

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## VÝPOČET A MĚŘENÍ OTEPLENÍ ODPOJOVAČE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

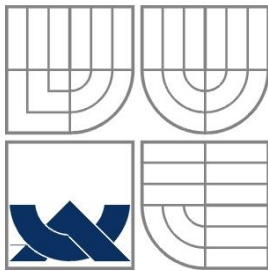
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

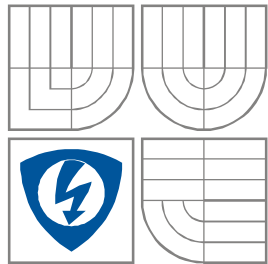
AUTHOR

David Šimek

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

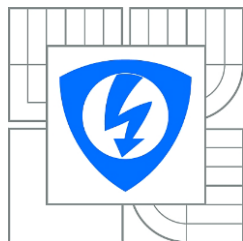
## VÝPOČET A MĚŘENÍ OTEPLENÍ ODPOJOVAČE

CALCULATION AND MEASUREMENT OF DISCONNECTER TEMPERATURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE            David Šimek  
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE        doc. Ing. BOHUSLAV BUŠOV, CSc.  
SUPERVISOR



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** David Šimek

**Ročník:** 3

**ID:** 134628

**Akademický rok:** 2012/2013

**NÁZEV TÉMATU:**

**Výpočet a měření oteplení odpojovače**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Nastudujte problematiku oteplování elektrického přístroje.
2. Analyzujte kontaktní styk jako zdroj tepla.
3. Vypočítejte oteplení odpojovače.
4. Změřte oteplení odpojovače

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Dle doporučení vedoucího

**Termín zadání:** 17.9.2012

**Termín odevzdání:** 4.6.2013

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

**Konzultanti 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 je zaměřena na teoretický rozbor problematiky oteplení elektrických vodičů, kontaktů a míst zúžení proudovodné dráhy. Tato bakalářská práce obsahuje kompletní praktický výpočet konkrétního elektrického přístroje. Těžištěm práce je experimentální měření oteplení konkrétního elektrického přístroje. Práce poukazuje na možné příčiny odchylek mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami.

## **Abstract**

Bachelor's thesis is focused on the theoretical analysis of heating of electrical wires, electrical contacts and current necking in electrical apparatus. This bachelor's thesis contains complete practical calculation of disconnector. The main part of work is experimental measurement of disconnector warming. The thesis points on possible causes of deviations between calculated and measured values.

**Klíčová slova**

Výpočet oteplení; měření oteplení; odpojovač.

**Keywords**

Calculation of warming; measurement of warming; disconnecter.

## **Bibliografická citace**

ŠIMEK, D. *Výpočet a měření oteplení odpojovače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 69 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Výpočet a měření oteplení odpojovače 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.

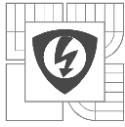
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících 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 doc. Ing. Bohuslavu Bušovovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji společnosti IVEP, a.s. zastoupené Ing. Petrem Kalusem za návrh tématu a možnost provedení měření v jejich zkušebně.

V Brně dne ..... Podpis autora .....



## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>12</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>2 PROBLEMATIKA OTEPLENÍ ELEKTRICKÉHO PŘÍSTROJE.....</b>	<b>14</b>
2.1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY OHŘEVU VODIČŮ A KONSTRUKČNÍCH SOUČÁSTÍ PŘÍSTROJŮ.....	14
2.2. VZNIK TEPLA VLIVEM PRŮCHODU ELEKTRICKÉHO PROUDU OBECNĚ .....	14
2.3. ČINNÝ ODPOR VODIČŮ R A JEHO ZÁVISLOST NA TEPLOTĚ .....	15
2.4. OHŘEV VODIČŮ STŘÍDAVÝM PROUDEM.....	15
2.5. ODPOR VODIČE R PŘI UVÁŽENÍ SKINEFEKTU.....	15
<b>3 ZDROJ TEPLA V KONTAKTNÍM STYKU PŘÍSTROJE.....</b>	<b>16</b>
3.1. PODSTATA STYKOVÉHO ODPORU .....	16
3.2. OTEPLENÍ KONTAKTŮ.....	17
3.3. VÝSLEDNÝ VLIV PŮSOBENÍ ELEKTRICKÉHO STŘÍDAVÉHO PROUDU NA VODIČ .....	17
<b>4 VÝPOČET OTEPLENÍ ODPOJOVAČE.....</b>	<b>18</b>
4.1. TEORETICKÝ ÚVOD.....	18
4.1.1. ODPOJOVAČ OBECNĚ .....	18
4.1.2. ODPOJOVAČE A UZEMŇOVAČE .....	18
4.1.3. PŘÍKLADY TYPICKÉHO POUŽITÍ ODPOJOVAČŮ V PRAXI.....	19
4.2. PŘEPOČET MĚRNÉHO ODPORU NA TEPLOTU PŘEDPOKLÁDANÉHO OTEPLENÍ.....	19
4.3. VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU PŘÍVODNÍHO PRAPORCE.....	20
4.3.1. URČENÍ KOEFICIENTŮ ZHUŠTĚNÍ PROUDNIC.....	20
4.3.2. URČENÍ ČINITELE SKINEFEKTU .....	21
4.3.3. VÝPOČET STŘEDNÍ DÉLKY PROUDOVODNÉ DRÁHY V PRAPORCI.....	22
4.3.4. VÝPOČET ELEKTRICKÉHO ODPORU PRAPORCE.....	22
4.3.5. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ EMISIVITY POUŽITÝCH MATERIÁLŮ .....	23
4.3.6. URČENÍ NÁHRADNÍ CHLADIVOSTI POVRCHU .....	23
4.3.7. VÝPOČET CHLADÍČÍ PLOCHY .....	24
4.3.8. VÝPOČET VELIKOSTI CHLADÍČÍHO OBVODU.....	26
4.3.9. VELIČINY NÁHRADNÍHO $\Pi$ – ČLÁNKU .....	26
4.3.10. ZAŘAZENÍ U-PROFILU UCHYCENÍ KLOUBU DO SCHÉMATU .....	26
4.3.11. UVÁŽENÍ ČÁSTI NEPROTÉKANÉ PROUDEM NA STRANĚ KABELŮ JAKO CHLAZENÍ .....	29
4.3.12. UVÁŽENÍ ČÁSTI NEPROTÉKANÉ PROUDEM NA STRANĚ NOŽE JAKO CHLADIČE .....	29
4.3.13. KOMPLETNÍ TEPELNÉ SCHÉMA VSTUPNÍHO PRAPORCE .....	30
4.4. VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU ODPOJOVACÍHO NOŽE .....	31
4.4.1. KOEFICIENTY ZHUŠTĚNÍ PROUDNIC .....	32
4.4.2. URČENÍ ČINITELE SKINEFEKTU .....	32
4.4.3. VÝPOČET ELEKTRICKÉHO ODPORU .....	32
4.4.4. URČENÍ NÁHRADNÍ CHLADIVOSTI.....	33
4.4.5. VÝPOČET VELIKOSTI CHLADÍČÍHO OBVODU .....	34
4.4.6. VÝPOČET VELIČIN NÁHRADNÍHO SCHÉMATU ODPOJOVACÍHO NOŽE.....	34
4.4.7. UVÁŽENÍ KRAJE NOŽE JAKO KRÁTKÉ CHLADÍČÍ TYČE.....	35



