu pomocí kalkulačky integrované v programu ANSYS Maxwell. V případě Electric transient je opět vypočtena časová závislost ztrát. V případě DCConduction analýzy byly výsledné Joulovy ztráty $P_j = 9,26 \text{ W}$ a v případě Electric transient jsou pak tyto ztráty $P_j = 9,206 \text{ W}$. V tomto případě je pravděpodobně odchylka způsobena jiným způsobem počítání dané analýzy.

Použitý software

ANSYS Maxwell – školní licence

SolidWorks Flow Simulation – školní licence

Autodesk Inventor – studentská licence

6 VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

6.1 Výsledky měření

Tab. 6.1 Úbytky napětí na proudových drahách

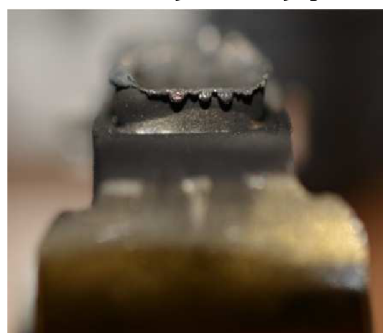
počet operačních cyklů	fáze	U_b	U_{bh}	U_{bd}	$R_{přechh}$	$R_{přechd}$	I
		[mV]	[mV]	[mV]	[Ω]	[Ω]	
0	L1	77,46	20,71	18,52	8,2840E-05	7,4080E-05	250
	L2	77,15	-	-			
	L3	78,12	20,59	21,51	8,2360E-05	8,6040E-05	
1000	L1	121,20	45,02	34,49	1,8008E-04	1,3796E-04	
	L2	76,53	-	-			
	L3	108,80	44,52	33,21	1,7808E-04	1,3284E-04	
2000	L1	88,90	22,57	24,13	9,0280E-05	9,6520E-05	
	L2	77,53	-	-			
	L3	101,30	37,42	14,13	1,4968E-04	5,6520E-05	
3000	L1	84,56	19,50	19,68	7,8012E-05	7,8724E-05	
	L2	91,83	-	-			
	L3	105,52	43,51	21,57	1,7404E-04	8,6280E-05	
4000	L1	103,58	34,01	21,61	1,3604E-04	8,6440E-05	
	L2	107,93	-	-			
	L3	116,92	39,60	24,50	1,5840E-04	9,8000E-05	
6000	L1	96,23	22,30	32,50	8,9200E-05	1,3000E-04	
	L2	96,75	-	-			
	L3	118,07	57,40	21,30	2,2960E-04	8,5200E-05	
8000	L1	114,47	25,22	31,31	1,0088E-04	1,2524E-04	
	L2	106,81	-	-			
	L3	100,72	37,42	24,83	1,4968E-04	9,9320E-05	

Pokud je při měření zjištěno, že na některém pólu dochází k výraznějšímu oteplení, než u jiných je velmi dobré zjistit úbytky napětí na místech kde se předpokládá, že k tomuto zvyšování dochází. V tomto případě se jednalo o kontaktní styky na prvním a třetím pólu jističe, druhý pól nebylo možné měřit, jak je již zmíněno dříve. Při prvním pohledu na tab. 6.1 je patrné, že velikost napěťových úbytků se v závislosti na počtu sepnutí lineárně nezvětšuje. To je způsobeno tím, že při každém spínacím cyklu dochází k opotřebení kontaktu a vzniku nevodivých a cizích vrstev, které mají za následek změnu odporu ve styku dvou kontaktních ploch. Zřetel by se mě především brát na hodnotu oteplení v případě třetího pólu po 6000 cyklech. Zde je napěťový úbytek v horním kontaktním styku největší, tím pádem je zde i největší odpor a vzniklá energie.

Tab. 6.2 Velikost kontaktů v závislosti na počtu sepnutí

fáze	poloha		počet operačních sepnutí			
			0	4000	6000	8000
L1	horní	d_k [mm]	2,59	2,12	1,71	0,09
	spodní		2,60	1,98	1,45	-0,30
L3	horní		2,57	2,23	1,80	0,47
	spodní		2,58	2,00	1,64	0,02

Hodnoty v tab. 6.2 byly změřeny pomocí posuvného měřidla. V tabulce je vidět, jak ubývaly pevné kontakty měřených pólů jističe. Během 6000 cyklů se velikost kontaktů zmenšila přibližně na polovinu a během dalších 2000 cyklů došlo prakticky k úplnému zničení materiálu pevného kontaktu. Spodní kontakt na první fázi jističe v nejnižší části prakticky nebyl a pravděpodobně docházelo k částečnému kontaktu s měděnou proudovou dráhou. Avšak při zpětném pohledu na tab. 6.1 nedochází k výraznému navýšení úbytku napětí v tomto místě. Aby došlo ke kontaktnímu styku i vzhledem k takovému úbytku materiálu, je nutné provést správné nastavení kontaktních pružin. Pro ilustraci, jak vypadá kontakt po určitých počtech sepnutí je zde obr. 6.1. Jedná se o již zmiňovaný spodní kontakt první fáze jističe. U obrázku 6.1 c) se bohužel nepodařilo zaostřit na stejnou hranu jako u obrázku 6.1 a) a 6.1 b), protože tato hrana již neexistovala.



a)



b)



c)

Obr. 6.1 Pevný kontakt jednoho pólu jističe strana vstupu
a) 4000 cyklů, b) 6000 cyklů, c) 8000 cyklů



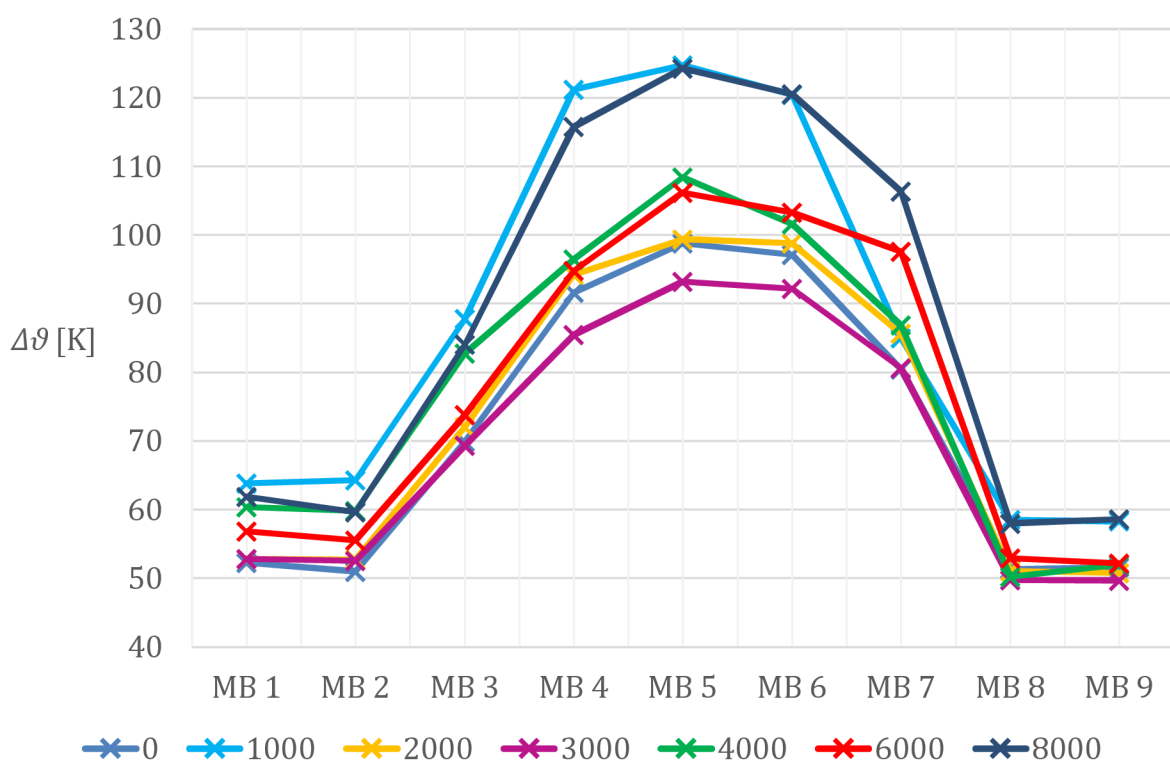
Obr. 6.2 Rameno rotačního mechanismu

Z obr. 6.2 je patrné, že materiál kontaktu na rotačním mechanismu je tvrdší než materiál pevného kontaktu a s velkou pravděpodobností má i lepší odolnost proti opalu obloukem. Právě díky jeho tvrdosti a síle spínacího mechanismu dochází k obroušování pevného kontaktu. Po 8000 cyklech se kontakt jeví jako téměř nepoškozený, největší vliv na tento kontakt mělo hoření oblouku při spínacích cyklech.