4.4.8. ZAŘAZENÍ OKRAJŮ NOŽE DO SCHÉMATU .....	37
4.4.9. VÝPOČET VLIVU OCELOVÝCH PŘÍLOŽEK NA USTÁLENÉ OTEPLENÍ.....	37
4.4.10. ZAŘAZENÍ TŘÍ DÍSTANČNÍCH VÁLEČKŮ DO SCHÉMATU .....	42
4.4.11. KOMPLETNÍ NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA ODPOJOVACÍHO NOŽE.....	43
<b>4.5. VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU VÝSTUPNÍHO PRAPORCE .....</b>	<b>44</b>
4.5.1. ELEKTRICKÝ ODPOR .....	44
4.5.2. STŘEDNÍ DÉLKA PROUDOVODNÉ DRÁHY .....	45
4.5.3. CHLADÍCÍ PLOCHA VÝSTUPNÍHO PRAPORCE.....	45
4.5.4. VELIKOST NÁHRADNÍHO TEPELNÉHO OBVODU .....	46
4.5.5. URČENÍ NÁHRADNÍ CHLADIVOSTI .....	46
4.5.6. VÝPOČET VELIČIN NÁHRADNÍHO II-ČLÁNKU.....	46
4.5.7. UVÁŽENÍ VOLNÉ ČÁSTI KONTAKTU UZEMŇOVAČE JAKO CHLADIČE.....	47
4.5.8. KOMPLETNÍ SCHÉMA VÝSTUPNÍHO PRAPORCE ODPOJOVAČE.....	48
<b>4.6. ZAKOMPOUNOVÁNÍ PŘÍVODNÍCH KABELŮ DO SCHÉMATU .....</b>	<b>49</b>
4.6.1. URČENÍ CHLADÍCÍHO POVRCHU KABELŮ .....	49
4.6.2. VÝPOČET DÉLKY CHLADÍCÍHO OBVODU KABELŮ.....	50
4.6.3. URČENÍ NÁHRADNÍ CHLADIVOSTI KABELŮ .....	50
4.6.4. HODNOTY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU KABELŮ.....	51
4.6.5. NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA KABELŮ.....	51
<b>4.7. VÝPOČET PRACOVNÍHO KONTAKTNÍHO STYKU.....</b>	<b>51</b>
4.7.1. VÝPOČET ČINNÉHO ODPORU V PRACOVNÍM STYKU .....	51
4.7.2. VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU PRACOVNÍHO STYKU.....	52
4.7.3. VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT V PRACOVNÍM STYKU .....	52
4.7.4. NÁHRADNÍ SCHÉMA PRACOVNÍHO KONTAKTU.....	52
<b>4.8. VÝPOČET KONTAKTNÍHO STYKU PRAPORCE S KABELY .....</b>	<b>52</b>
4.8.1. VÝPOČET STYČNÉHO ODPORU STYKU PRAPORCE S KABELY .....	52
4.8.2. VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU STYKU PRAPORCE S PŘÍVODNÍMI KABELY .....	53
4.8.3. VÝPOČET ZTRÁT VE STYKU PRAPORCE A KABELŮ .....	54
4.8.4. NÁHRADNÍ SCHÉMA STYKU PRAPORCE S KABELY.....	54
<b>4.9. KOMPLETACE CELÉHO TEPELNÉHO SCHÉMATU .....</b>	<b>54</b>
<b>4.10. METODA VÝPOČTU A VÝPOČET USTÁLENÉHO OTEPLENÍ ODPOJOVAČE.....</b>	<b>56</b>
<b>5 MĚŘENÍ OTEPLENÍ ODPOJOVAČE.....</b>	<b>58</b>
<b>5.1. OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA DLE ČSN EN 62271-1.....</b>	<b>58</b>
5.1.1. STAV ZKOUŠENÉHO ZAŘÍZENÍ .....	58
5.1.2. UMÍSTĚNÍ ZAŘÍZENÍ .....	58
5.1.3. PARAMETRY ZKOUŠKY .....	58
5.1.4. PODMÍNKY PRO MĚŘÍCÍ ČLÁNKY POPŘÍPADĚ TEPLoměRY .....	58
5.1.5. TEPLOTA OKOLNÍHO VZDUCHU .....	59
5.1.6. VYHODNOCOVÁNÍ OTEPLOVACÍ ZKOUŠKY.....	59
<b>5.2. VLASTNÍ MĚŘENÍ USTÁLENÉHO OTEPLENÍ ODPOJOVAČE 2QAKZ .....</b>	<b>59</b>
5.2.1. ÚVOD DO MĚŘENÍ .....	59
5.2.2. POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE A POMŮCKY .....	60
5.2.3. SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	61
5.2.4. POSTUP MĚŘENÍ.....	62
5.2.5. TABULKY NAMĚŘENÝCH A VYPOČÍTANÝCH HODNOT .....	62
5.2.6. PRŮBĚHY OTEPLENÍ.....	64



---

<b>5.3.</b>	<b>ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>65</b>
<b>5.4.</b>	<b>VIZUÁLNÍ MATERIÁLY .....</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ S VÝPOČTEM .....</b>	<b>67</b>
<b>6.1</b>	<b>VÝČET VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A VÝPOČTU OTEPLENÍ.....</b>	<b>67</b>
<b>6.2</b>	<b>POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>68</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>69</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

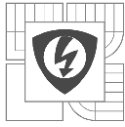
Obrázek 1 - Principiální průběh proudu kontaktním stykem .....	16
Obrázek 2 - Schéma rozvodny s dvojitými přípojnici .....	19
Obrázek 3 - Přívodní praporec odpojovače .....	20
Obrázek 4 - Znázornění uvažované střední délky proudnice v přívodním praporci .....	22
Obrázek 5 - Měření emisivity postříbřené zoxidované mědi .....	23
Obrázek 6 - Znázornění rozměrů potřebných pro výpočet chladicí plochy .....	24
Obrázek 7 - Náhradní $\pi$ -článek vstupního praporce odpojovače .....	26
Obrázek 8 - Rozměry úchytu kloubu .....	27
Obrázek 9 - Kompletní tepelné schéma vstupního praporce .....	30
Obrázek 10 - Odpojovací nůž odpojovače .....	31
Obrázek 11 - Náhradní $\pi$ -článek odpojovacího nože .....	35
Obrázek 12 - Schéma odpojovacího nože se zařazenými kraji nože jako chladiči .....	37
Obrázek 13 - Znázornění délky magnetické siločáry ocelových příložek .....	38
Obrázek 14 - Náhradní $\pi$ -článek kovových příložek .....	40
Obrázek 15 - Náhradní schéma odpojovacího nože včetně ztrát v ocelových příložkách .....	41
Obrázek 16 - Náhradní schéma odpojovacího nože bez distančních válečků .....	42
Obrázek 17 - Kompletní schéma odpojovacího nože .....	43
Obrázek 18 - Výstupní praporec s uzemňovacím kontaktem .....	44
Obrázek 19 - $\Pi$ -článek výstupního praporce .....	47
Obrázek 20 - Náhradní schéma výstupního praporce s uvážením kontaktu uzemňovače .....	48
Obrázek 21 - Kompletní tepelné schéma výstupního praporce odpojovače .....	49
Obrázek 22 - Předpokládaná geometrie kabelu .....	49
Obrázek 23 - Náhradní schéma přívodních kabelů .....	51
Obrázek 24 - Náhradní schéma pracovního kontaktu .....	52
Obrázek 25 - Šroub M16 .....	52
Obrázek 26 - Styčná plocha mezi praporem a přívodním kabelem .....	53
Obrázek 27 - Náhradní schéma styku praporce s kabely .....	54
Obrázek 28 - Kompletní tepelné schéma odpojovače .....	55
Obrázek 29 - Analogicky vytvořené elektrické schéma z tepelného schématu odpojovače .....	57
Obrázek 30 - Schéma silového obvodu měření oteplení odpojovače .....	61
Obrázek 31 - Principiální schéma snímání měřených hodnot do PC .....	61
Obrázek 32 - Reálné zobrazení rozložení termočlánků .....	62
Obrázek 33 - Průběhy oteplení částí odpojovače 2QAKZ 25.1600.20 .....	64
Obrázek 34 - Měřicí pracoviště .....	65
Obrázek 35 - Záběr termokamerou během měření na odpojovač jako celek .....	66
Obrázek 36 - Termo snímek přechodu výstupní praporec – výstupní kabel .....	66
Obrázek 37 - Termo snímek pohyblivého kontaktu odpojovače .....	66
Obrázek 38 - Termo snímek pevného kontaktu odpojovače .....	66
Obrázek 39 - Termo snímek přechodu vstupní praporec – vstupní kabel .....	66



---

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Materiálové vlastnosti vybraných kovů při teplotě 20 °C .....	17
Tabulka 2 - Tabulka vypočítaných hodnot oteplení v bodech dle obrázku 28 .....	56
Tabulka 3 - Nejvyšší dovolené hodnoty teploty a oteplení částí elektrických přístrojů .....	59
Tabulka 4 - Soupis použitých měřících přístrojů a pomůcek .....	60
Tabulka 5 - Rozmístění termočlánků .....	62
Tabulka 6 - Měření teplot odpojovače 2QAKZ 25.1600.20 .....	63
Tabulka 7 - Výpočet oteplení odpojovače 2QAKZ 25.1600.20 .....	63
Tabulka 8 - Výčet výsledků měření a výpočtu oteplení z kapitoly 4.10 a 5.2.5 .....	67



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$B$	Magnetická indukce	[T]
$f$	Frekvence	[Hz]
$F$	Síla	[N]
$F_p$	Přítlačná síla	[N]
$F_m$	Magnetomotorická síla	[A]
$H$	Intenzita magnetického pole	[A·m <sup>-1</sup> ]
$I$	Proud	[A]
$k$	Činitel stínění	[-]
$k_z$	Součinitel zhuštění proudnic	[-]
$k_s$	Součinitel skinefektu	[-]
$l$	Délka	[m]
$Q$	Teplo	[J]
$\dot{Q}$	Tepelný tok	[W]
$R$	Elektrický odpor	[Ω]
$R_T, R_t$	Tepelný odpor	[K·W <sup>-1</sup> ]
$T$	Teplota	[°C]
$O$	Obvod	[m]
$S$	Průřez	[m <sup>2</sup> ]
$P$	Plocha	[m <sup>2</sup> ]
$t$	Čas	[t]
$\alpha$	Teplotní součinitel rezistivity	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_z$	Chladivost zářením	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_k$	Chladivost prouděním	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{on}$	Celková náhradní chladivost	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\Theta, \Delta\vartheta$	Oteplení	[K]
$\rho$	Měrný odpor	[Ω]
$\vartheta$	Teplota	[°C]
$\mu_0$	Permeabilita vakua	[H·m <sup>-1</sup> ]
$\mu_r$	Permeabilita prostředí	[-]
$\lambda$	Měrná teplená vodivost	[W·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup> ]
Zkratka	Význam	
ČSN	Česká technická norma	
EN	Evropská norma	



## 1 ÚVOD

Každý reálný vodič představuje pro elektrický proud jistý odpor. Tento odpor je dán délkou, průřezem a materiálem vodiče. Odpor tohoto typu představují pásové vodiče proudovodných drah elektrických přístrojů. S rostoucím elektrickým odporem také roste ztrátové teplo vybavené v proudovodné dráze, proto je na místě používat materiály s co nejmenším měrným odporem, vhodným průřezem a délkou, s ohledem na funkční i ekonomická hlediska.