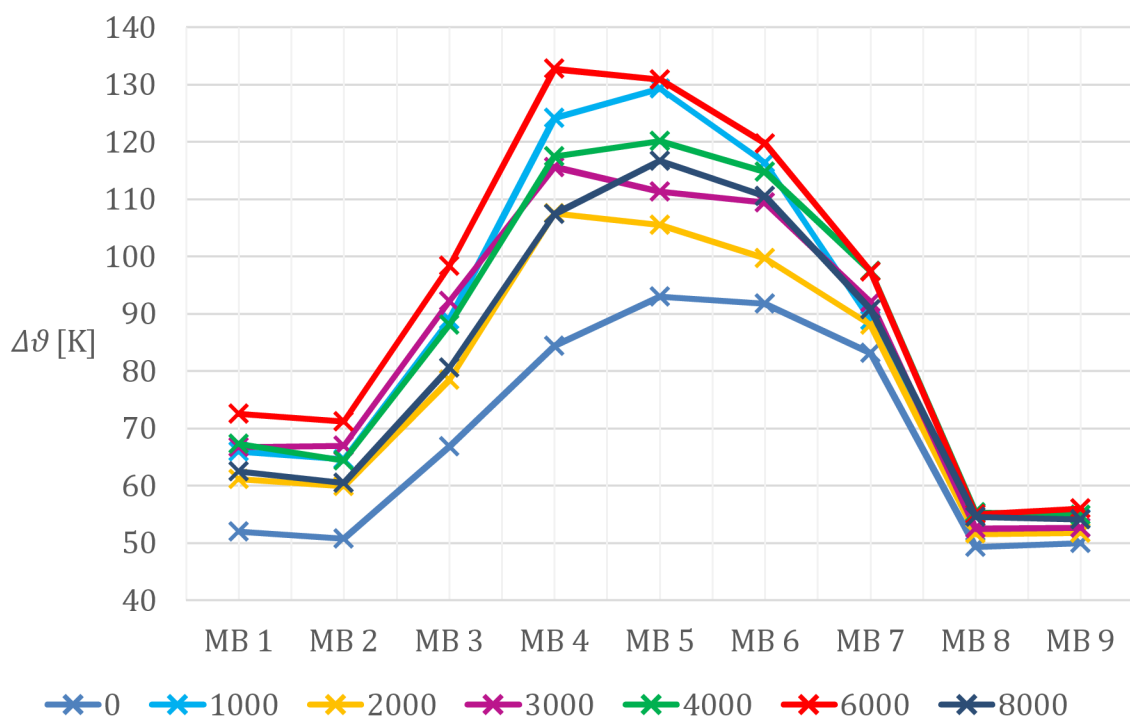
Výsledky měření oteplování jističe jsou zapsány v tab. 2 v seznamu příloh. Vývoj oteplení jednotlivých měřených bodů v závislosti na počtu spínacích cyklů. Z průběhů je patrné, že oteplení se s počtem sepnutí nezvětšuje, ale hodnoty se zdají být nahodilé. To je dáno právě jinými napěťovými úbytky během spínacích cyklů.

Na obr. 6.3 a 6.4 je znázorněn vývoj oteplení na měřených proudových drahách v ustáleném stavu. Hlavním zájmem je, aby nedošlo k překročení hodnot dovoleného oteplení, při kterém dochází k degradacím izolačních materiálů. Výsledné hodnoty nenaznačují, že by docházelo k tak velkému oteplení, které by například ohrožovalo životnost PVC izolace u použitých vodičů. Dalším důležitým faktorem je velikost oteplení na svorkách přístroje. Ve všech případech kromě jednoho bylo oteplení menší, než je dovolené oteplení na svorkách u nového přístroje. V ojedinělém případě, který nastal na třetí fázi po 6000 cyklech nevyhověl požadavku na nový přístroj, ale na přístroj použitý (přístroj již vypnul zkratový proud).

Vzhledem k tomu, že pro dostupnost na měřená místa byla odstraněna část krytu jističe, je možné že změřené hodnoty budou tímto zásahem ovlivněny. Pro udržení tlakových poměrů v pólových kazetách, bylo použito na vytvořené otvory použita speciální páska, avšak ani více vrstev této pásky nedokázalo zajistit stejné tlakové poměry jako tomu je u originální kazety. Páska byla ponechána i při měření oteplení přístroje odstraněna byla pouze při měření daného bodu.