Další výraznou překážkou procházejícího proudu je přechodový odpor kontaktů. Tento odpor je ovlivněn materiálními vlastnostmi kontaktů, typem kontaktního styku, přítlačnou silou a cizími vrstvami na kontaktech, které jsou důsledkem prostředí, ve kterém je přístroj používán. Přechodový odpor kontaktního styku je hlavním zdrojem tepla v elektrických přístrojích.

Vzhledem k povaze a značné závislosti odporů proudovodné dráhy na mnohých faktorech nelze přesně určit jakého oteplení konkrétní přístroje dosáhnou. Za použití zjednodušujících předpokladů je možné se reálným hodnotám pouze přiblížit. Jediným přesným aparátem pro zjištění aktuálních vlastností přístroje, v našem případě maximálního oteplení při jmenovitém proudu, je experimentální zkouška.



## 2 PROBLEMATIKA OTEPLENÍ ELEKTRICKÉHO PŘÍSTROJE

### 2.1. Úvod do problematiky ohřevu vodičů a konstrukčních součástí přístrojů

Vodiče a konstrukční části elektrických přístrojů představují přívodní vodiče, přívodní svorníky, proudovodné součásti, kontaktní nože atd. Teplota těchto částí je majoritně dána tepelnými účinky procházejícího elektrického proudu, dále také přenosem tepla z ostatních částí přístroje a okolními podmínkami. Místním zdrojem tepla jsou kontakty, jejichž problematika je popsána v kapitole 2. [1]

### 2.2. Vznik tepla vlivem průchodu elektrického proudu obecně

Při průchodu elektrického proudu vodičem dochází k nárůstu rozkmitu elektronů krystalické mřížky materiálu proudovodné dráhy. Důsledkem tohoto jevu je zvýšení tření a srážek částic uvnitř materiálu. S rostoucími srážkami a třením částic dochází k nárůstu teploty proudovodných prvků. Teplo tvořené procházejícím proudem v elektricky vodivé části lze popsat rovnicí:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad [J; A, \Omega, s] \quad (1)$$

kde  $Q$  je ztrátové teplo vzniklé průchodem elektrického proudu,  
 $I$  elektrický proud,  
 $R$  elektrický odpor,  
 $t$  doba působení tepelných účinků procházejícího proudu.

Rovnice 1 však platí pouze pro stacionární stav při průchodu stejnosměrného proudu. Dále je třeba si uvědomit, že kovové materiály proudovodných drah nemají konstantní odpor při různých teplotách a je třeba výchozí rovnici 1 upravit do diferenciálního tvaru:

$$dQ = [i(t)]^2 \cdot R(\vartheta) \cdot dt \quad [J; A, \Omega, s] \quad (2)$$

kde  $dQ$  je infinitezimální množství tepla,  
 $i(t)$  hodnota proudu v závislosti na čase,  
 $R(\vartheta)$  hodnota elektrického odporu proměnného s teplotou,  
 $dt$  infinitezimální změna času. [2]



## 2.3. Činný odpor vodičů $R$ a jeho závislost na teplotě

Činný odpor vodiče pro stejnosměrný proud je empiricky dán vztahem:

$$R(\vartheta) = \rho(\vartheta) \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega; \Omega\text{m}, \text{m}, \text{m}^2] \quad (3)$$

kde  $\rho(\vartheta)$  je měrný odpor materiálu vodiče,  
 $l$  délka vodiče,  
 $S$  průřez vodiče. [2]

Řeckým písmenem  $\vartheta$  uvedeným v závorce u měrného odporu vodiče je vyjádřeno, že měrný odpor vodiče je proměnný s teplotou. V případě kovů s rostoucí teplotou elektrický odpor roste, u polovodičů klesá.

## 2.4. Ohřev vodičů střídavým proudem

Při průchodu střídavého proudu uvažujeme ohřev efektivní hodnotou proudu a je také třeba zakomponovat do výpočtu vliv povrchového jevu neboli skin efektu. Skin efekt je jev daný vlastní indukčností vodičů. Vlivem této vlastní indukčnosti se při průchodu střídavého proudu ve vodiči indukuje též střídavý proud, ale opačného smyslu. Proudová hustota proudu vzniklého elektromagnetickou indukcí je největší ve středu vodiče a směrem od osy vodiče klesá. Z tohoto předpokladu plyne, že užitečný proud bude mít největší hustotu u povrchu vodiče a naopak nejmenší v jeho ose. Skin efektem dochází k nárůstu ztrát ve vodiči. [3]

## 2.5. Odpor vodiče $R$ při uvážení skin efektu

Při průchodu střídavého elektrického proudu je třeba pro správnost výsledného odporu rovnici 3 upravit:

$$R(\vartheta) = k \cdot \rho(\vartheta) \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega; -, \Omega\text{m}, \text{m}, \text{m}^2] \quad (4)$$

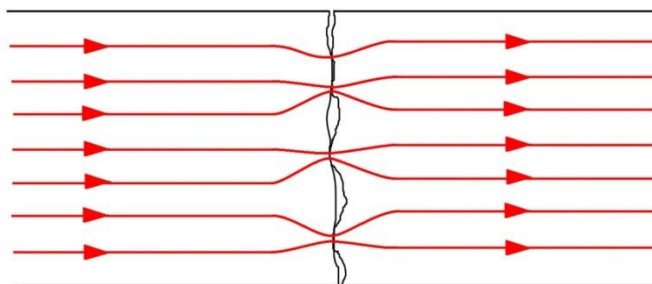
kde  $k$  je součinitel povrchového zhuštění.

Součinitel  $k$  je dán poměrem činného odporu vodiče pro střídavý proud ku činnému odporu vodiče pro stejnosměrný proud. Pro střídavý proud nabývá hodnot větších než 1. V našem případě jde o zařízení s měděnými postříbřenými proudovodnými drahami takových rozměrů, že konstanta bude blízká jedničce. [4]

## 3 ZDROJ TEPLA V KONTAKTNÍM STYKU PŘÍSTROJE

### 3.1. Podstata stykového odporu

Ač by se při obecném pohledu na dosedání kovových součástí na sebe pomocí přitlačné síly  $F_k$  mohlo zdát, že materiály dosedají plnou plochou, není tomu tak. Dvě takové součásti se dotýkají několika styčnými body, které jsou náhodně rozloženy v geometrické ploše zdánlivého styku. Tento jev je důsledkem mikroskopických nerovností materiálů. Lze si představit situaci, kdy by oba materiály byly absolutně tvrdé. V tomto případě by styk nastal v maximálně třech bodech a navíc namáhaných nekonečně velkým měrným tlakem. Díky deformovatelnosti reálných materiálů se body rozšiřují na styčné plochy a tlak na ně působící se mění na konečnou měrnou hodnotu. U většiny používaných styčných kontaktů je využíváno plastické deformace. Při průchodu elektrického proudu těmito kontakty dochází k deformaci a soustředění tohoto proudu do stykových plošek, viz obrázek 1. Vznikají tzv. proudové úžiny.



Obrázek 1 - Principiální průběh proudu kontaktním stykem

Z obrázku 1 vyplývá skoková změna průřezu. Vlivem změny průřezu dochází k nárůstu elektrického odporu. Tento odpor budeme nazývat úžinový odpor. Celkový kontaktní odpor však není dán jen odporem úžinovým. Reakcí kovu kontaktů s prvky okolní atmosféry dochází ke vzniku korozních vrstev. Hlavním reakčním prvkem je kyslík (chemická značka - O). Jde o vrstvy chemických původů.

Další souvislou vrstvu mohou vytvářet na povrchu kovů nanesené tuky. Potom jde o vrstvy mechanického původu. Výše popsaným vrstvám říkáme souhrnně cizí vrstvy na kontaktech. Tyto vrstvy tvoří další překážku v přenosu elektrického proudu. Při průtoku proudu přes cizí vrstvy vznikají tzv. *kovové můstky*. Tento předpoklad vytváří možnost připočítat odpor mezivrstev k odporu úžinovému.

V praxi dělíme styky na bodový, přímkový a plošný. V případě zkoumaného odpojovače nalezneme v jeho konstrukci styk přímkový a plošný. Styk přímkový se nachází jak na kloubovém tak na pohyblivém kontaktu a styk plošný nalezneme mezi přívodními kabely a praporci přístroje. V důsledku výše popsané teorie se tedy jedná o neurčitý počet plošek rozmístěných v mezích zdánlivé plochy styku.[5]

### 3.2. Oteplení kontaktů

Oteplování kontaktů má značný vliv na tvorbu kysličnickové vrstvy v kontaktním styku, což má za následek nárůst stykového odporu. Vlivem zvýšení přechodového odporu dojde k dalšímu nárůstu teploty. Tento postup se může ustálit, nicméně však může dojít k překročení teploty tavení kontaktního materiálu a dochází k tzv. *statickému svaření* dvojice materiálů kontaktu.

Budeme předpokládat, že v proudové úžině souměrné vzhledem k povrchu kontaktu vzniká teplo z výkonu dodávaného dle Jouleova zákona  $P = R \cdot I^2$ . Protékající proud vytváří v úžině proudová vlákna probíhající shodně s čarami tepelného proudu. Pro modelový popis uvažujeme polonekonečný kontakt do kterého vstupuje proud v jediném místě. Místo styku budeme považovat za ekvipotenciální a izotermické. Vliv vzdálených částí kontaktu zanedbáme. Dalším důležitým předpokladem je, že kromě kontaktní plošky jsou všechny části povrchu kontaktu jak proudově, tak tepelně nevodivé. Výše popsané zjednodušení lze přijmout pouze za předpokladu, že změny proudového zatížení jsou náhlé a jejich doba trvání je časově omezena.

Tabulka 1 - Materiálové vlastnosti vybraných kovů při teplotě 20 °C<sup>[6]</sup>

Materiál	$\rho$ [ $\mu\cdot\Omega\cdot\text{m}$ ]	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
Měď - Cu	0,0168	385
Stříbro - Ag	0,0159	418

Jak je známo, nejpoužívanější materiály kontaktů jsou měď a stříbro. Stříbro je z hlediska oteplení odlišné od mědi. Zatímco na mědi je působením kyslíku tvořena tzv. *měděnka*, čili uhličitán měďnatý, na povrchu stříbra se tvoří relativně měkké kysličníky. Výhodou nízké tvrdosti těchto oxidů je jejich snadná rozrušitelnost. Jejich rozpad nastává v oblasti teplot od 180 °C do 200 °C. Při těchto teplotách dochází též k měknutí stříbra. Měknutím materiálu dochází ke zvětšení stykové plošky  $S_a$  a následným poklesem ztrát na přechodovém odporu  $R_k$ . Z tohoto důvodu mohou být stříbrné, popřípadě postříbřené kontakty více přetěžovány.[6]

### 3.3. Výsledný vliv působení elektrického střídavého proudu na vodič

V kapitole 1 a 2 je popsána energie, která se v elektrickém přístroji přemění na teplo. Je důležité si uvědomit, že výsledný tepelný stav vodiče v ustáleném stavu je dán:

$$Q_c = Q_{\text{kondukcí}} + Q_{\text{konvekci}} + Q_{\text{radiací}} \quad [\text{J}; \text{J}, \text{J}, \text{J}] \quad (5)$$

kde  $Q_c$  je celkové teplo vybavené v přístroji průchodu elektrického proudu,  
 $Q_{\text{kondukcí}}$  teplo odevzdané vedením do izolátorů, šroubů a dalších součástí,  
 $Q_{\text{konvekci}}$  teplo odevzdané prouděním okolního média do okolního prostoru,  
 $Q_{\text{radiací}}$  teplo odevzdané zářením do okolních předmětů.



## 4 VÝPOČET OTEPLENÍ ODPOJOVAČE

### 4.1. Teoretický úvod

V této kapitole bude proveden výpočet ustáleného oteplení proudovodné dráhy odpojovače 2QAKZ 25.1600.20. Výpočet sítě bude proveden podle knihy Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů, která je blíže specifikována v seznamu literatury pod číslem 7, v hranatých závorkách u odečítaných hodnot z grafů naleznete odkaz na literaturu, stranu a graf, na které se nachází. Během výpočtu bude využito jistých zjednodušení a předpokladů, bez kterých bychom výpočet nemohli provést. Tyto zjednodušení jsou uvedena u vzorců, ve kterých jsme jich použili. Pokračování teoretického úvodu přibližuje danou problematiku z obecného hlediska.

#### 4.1.1. Odpojovač obecně

Odpojovač je elektrický přístroj, který zajišťuje viditelné izolační přerušení proudovodných drah v rozepnutém stavu, naopak v režimu sepnutém musí zajistit přenos jmenovitých i zkratových proudů. Důležitým rozdílem od ostatních spínacích přístrojů je skutečnost že rozpínání i spínání probíhá při maximálně zbytkových prouděch.