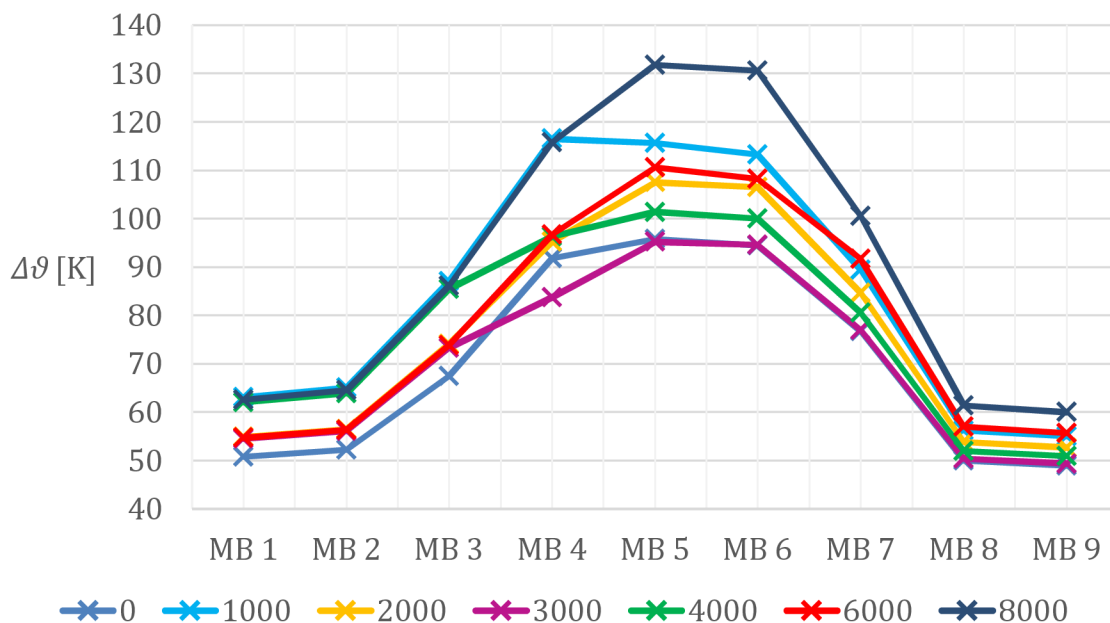


Obr. 6.3 Vývoj oteplení na proudové dráze L1 - měření

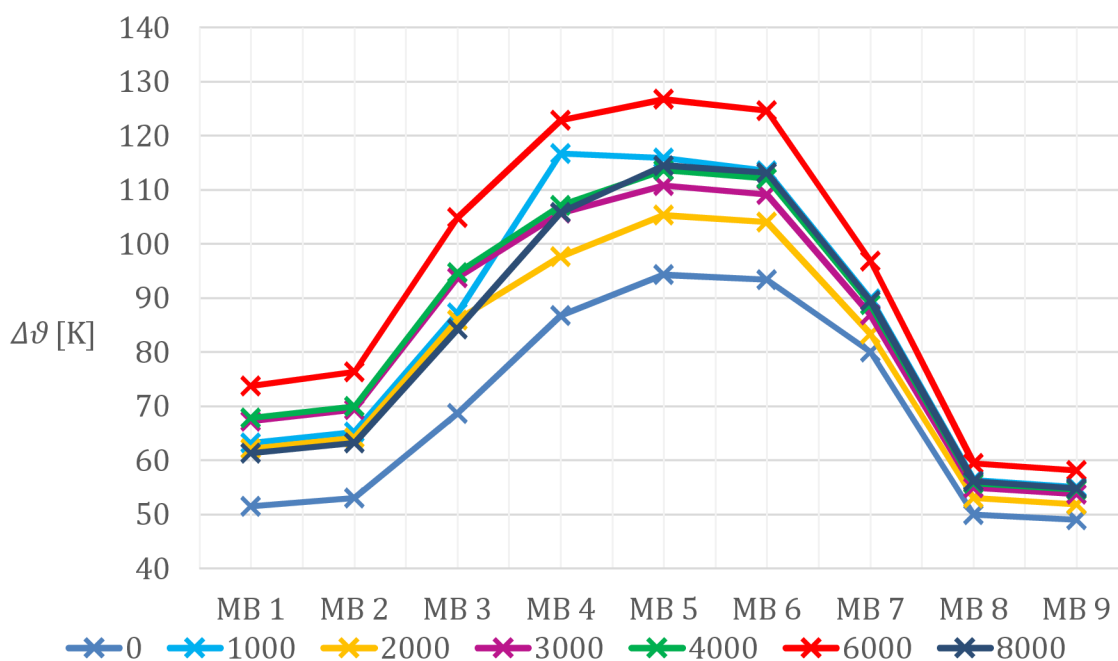


Obr. 6.4 Vývoj oteplení na proudové dráze L3 - měření

6.2 Výsledky simulací



Obr. 6.5 Vývoj oteplení na proudové dráze L1 - simulace

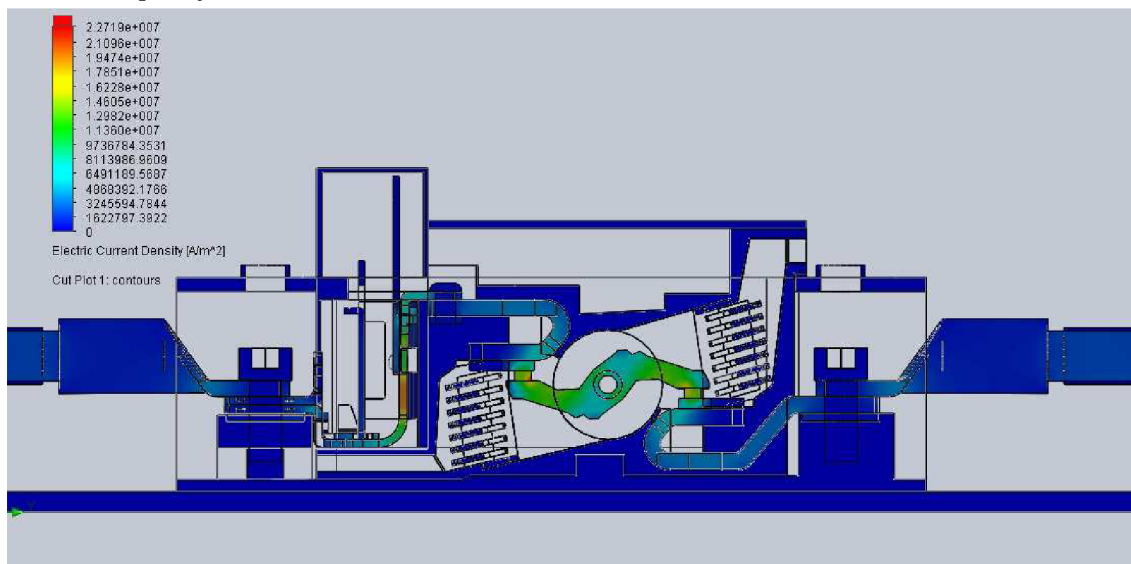


Obr. 6.6 Vývoj oteplení na proudové dráze L3 - simulace

Simulace v SolidWorks Flow simulation

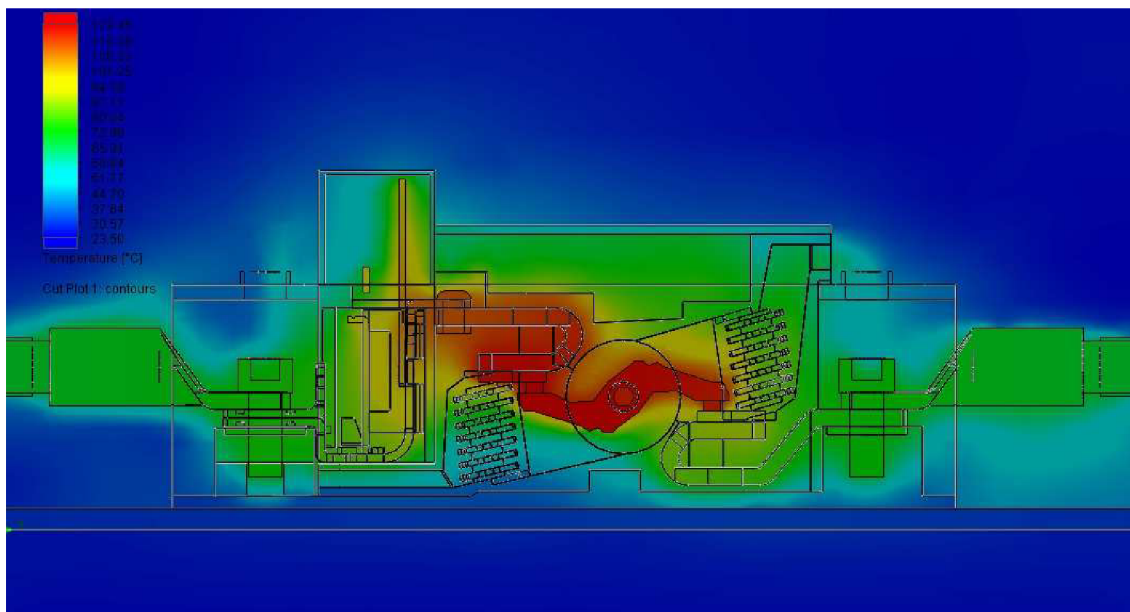
V případě simulace v programu Flow Simulation byly měřené body zvoleny stejně jako tomu bylo u měření. Výsledné teploty v jednotlivých bodech byly zaznamenány do tabulky a následně dopočítány hodnoty oteplení a zaznamenány do tab. 2 v příloze. Z vypočítaných hodnoty byly vytvořeny teplotní profily proudové dráhy v závislosti na počtu sepnutí viz obr. 6.5 a 6.6. Pro přesnější výsledky simulace byly použity změřené hodnoty přechodových odporů z tab. 6.1. V programu Flow Simulation je možné kromě zjišťování hodnot na vybraných místech, která uživatele zajímají, vykreslovat i počítané veličiny na celém simulovaném modelu jako například:

- Proudová hustota
- Napětí
- Teplota (je možné zobrazit zvlášť teplotu tekutiny a pevných částí)
- Rychlost proudění média
- Tepelný tok



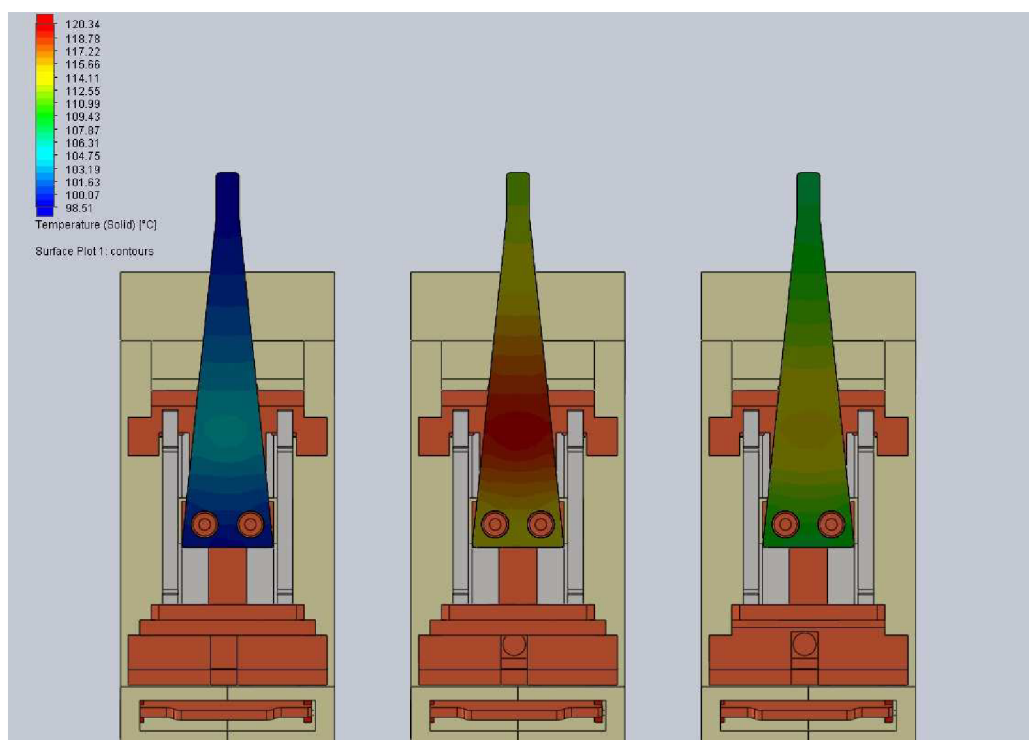
Obr. 6.7 Proudová hustota na fázi L3 po 1000 operačních cyklech

Na obr. 6.7 je možné sledovat místa s větší proudovou hustotou (topítka bimetalu a rotační kontakty). Jedná se o místa, kde je zúžená proudová dráha. U topítka je toto zúžení dráhy účelné, tímto vlivem totiž dochází na topítku většímu prohřívání a tím pádem dochází i k ohřevu paty bimetalu. Pokud by došlo k průchodu nadproudu touto částí, byla by proudová hustota ještě větší a docházelo by k většímu prohřívání z toho důvodu by se bimetal začal více ohýbat a začal by působit na spoušť. Další navýšení proudové hustoty je v místech, kde dochází k ohybu proudové dráhy.



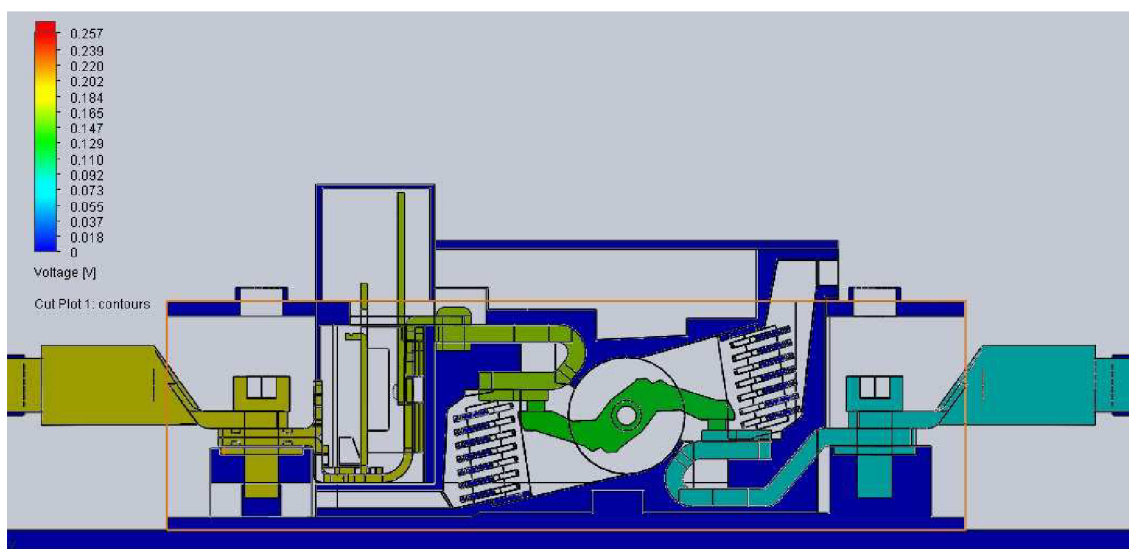
Obr. 6.8 Teplota na fázi L3 pro 0 operačních cyklů

Při znázornění teploty je možné vidět, že nejvíce se zahřívá rotační část to je způsobeno přechodovými odpory v kontaktních stycích. Dále je možné si povšimnout, že v horní části jističe (vpravo) uvnitř kazety jsou teploty vyšší než v dolní části. To je způsobeno přirozeným prouděním okolního média. Vzhledem k zobrazované oblasti bohužel není vidět legenda (červené oblasti 122 °C, žluté 94 °C, zelené 72 °C, světle modré 52, tmavě modrá 23,5 °C).



Obr. 6.9 Rozložení teplot na bimetalech

Na obr. 6.9 je znázorněno rozložení teplot na bimetalech všech fází. Zde je možné pozorovat, jak se od sebe jednotlivé teploty liší. Tato odlišnost je dána především rozdílnými přechodovými odpory u rotační části. Ve většině případů se hlavně sleduje teplota na patě bimetalu, protože změna teploty na patě způsobuje ohyb bimetalu. V simulaci však dochází ke většímu ohřevu v místě nad patou bimetalu. Na tomto místě je bimetal v těsné blízkosti nýtu, který spojuje topítko a jádro elektromagnetické spouště. Je možné, že se jedná o chybu výpočtu, protože došlo k překreslování originální proudové dráhy a ve skutečnosti může být nýt více vzdálený.