#### 4.1.2. Odpojovače a uzemňovače

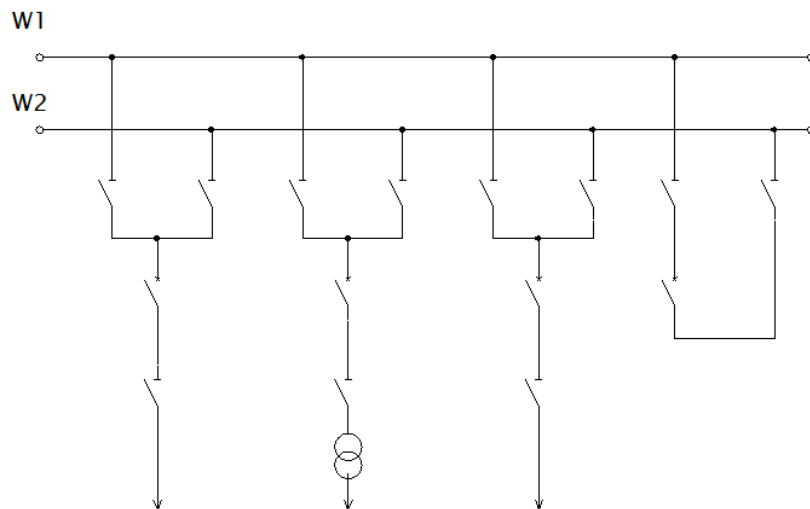
Kromě výše popsané funkce izolační zastávají v rozvodnách skupiny odpojovačů (přípojnicové odpojovače) funkci řadičů, což znamená, že lze pomocí nich ve stavu bez proudového zatížení (tj. s vypnutým vypínačem, zařazeným s nimi v sérii) přesouvat zařízení z jedné přípojnice na druhou. Naopak odpojovače umístěné na vývodech z rozvodny slouží zejména k bezpečnostnímu izolačnímu odpojení vypínačů při revizních pracích nebo k izolaci vedení, na kterém je prováděna revize.

Součástí odpojovače je proto i uzemňovač, kterým se výstupní vedení spojí se zemním potenciálem. Většinou bývá tento odpojovač s uzemňovačem konstrukčně řešen jako kombinovaný spínací přístroj. Izolační hladina odpojovačů v rozepnutém stavu bývá asi o 15 % vyšší než u ostatních spínacích přístrojů mezi rozepnutými kontakty nebo všeobecně proti zemi.

Odpojovače i uzemňovače mají na rozdíl od ostatních druhů spínačů velmi malou rychlost pohybu pohyblivých kontaktů. Průběh odpojení nebo zapojení překračuje často několik sekund. [7]

### 4.1.3. Příklady typického použití odpojovačů v praxi

Typickou aplikací odpojovačů jsou rozvodny s dvojitými přípojnici, viz obrázek 2. Dalšími možnými typy rozvodů jsou rozvodny s dvojitými přípojnici a jednou přípojnici pomocnou, rozvodny s trojitými přípojnici a rozvodny s větším počtem vypínačů připadajících na jednu odbočku, jako jsou rozvodny s jeden a půl vypínačem na jednu odbočku, popřípadě kruhové přípojnice nebo přípojnice zapojené do mnohoúhelníku. [7]



Obrázek 2 - Schéma rozvodny s dvojitými přípojnici<sup>[7]</sup>

Další aplikací může být instalace na sloupech elektrického vedení, kde slouží k izolačnímu odpojení a uzemnění částí vedení při revizních pracích a podobně.

## 4.2. Přepočítání měrného odporu na teplotu předpokládaného oteplení

Proudovodná dráha odpojovače je vyrobena z mědi čistoty 99,9 %, která má povrchovou úpravu postříbřením vrstvou 8  $\mu\text{m}$ . Pro výpočet ustáleného oteplení zanedbáme vliv příměsí i vliv pokovení. Tato zjednodušení můžeme přijmout, protože 0,1 % příměsí nebude mít na výpočet téměř žádný vliv a pokovení stříbrem je velice tenké a je použito především z důvodu nízké tvrdosti oxidů stříbra oproti cizím vrstvám tvořících se na mědi.

Volíme předpokládané oteplení  $\theta = 50 \text{ K}$

Rezistivita mědi  $\rho_{cu20} = 0,0168 \mu \cdot \Omega \cdot \text{m}^{-1}$

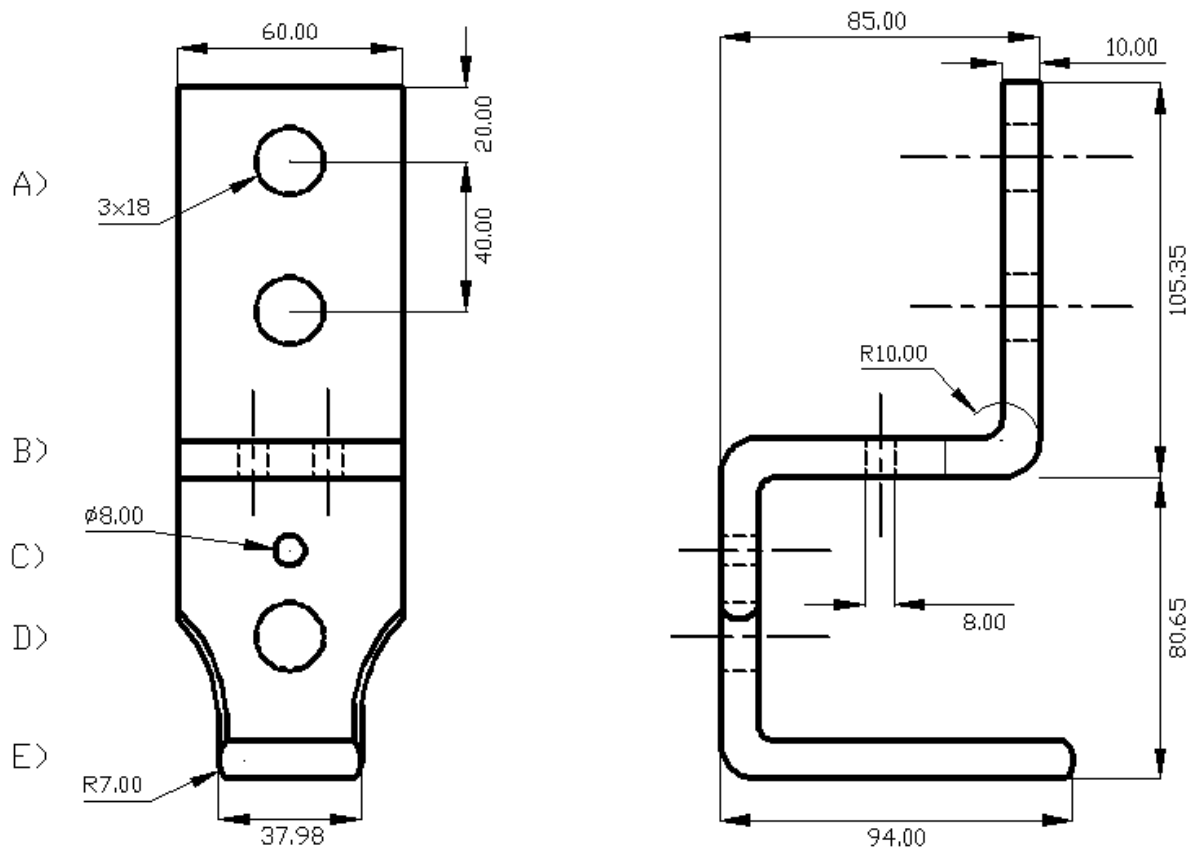
Teplotní součinitel mědi  $\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$