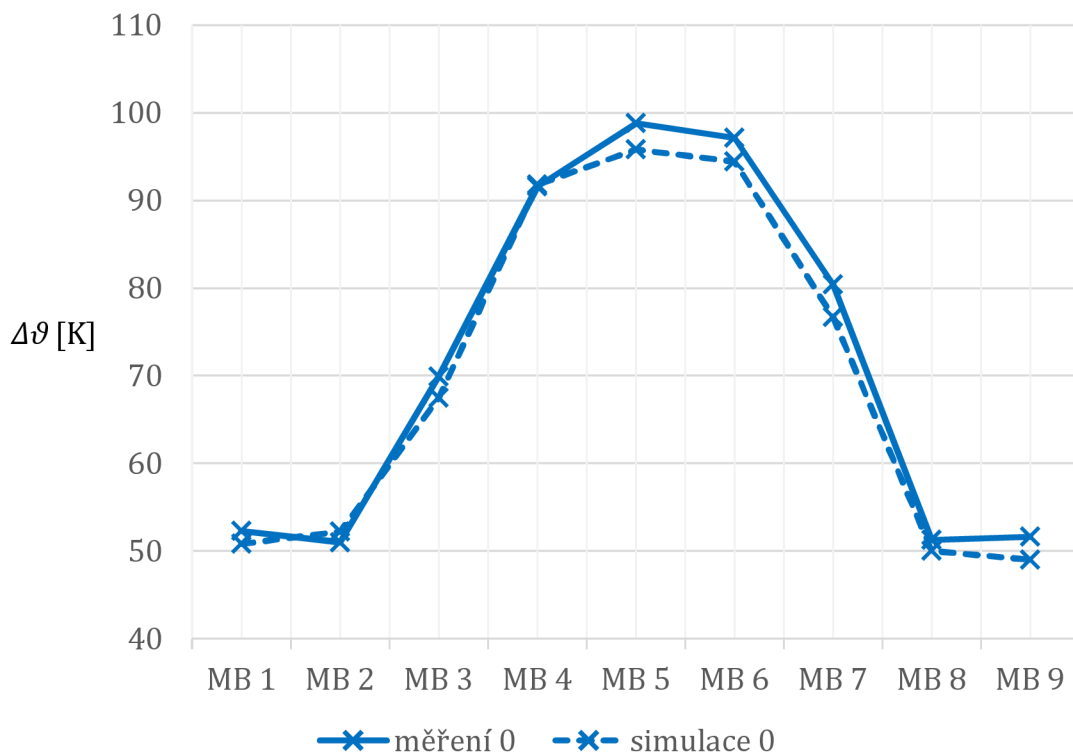
Obr. 6.10 Napětí na fázi L3

Jednou z dalších možností, kterou program nabízí je vykreslení vývoje napětí na zvolené geometrii. Na obr. 6.10 je možné vidět rozložení napětí na proudové dráze fáze L3. Z těchto znázornění je možné si dopočítat velikosti úbytků. Pokud však jsou vybrány měřené body je vhodnější použít pro výpočet úbytků právě tyto body.

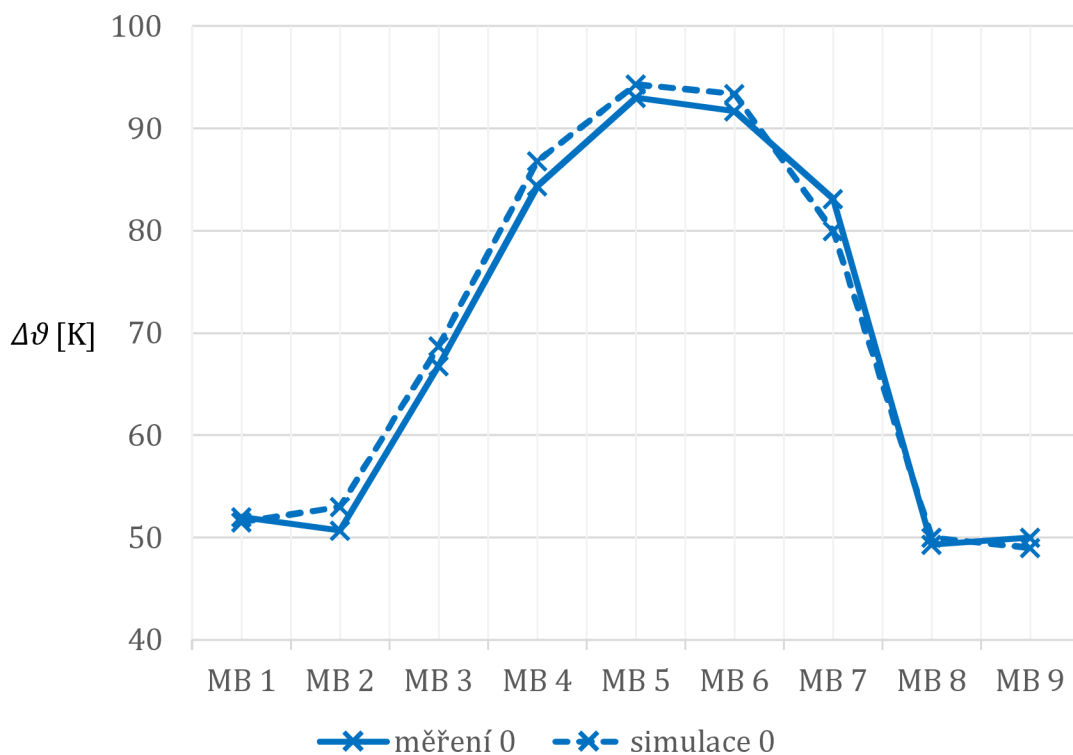
Simulace v ANSYS Maxwell

Výsledná hodnota při střídavé analýze a střídavém proudu byla $P_j=9,2$ W, pro střídavou analýzu a stejnosměrný proud $P_j=9,206$ W, a pro statickou analýzu $P_j=9,26$ W. Při porovnání výsledků střídavé a stejnosměrné analýzy je možné dojít k závěru, že se Joulovy ztráty od sebe příliš neliší, v případě Electric transient analýzy je chyba 0,065 % a při porovnání Electric transient a DC Conduction je chyba 0,65 %. Jako referenční hodnota byl brán výsledek při střídavém proudu. Je vidět, že rozdíly střídavé a stejnosměrné analýzy jsou menší než jedno procento. Z tohoto důvodu by se při řešení transientní analýzy se střídavým proudem jednalo o zbytečně zdlouhavé řešení dané problematiky.

6.3 Porovnání měření a Solidworks Flow simulation



Obr. 6.11 Vývoj oteplení na proudové dráze L1 - simulace a měření



Obr. 6.12 Vývoj oteplení na proudové dráze L3 - simulace a měření

Simulace oteplení byla provedena pouze v programu Solidworks flow simulation i přesto bylo v rámci diplomové práce uskutečněno velké množství měření a simulací. Pro názornost byl tedy vybrán pouze stav při žádných spínacích cyklech viz obr. 6.11 a 6.12 a ostatní průběhy budou znázorněny na obr. 8 a 9 v příloze. Při porovnání výsledků měření a simulací byla brána jako referenční hodnota změřená a zjišťovala se chyba simulace oproti měření. Z obr 6.11 a 6.12 je patrné, že teplotní profil je přibližně stejný, avšak v simulaci se oproti měření vyskytují chyby. Vzhledem k tomu, že by simulované hodnoty prostřední fáze nebylo možné porovnat s měřením nebyly změřeny ani v simulaci.

Tab. 6.3 Absolutní chyba pro počet operačních cyklů rovno 0

počet operačních cyklů	fáze	Δ_{θ} [K]								
		MB 1	MB 2	MB 3	MB 4	MB 5	MB 6	MB 7	MB 8	MB 9
0	L1	-1,5	-1,2	2,4	-0,2	3	2,7	3,7	1,3	2,6
	L2	-1,8	-1,3					3,8	0,8	1,9
	L3	-0,5	-2,3	-1,9	-2,4	-1,3	-1,7	3,1	-0,7	1

Tab. 6.4 Relativní chyba pro počet operačních cyklů rovno 0

počet operačních cyklů	fáze	δ_{θ} [%]								
		MB 1	MB 2	MB 3	MB 4	MB 5	MB 6	MB 7	MB 8	MB 9
0	L1	-2,87	-2,35	3,43	-0,22	3,04	2,78	4,60	2,53	5,04
	L2	-3,38	-2,51					4,38	1,47	3,49
	L3	-0,96	-4,54	-2,84	-2,84	-1,40	-1,85	3,73	-1,42	2,00

V tab. 6.4 je možné vidět, že relativní chyba se pohybuje zhruba od -5 do 5 %. Chyby byly určeny i pro další měření a simulace a jsou zaneseny do tab. 4 a 5 v příloze. Během simulací byla snaha držet chybu výpočtu pod ± 10 %, to se povedlo ve všech případech kromě jednoho, kdy při simulaci po 1000 operačních cyklech došlo k chybě 10,36 % na fázi L3 v měřeném bodě 5. Tyto chyby jsou s velkou pravděpodobností dány chybami v modelu a zjednodušení, například:

- Nebyl modelován spínací mechanismus – ten je z většiny tvořen kovovými částmi, avšak tyto části se nacházejí a za pólovými kazetami, a navíc se nachází pouze nad prostřední kazetou.
- Vynechání housingu pro rotační část – ta je tvořena izolačním materiálem a je speciálně upravena, aby do sebe housingy jednotlivých kazet zapadaly. Uvnitř tohoto housingu je ještě nosič pružin a kovová hřídelka (zde je možné malé ovlivnění vedení tepla)
- Nepřesnosti modelované proudové dráhy – rozměry byly změřeny pouze za pomoci posuvného měřidla, přičemž některé části proudové dráhy se ohýbají na více krát a je zde velké množství různých zaoblení a vybrání, které mohou ovlivňovat rozložení teploty.

- Nevodivými nebo cizími vrstvami – tyto vrstvy se těžko simulují, protože k jejich vytváření dochází vždy na jiných místech, chyba tvořená tímto faktorem byla částečně odstraněna pomocí zadaného odporu v kontaktním styku. Přesto se na reálném přístroji mohou vyskytovat místa s dobrou a špatnou tepelnou vodivostí.
- Dalším faktorem, který hraje roli v přesnosti výpočtu je síť – pokud není síť dostatečně hustá může docházet k chybám v simulaci, například vznik singularit – míst s vyšší hodnotou veličiny, která nemá fyzikální smysl. Zároveň je vhodné aplikovat takovou síť, aby výpočet proběhl v relativně krátkém čase (záleží na náročnosti modelu).