$$\rho_{cu} = \rho_{cu20}(1 + \alpha \cdot \theta) \quad [\Omega \cdot \text{m}^{-1}; \Omega \cdot \text{m}^{-1}, \text{K}^{-1}, \text{K}] \quad (6)$$

Dosadíme a vypočítáme rezistivitu mědi při předpokládaném oteplení 50 K:

$$\rho_{cu} = 0,0168 \cdot 10^{-6}(1 + 0,004 \cdot 50) = 2,016 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$$

### 4.3. Výpočet náhradního schématu přívodního praporce



Obrázek 3 - Přívodní praporec odpojovače

#### 4.3.1 Určení koeficientů zhuštění proudnic

Ke zhuštění proudnic dochází v místech, kde se snižuje průřez proudovodné dráhy, zde vidíme takových míst šest. Čtyři zúžení způsobené otvorem v pasu, jedno místo snížením šířky pasu a v posledním případě kombinace těchto dvou. V následujících bodech budou jednotlivá zúžení určena směrem od přípojnice po pracovní kontakt. Body A až E korespondují s body v obrázku 3.

A) První dvě zúžení jsou stejná, jedná se o díry průměru 18 mm:

$$b = 60 \text{ mm} - \text{šířka pasu}$$

$$a = b - \phi = 60 - 18 = 42 \text{ mm}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{42}{60} = 0,7$$

Určíme koeficient zhuštění [8; str. 31; Graf 2 – 6; typ 4] :

$$K_1 = 1,35$$

B) Třetí zúžení je v místě dvou děr o průměru 8 mm vedle sebe:

$$a_1 = b - \phi_1 = 60 - 8 = 52 \text{ mm}$$

$$\frac{a_1}{b} = \frac{52}{60} = 0,867$$

Určíme koeficient zhuštění [8; str. 31; Graf 2 – 6; typ 4] :



$$K_{21} = 1,13$$

Pro dvě díry platí:

$$K_2 = K_{21}^2 = 1,13^2 = 1,28$$

C) Čtvrté zúžení je v místě díry šroubu uchycení kloubu s průměrem 8 mm:

Stejně jako v bodě B), ale jen pro jeden otvor:

$$K_3 = K_{21} = 1,13$$

D) Páté zúžení je kombinované jde o zúžení snížením šířky pasu a zároveň dírou s průměrem 18 mm:

Zúžení otvorem bude stejné jako v bodě A):

$$K_{41} = K_1 = 1,35$$

Nemůžeme zakomponovat činitel zúžení po snížení šířky pasu, protože díra leží přesně na místě průběhu zúžení, určíme proto šířku pasu v místě nejmenšího průřezu vlivem zúžení průměru a díry:

$$a_2 = 46 \text{ mm}$$

$$\frac{a_2}{b} = \frac{46}{60} = 0,767$$

Určíme koeficient zhuštění [8; str. 31; Graf 2 – 6; typ 1] :

$$K_{42} = 1,08$$

Celkový činitel zúžení:

$$K_4 = K_{41} \cdot K_{42} = 1,35 \cdot 1,08 = 1,46$$

E) Poslední zúžení je snížením šířky pasu na konci praporec (zanedbáme vliv zaoblení hran pasu):

$$b = 60 \text{ mm} - \text{šířka pasu}$$

$$a_3 = b_2 = 37,98 \text{ mm}$$

$$\frac{a_3}{b} = \frac{37,98}{60} = 0,63$$

Určíme koeficient zhuštění [8; str. 31; Graf 2 – 6; typ 1] :

$$K_5 = 1,13$$

#### 4.3.2 Určení činitele skinefektu

Přívodní praporec má již průřez, u kterého by bylo záhodno činitel skinu uvažovat, u menších průřezů se skinefekt zanedbává.