7 ZÁVĚR

Praktická část práce je zaměřena na měření a simulace. Měření probíhalo na jističi nízkého napětí s jmenovitým proudem 250 A. Jističí přístroj byl osazen elektromagnetickou a tepelnou spouští, kde bylo zjišťováno, jaký vliv mají spínací cykly mechanismu na tepelnou spoušť.

Spínacími cykly je myšlena zkouška elektrické trvanlivosti, při které probíhá spínání obvodu za podmínek pracovního napětí 415 V a jmenovitého proudu 250 A při účinnosti 0,813. Počet cyklů, které byly vykonány, byl zvolen na hodnotu čtyř za jednu minutu, spínání probíhalo pomocí pneumatického pohonu. Po 4000 spínacích cyklech byl z důvodů uvolnění některých šroubků na pólových kazetách přístroj rozebrán a při této příležitosti byly změřeny pevné kontakty jističe. Po dalších 2000 spínacích cyklech bylo nutné přistoupit k dalšímu rozebrání tentokrát z důvodu obavy, zda již nejsou pevné kontakty zcela zničeny. Tento předpoklad byl však vyvrácen a zkouška poté pokračovala dalšími 2000 cykly. Po dokončení 8000 cyklů byl přístroj rozebrán a jeho části analyzovány. Velikost kontaktů v průběhu cyklů je zaznamenána v tab. 6.2 a obr. 6.1 a) – c). Z obrázků a tabulky je patrné, že po 8000 cyklech pevné kontakty na proudové dráze prakticky neexistují. Na obr. 6.2 je vyfocen rotační kontakt, který je z tvrdšího materiálu než kontakt pevný a spínací cykly na něj neměly téměř žádný vliv. To, že se jeden z kontaktů vyznačuje větší tvrdostí je důležité, díky tomu dochází při spínání k narušování některých cizích a nevodivých vrstev.

V návaznosti na zkoušky elektrické trvanlivosti byly provedeny i oteplovací zkoušky jističe. Tyto zkoušky probíhaly při jmenovitém proudu 250 A, průřez vodiče byl 120 mm² a délka 2 m. Během zkoušek byly zvoleno 9 měřených bodů na krajních fázích a 5 bodů na prostřední fázi. Na prostřední fázi bylo zvoleno méně bodů z důvodů špatné dostupnosti do vnitřní části kazety. Na krajních fázích došlo k zásahu do kazet viz obr 4.2. Měřené body jsou označeny MB 1 – MB 9, přičemž byl zvolen postup od svorky na výstupní straně po svorku na vstupní straně. Výsledky měření jsou zaznamenány v tab. 2 v příloze a fáze L1 a L3 jsou vyhotoveny profily oteplení na jednotlivých bodech v závislosti na počtu spínacích cyklů. Při vyhodnocování hodnot z grafů na obr. 6.3 a 6.4 a tab. 2 oteplení byl brán největší zřetel na oteplení na svorkách jističe. Pro nový přístroj je přípustná hodnota oteplení na svorkách 70 K. Této podmínce vyhovuje fáze L1 a L2 ve všech změřených hodnotách na bodech MB 1 a MB 9. U fáze L3 je hodnota oteplení po 6000 cyklech 73,8 K to znamená, že pro nároky podmínky oteplení do 70 K nevyhovuje, avšak vyhovuje podmínce, která je stanovena pro použité přístroje, kde je hodnota o 10 K vyšší. Vývoje oteplení jednotlivých bodů v závislosti na spínacích cyklech jsou znázorněny na obr. 1–7 v příloze. U těchto obrázků je možné

si všimnout, že oteplení na měřených bodech pouze nenarůstá, ale v průběhu spínacích cyklů dochází ke kolísání. To je dáno převážně velikostí přechodového odporu v kontaktních stycích viz tab. 6.1. Dá se tedy říci, že spínací cykly mají přímý vliv na oteplování bimetalu prostřednictvím změn přechodových odporů.

Simulace byly provedeny ve dvou programech. Prvním z programů byl ANSYS Maxwell. V tomto programu byla provedena analýza proudové dráhy jisticího přístroje, za účelem zjištění ztrát vzniklých průchodem střídavého a stejnosměrného proudu. Analýza byla provedena pomocí řešiče Electric transient a DC Conduction. Pro řešič Electric transient byl zvolen jak střídavý, tak stejnosměrný proud, u DC Conduction, který počítá ustálený stav pouze byl zvolen stejnosměrný proud. Velikost proudu byla stejná jako je jmenovitý proud jističe. Při analýze bylo zjištěno, že výsledná chyba mezi jednotlivými řešeními je menší než 1 % z toho důvodu bylo rozhodnuto, že počítání tepelné transientní analýzy, by bylo zbytečně časově náročné. V návaznosti na toto zjištění byla provedena pouze analýza v ustáleném stavu. Pro řešení transientní analýzy by byla potřeba složená úloha skládající se z řešení Joulových ztrát pomocí ANSYS Maxwell, implementace výpočtu do ANSYS Workbench, ve kterém by ještě přišla na řadu už zmiňovaná tepelná transientní analýza a analýza proudění.

Analýza ustáleného stavu proběhla v simulačním prostředí Flow Simulation od společnosti SolidWorks. Tento program je primárně určen pro výpočty proudění, má však modifikaci, která umožňuje zadávat podmínky pro vznik Joulových ztrát. To znamená, že všechny důležité parametry jsou nastaveny v jednom řešiči, který při počítání tyto parametry vyhodnocuje. Pro hlavní výsledky simulace byly zvoleny stejné body zájmu jako při měření. Výsledky simulací jsou rovněž zaznamenány v tab. 3 stejně jako tomu bylo u měření a z hodnot fáze L1 a L3 sestrojeny grafy na obr. 6.5 a 6.6. Dalšími výsledky, které program nabízí je možnost zobrazit i další veličiny, které jsou zároveň vyhodnocovány během výpočtu. Některé z výsledků jsou znázorněny na obr. 6.7 – 6.10.

Na závěr je provedeno porovnání měření a simulace. Pro názornost byl vybrán pouze jeden průběh pro simulaci a měření obr. 6.11 a 6.12, další průběhy jsou v příloze na obr. 8 a 9. Výsledkem porovnání jsou absolutní a relativní chyby viz tab. 6.3 a 6.4. Bylo zjištěno, že se chyby pohybují okolo ± 5 %. Porovnání dalších měření a simulací je v příloze v tab. 4 a 5. Jako referenční hodnoty byly brány hodnoty z měření. Výsledné hodnoty se v nejhorším případě liší o 10,36 %. V simulaci byla snaha udržet tuto chybu pod 10 %, avšak i 10 % je poměrně vysoká chyba. Důvody výskytu chyb jsou uvedeny na konci kapitoly 6.3. V praxi by se daly tyto výsledky ještě zpřesnit, to by ale vyžadovalo dlouhodobé zkoumání dané problematiky na větším množství elektrických přístrojů.

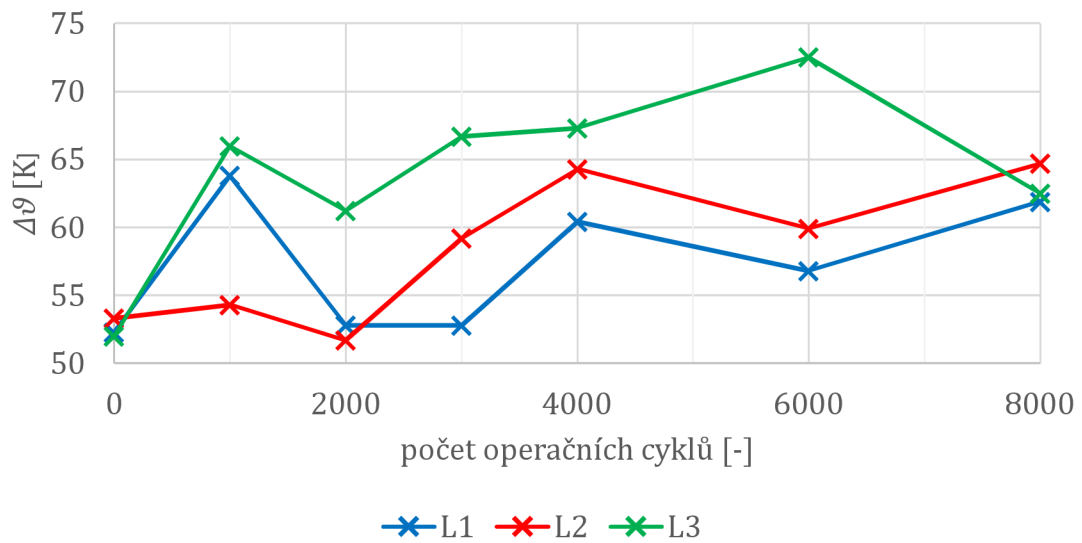
Literatura

- [1] HAVELKA, Otto a kol. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985.
- [2] RAČEK, Jiří. *Technická mechanika: mechanika tekutin a termomechanika*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2004. ISBN 80-214-2598-9.
- [3] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřící obvody*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [4] LIPTÁK, JAN; SEDLÁČEK, JOSEF. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005.
- [5] VALENTA, Jiří. *Přednášky předmětu MSVP* [online]. [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/193665/mod_resource/content/1/P5_Kontaktni_ustroji_JV2013.pdf
- [6] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [7] KREJČÍ, Jan. *Vysvetlenie pojmov – parametrov ističov* [online]. OEZ s.r.o Letohrad [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/26904702-Vysvetlenie-pojmov-parametrov-isticov.html>
- [8] VALENTA, Jiří *Přednášky předmětu MDJZ* [online]. [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/355309/mod_resource/content/3/MDJZ_p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ky.pdf
- [9] HELŠTÝN, David, Petr KAČOR a Zdeněk HYTKA. *Elektrické přístroje spínací ochranné a jistící: průvodce studiem*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, Regionální centrum celoživotního vzdělávání, 2003. ISBN 80-248-0315-1.
- [10] OEZ Letohrad a.s. *Příručka elektrotechnika jistící přístroje I*. [online]. Letohrad: OEZ Letohrad a.s., 2011 [cit. 2. 1. 2018]. Dostupné na: <http://www.oez.cz/modra-planeta/prirucka-elektrikare>
- [11] KRÍŽ, Michal. *Omezený proud* [online]. In: . [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: <http://www.in-el.cz/referat/103020/zkratove-proudy-zakladni-veliciny-jejich-vyklad-pozadavky-na-ochranu-pred-zkratovymi-proudy-priklady-vypoctu>

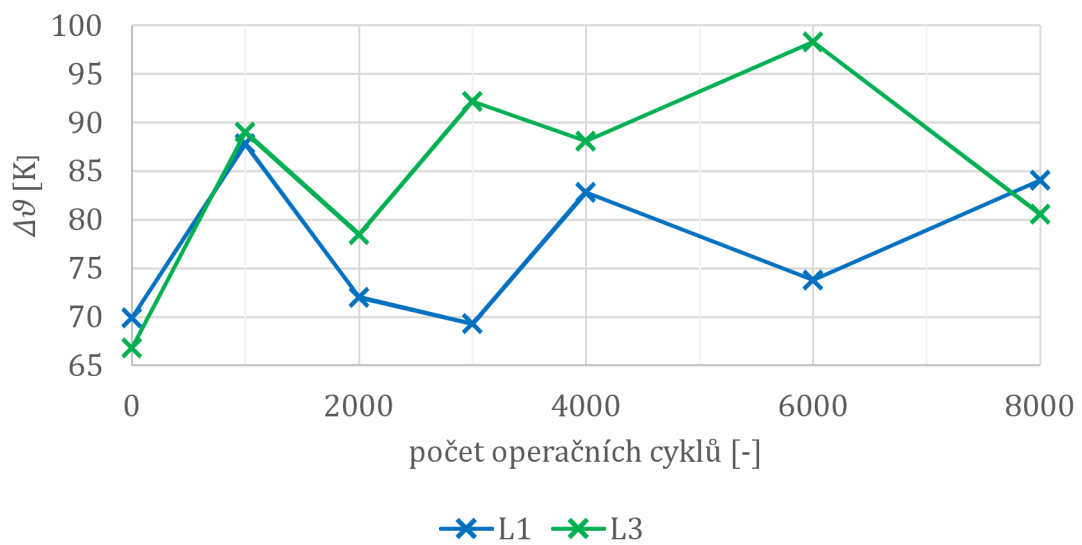
Seznam symbolů, veličin a zkratek

c	měrná objemová tepelná kapacita	$[J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
C	tepelná kapacita	$[J \cdot K^{-1}]$
d	délka	$[m]$
d_k	velikost kontaktu	$[mm]$
i	okamžitá hodnota proudu	$[A]$
I_n	jmenovitý proud jističe	$[A]$
L1, L2, L3	označení fází	
nn	nízké napětí	
p_j	okamžitá hodnota Joulových ztrát	$[W]$
P_j	Joulovy ztráty	$[W]$
R	odpor	$[\Omega]$
$R_{přechd}$	přechodový odpor na spodních kontaktech	$[\Omega]$
$R_{přechh}$	přechodový odpor na horních kontaktech	$[\Omega]$
S	plocha	$[m^2]$
t	čas	$[s]$
U_b	úbytek napětí	$[V]$
U_{bd}	úbytek napětí na spodních kontaktech	$[mV]$
U_{bh}	úbytek napětí na horních kontaktech	$[mV]$
V	objem	$[m^3]$
α	součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
α_R	součinitel délkové roztažnosti	$[K^{-1}]$
Δd	prodloužení	$[m]$
$\Delta \vartheta$	oteplení	$[K]$
$\Delta \vartheta_{inf}$	oteplení v čase nekonečno	$[K]$
ϑ	teplota	$[^{\circ}C]$
λ	tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
τ	časová konstanta	$[s]$

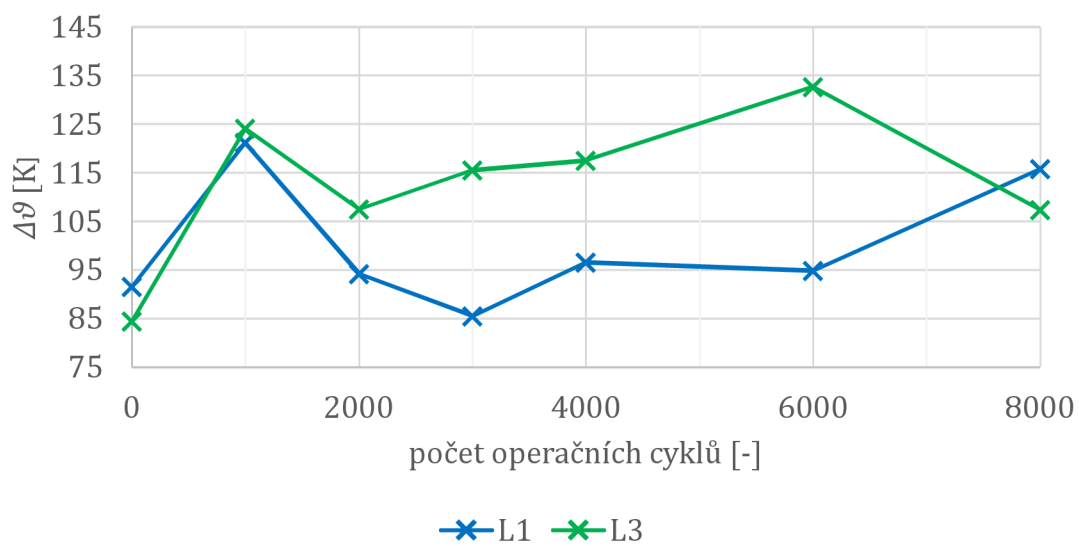
Seznam příloh



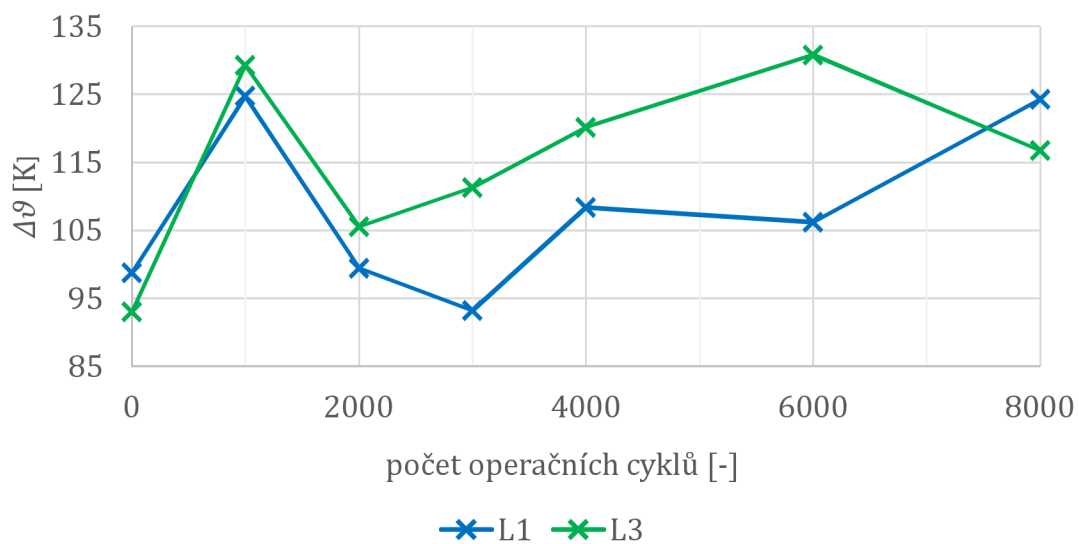
Obr. 1 Vývoj oteplení na svorce jističe nn - výstup



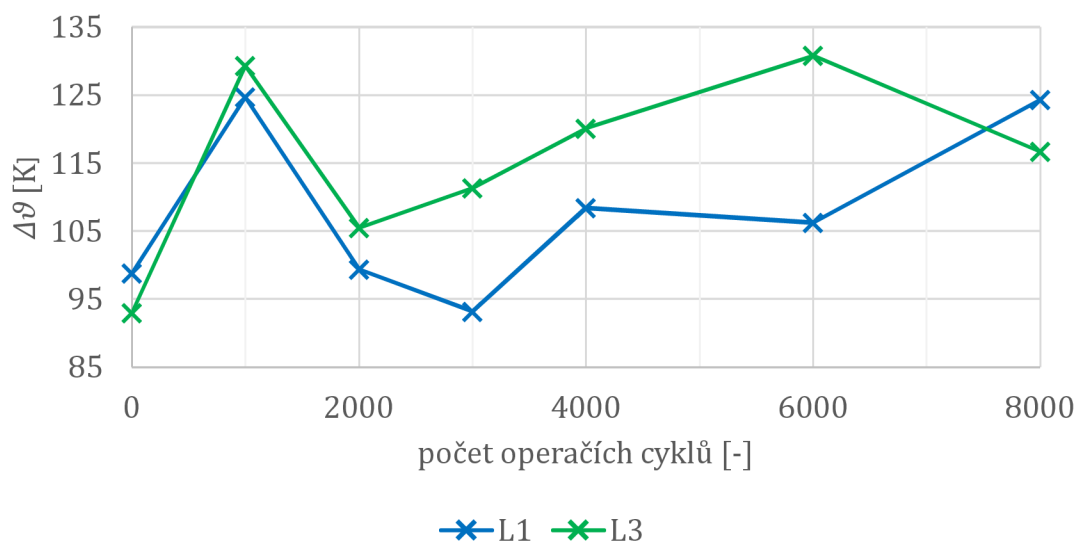
Obr. 2 Vývoj oteplení na pevném kontaktu jističe nn - výstup



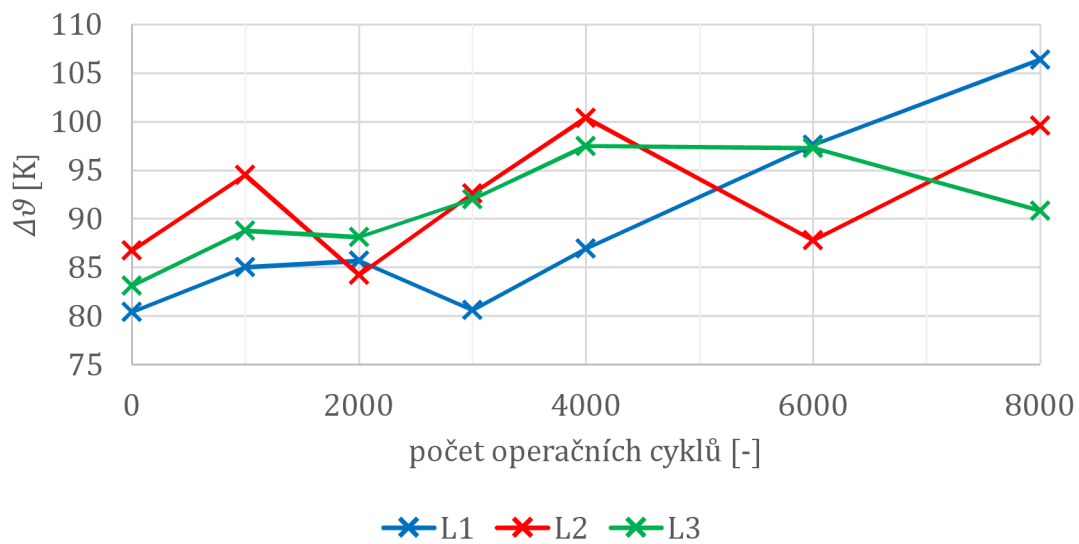
Obr. 3 Vývoj oteplení na pohyblivém kontaktu jističe nn - výstup



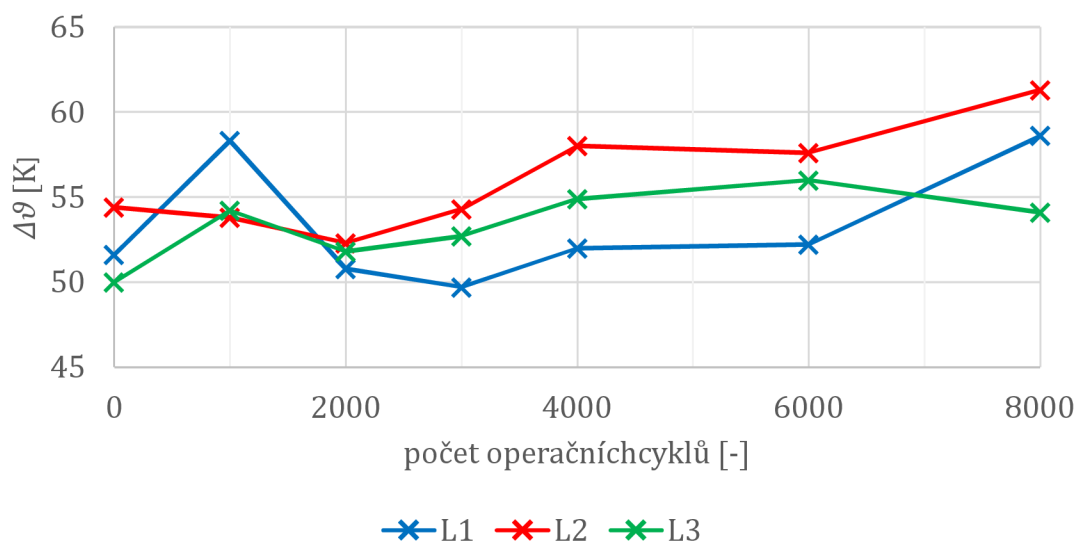
Obr. 4 Vývoj oteplení na pohyblivém kontaktu jističe nn - vstup



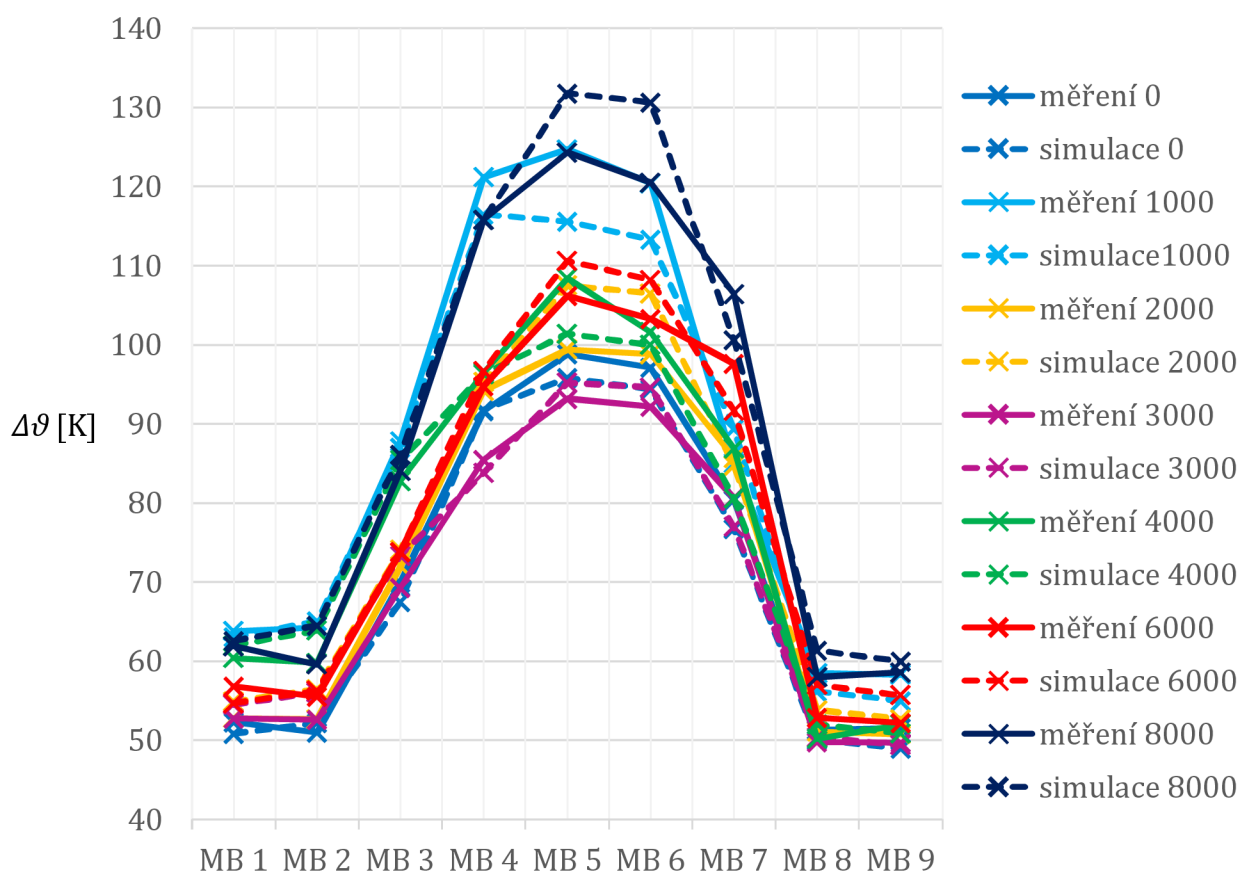
Obr. 5 Vývoj oteplení na pevném kontaktu jističe nn - vstup



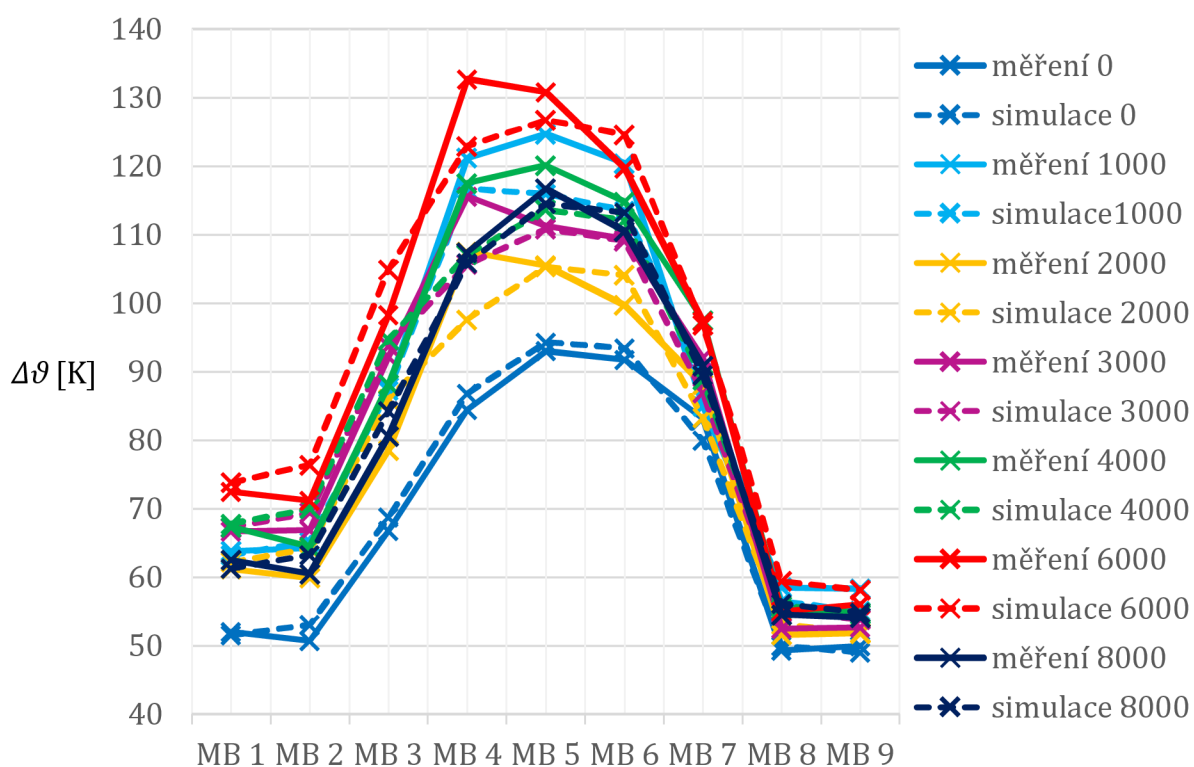
Obr. 6 Vývoj oteplení na patě bimetalu jističe nn



Obr. 7 Vývoj oteplení na svorce jističe nn - vstup



Obr. 8 Vývoj oteplení na proudové dráze L1 - měření a simulace



Obr. 9 Vývoj oteplení na proudové dráze L3 – měření a simulace

Tab. 1 Vlastnosti okolí při měření oteplovacích zkoušek

počet operačních cyklů	[-]	0	1000	2000	3000	4000	6000	8000
teplota okolí	[°C]	23,5	23,6	23,7	23,0	24,1	24,6	24,8
vlhkost	[%]	14,6	26,2	23,8	13,8	23,2	35,7	37,3
tlak	[hPa]	988,9	978,3	974,7	976,4	998,3	994,8	984,0
rosný bod	[°C]	4,2	4,9	0,5	-6,0	6,9	7,6	9,7

Tab. 2 Hodnoty oteplení proudové dráhy - měření

počet operačních cyklů	fáze	$\Delta\theta$ [K]								
		MB 1	MB 2	MB 3	MB 4	MB 5	MB 6	MB 7	MB 8	MB 9
0	L1	52,3	51	69,9	91,6	98,8	97,1	80,4	51,3	51,6
	L2	53,3	51,8	-	-	-	-	86,7	54,3	54,4
	L3	52	50,7	66,8	84,4	93	91,7	83,1	49,3	50
1000	L1	63,8	64,3	87,8	121,2	124,7	120,4	85	58,5	58,3
	L2	54,3	53,6	-	-	-	-	94,5	53,7	53,8
	L3	66	64,6	89	124,1	129,3	116,3	88,8	55,1	54,2
2000	L1	52,8	52,7	72	94,2	99,4	98,8	85,7	51,1	50,8
	L2	51,7	50,5	-	-	-	-	84,2	52,1	52,3
	L3	61,2	59,9	78,5	107,5	105,5	99,7	88,1	51,6	51,8
3000	L1	52,8	52,6	69,3	85,5	93,2	92,2	80,6	49,8	49,7
	L2	59,2	58,5	-	-	-	-	92,6	54,4	54,3
	L3	66,7	66,9	92,2	115,6	111,3	109,4	92	52,5	52,7
4000	L1	60,4	59,8	82,8	96,5	108,4	101,6	86,9	50,2	52
	L2	64,3	63,7	-	-	-	-	100,4	57,2	58
	L3	67,3	64,4	88,1	117,5	120,1	114,8	97,5	55,3	54,9
6000	L1	56,8	55,5	73,8	94,8	106,2	103,3	97,6	52,9	52,2
	L2	59,9	58,6	-	-	-	-	87,8	56,9	57,6
	L3	72,5	71,2	98,3	132,7	130,8	119,7	97,3	55	56
8000	L1	61,9	59,6	84,1	115,8	124,3	120,5	106,4	58	58,6
	L2	64,7	63,3	-	-	-	-	99,6	60,4	61,3
	L3	62,5	60,5	80,6	107,4	116,7	110,5	90,8	54,5	54,1

Tab. 3 Hodnoty oteplení proudové dráhy - simulace

počet operačních cyklů	fáze	$\Delta\theta$ [K]								
		MB 1	MB 2	MB 3	MB 4	MB 5	MB 6	MB 7	MB 8	MB 9
0	L1	50,8	52,2	67,5	91,8	95,8	94,4	76,7	50	49
	L2	51,5	53,1	-	-	-	-	82,9	53,5	52,5
	L3	51,5	53	68,7	86,8	94,3	93,4	80	50	49
1000	L1	63,1	65,1	87	116,5	115,6	113,3	89,4	56,2	55
	L2	56,5	58,3					91,7	58,1	56,9
	L3	63,2	65,2	87,2	116,7	115,9	113,5	89,8	56,4	55,1
2000	L1	54,9	56,5	74,1	95,3	107,5	106,5	84,7	53,8	52,7
	L2	51,9	53,5	-	-	-	-	84,2	54,3	53,3
	L3	62,2	64,2	86	97,6	105,3	104,1	83,3	53,1	51,9
3000	L1	54,5	56,1	73,3	83,8	95,2	94,6	77	50,4	49,4
	L2	56,5	58,3	-	-	-	-	91,2	57,7	56,6
	L3	67,2	69,4	93,7	105,7	110,8	109,1	86,9	55	53,8
4000	L1	62	63,9	85,4	96,3	101,4	100	80,6	52	50,9
	L2	59,6	61,5	-	-	-	-	96,9	60,3	59,1
	L3	67,8	70	94,7	107,1	113,6	112,1	88,8	55,8	54,6
6000	L1	54,7	56,3	73,8	96,7	110,6	108,2	91,7	57	55,7
	L2	54,1	55,7					86,6	55,5	54,5
	L3	73,8	76,4	104,9	122,9	126,7	124,6	96,8	59,4	58,1
8000	L1	62,6	64,5	86,1	115,8	131,8	130,6	100,6	61,4	60
	L2	59,9	61,7	-	-	-	-	98	60,9	59,7
	L3	61,3	63,2	84,3	105,8	114,5	113,2	89,5	56,1	54,8

Tab. 4 Absolutní chyba

počet operačních cyklů	fáze	Δ_{ϑ} [K]								
		MB 1	MB 2	MB 3	MB 4	MB 5	MB 6	MB 7	MB 8	MB 9
0	L1	-1,5	-1,2	2,4	-0,2	3	2,7	3,7	1,3	2,6
	L2	-1,8	-1,3					3,8	0,8	1,9
	L3	-0,5	-2,3	-1,9	-2,4	-1,3	-1,7	3,1	-0,7	1
1000	L1	-0,7	-0,8	0,8	4,7	9,1	7,1	-4,4	2,3	3,3
	L2	2,2	-4,7					2,8	-4,4	-3,1
	L3	-2,8	-0,6	1,8	7,4	13,4	2,8	-1	-1,3	-0,9
2000	L1	2,1	-3,8	-2,1	-1,1	-8,1	-7,7	1	-2,7	-1,9
	L2	0,2	-3					0	-2,2	-1
	L3	1	-4,3	-7,5	9,9	0,2	-4,4	4,8	-1,5	-0,1
3000	L1	1,7	-3,5	-4	1,7	-2	-2,4	3,6	-0,6	0,3
	L2	-2,7	0,2					1,4	-3,3	-2,3
	L3	0,5	-2,5	-1,5	9,9	0,5	0,3	5,1	-2,5	-1,1
4000	L1	1,6	-4,1	-2,6	0,2	7	1,6	6,3	-1,8	1,1
	L2	-4,7	2,2					3,5	-3,1	-1,1
	L3	0,5	-5,6	-6,6	10,4	6,5	2,7	8,7	-0,5	0,3
6000	L1	2,1	-0,8	0	-1,9	-4,4	-4,9	5,9	-4,1	-3,5
	L2	-5,8	2,9					1,2	1,4	3,1
	L3	1,3	-5,2	-6,6	9,8	4,1	-4,9	0,5	-4,4	-2,1
8000	L1	0,7	-4,9	-2	0	-7,5	-10,1	5,8	-3,4	-1,4
	L2	-4,8	1,6					1,6	-0,5	1,6
	L3	-1,2	-2,7	-3,7	1,6	2,2	-2,7	1,3	-1,6	-0,7

Tab. 5 Relativní chyba

počet operačních cyklů	fáze	δ_{ϑ} [%]								
		MB 1	MB 2	MB 3	MB 4	MB 5	MB 6	MB 7	MB 8	MB 9
0	L1	-2,87	-2,35	3,43	-0,22	3,04	2,78	4,60	2,53	5,04
	L2	-3,38	-2,51					4,38	1,47	3,49
	L3	-0,96	-4,54	-2,84	-2,84	-1,40	-1,85	3,73	-1,42	2,00
1000	L1	-1,10	-1,24	0,91	3,88	7,30	5,90	-5,18	3,93	5,66
	L2	4,05	-8,77					2,96	-8,19	-5,76
	L3	-4,24	-0,93	2,02	5,96	10,36	2,41	-1,13	-2,36	-1,66
2000	L1	3,98	-7,21	-2,92	-1,17	-8,15	-7,79	1,17	-5,28	-3,74
	L2	0,39	-5,94					0,00	-4,22	-1,91
	L3	1,63	-7,18	-9,55	9,21	0,19	-4,41	5,45	-2,91	-0,19
3000	L1	3,22	-6,65	-5,77	1,99	-2,15	-2,60	4,47	-1,20	0,60
	L2	-4,56	0,34					1,51	-6,07	-4,24
	L3	0,75	-3,74	-1,63	8,56	0,45	0,27	5,54	-4,76	-2,09
4000	L1	2,65	-6,86	-3,14	0,21	6,46	1,57	7,25	-3,59	2,12
	L2	-7,31	3,45					3,49	-5,42	-1,90
	L3	0,74	-8,70	-7,49	8,85	5,41	2,35	8,92	-0,90	0,55
6000	L1	3,70	-1,44	0,00	-2,00	-4,14	-4,74	6,05	-7,75	-6,70
	L2	-9,68	4,95					1,37	2,46	5,38
	L3	1,79	-7,30	-6,71	7,39	3,13	-4,09	0,51	-8,00	-3,75
8000	L1	1,13	-8,22	-2,38	0,00	-6,03	-8,38	5,45	-5,86	-2,39
	L2	-7,42	2,53					1,61	-0,83	2,61
	L3	-1,92	-4,46	-4,59	1,49	1,89	-2,44	1,43	-2,94	-1,29