$$\frac{b}{h} = \frac{60}{10} = 6$$

$$S = b \cdot h = 60 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

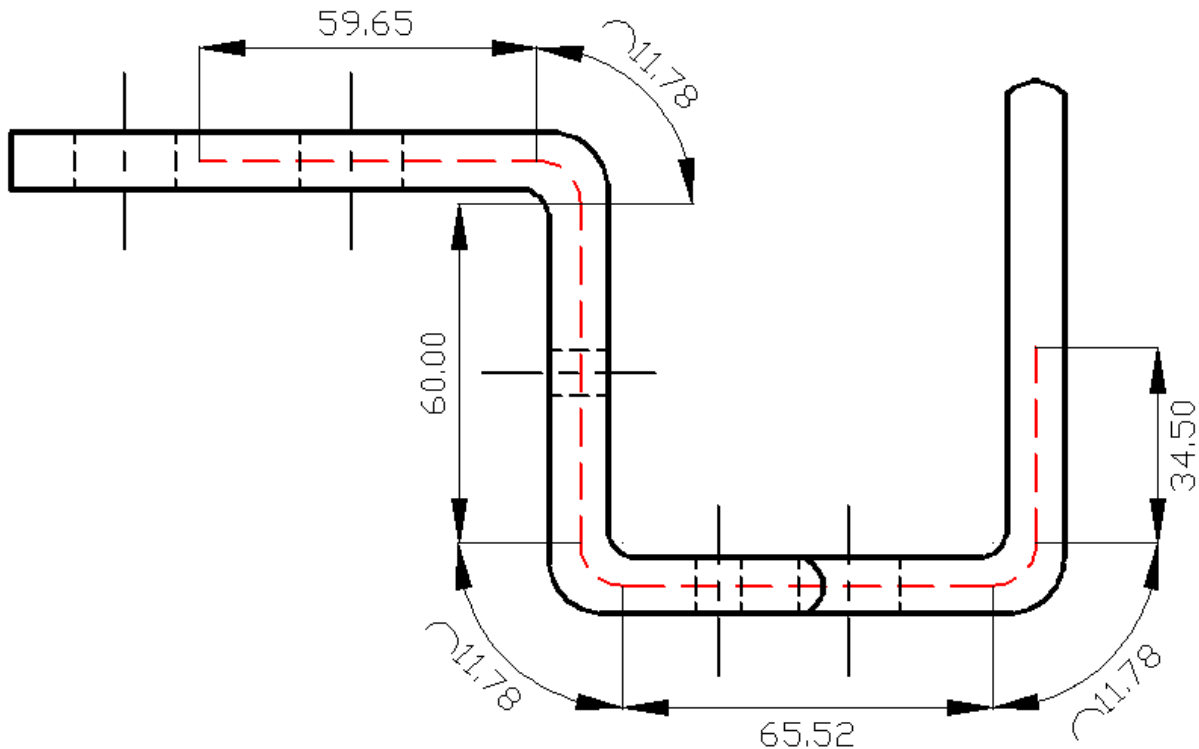
$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{cu}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{2,016 \cdot 10^{-8}}} = 1219,88$$

Na základě výše uvedených hodnot odečteme činitel skinu [8; str. 29; Graf 2 – 4]:

$$K_s = 1,07$$

### 4.3.3 Výpočet střední délky proudovodné dráhy v praporci

Jde o myšlenou čáru vedoucí středem praporce od přívodu po střed kontaktního styku. Máme tři přívodní kabely, jeden zapojený na svorku blíže k odpojovacímu noži a druhé dva na svorku vzdálenější noži, uvažujeme-li rovnoměrné rozložení proudu v těchto kabelech, lze uvažovat, že střední délka proudové dráhy začíná v jedné třetině vzdálenosti mezi osami uchycení přívodních kabelů. Střední délka proudnice je naznačena červenou přerušovanou čarou na obrázku 4:



Obrázek 4 - Znárodnění uvažované střední délky proudnice v přívodním praporci

Z rozměrů v obrázku vypočítáme hodnotu střední délky proudnice:

$$l = 59,65 + 11,78 + 60 + 11,78 + 65,52 + 11,78 + 34,5 = 255,01 \text{ mm}$$

### 4.3.4 Výpočet elektrického odporu praporce

Nebudeme brát v potaz první zúžení, protože není součástí aktivní proudovodné dráhy viz obrázek 4. Odpor praporce bude [8; str. 119]:

$$R_p = \frac{\rho_{cu}}{S} [l + b \cdot (k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 - 5)] \cdot k_s \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{m}^{-1}, \text{mm}^2, \text{mm}, \text{mm}] \quad (7)$$

Dosadíme do rovnice 7:

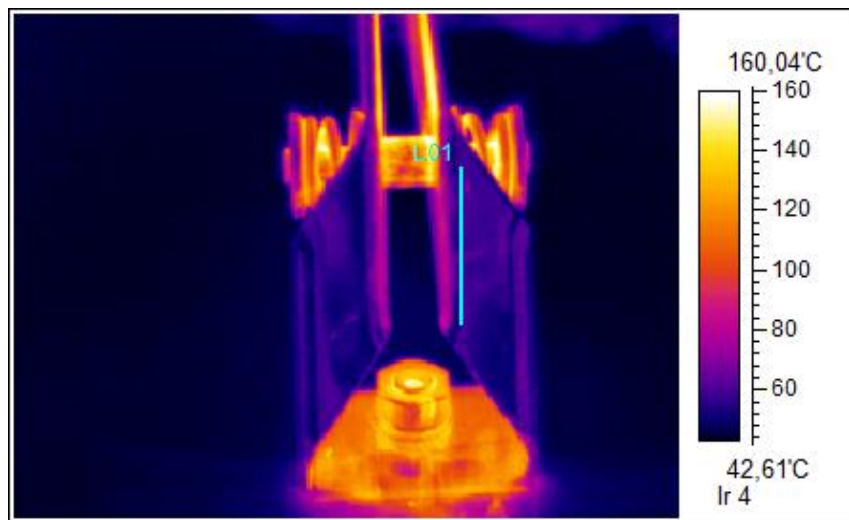
$$R_p = \frac{2,016 \cdot 10^{-8}}{600 \cdot 10^{-6}} [0,25501 + 60 \cdot 10^{-3} (1,35 + 1,28 + 1,13 + 1,46 + 1,13 - 5)] \cdot 1,07$$

$$R_p = 1,20802 \cdot 10^{-5} \Omega$$

#### 4.3.5 Experimentální měření emisivity použitých materiálů

Bylo třeba zjistit, jakou emisivitu mají materiály použité v měřeném odpojovači. Vzorky jsme zahřáli na známou teplotu 70 °C. Poté jsme na termokameře nastavovali emisivitu tak, abychom dostali hodnotu 70 °C zobrazovanou termokamerou. Okolní teplota byla 23 °C.

Vzdálenost: 1 m  
 Průměrná teplota po úsečce L01: 70,05 °C  
 Emisivita: 0,15



Obrázek 5 - Měření emisivity postříbřené zoxidované mědi

#### 4.3.6 Určení náhradní chladiivosti povrchu

a) Chladiivost zářením

Z měření jsme určili emisivitu:

$$E_z = 0,15$$

Protože máme ale teplotu okolí  $T_0 = 20$  °C (v tabulce  $T_0 = 40$  °C), musíme vzorec upravit lineární aproximací. Základní odečtený vzorec [8; str. 52; Tabulka 2 – 44]:

$$\alpha_z = 1,1 + 0,006 \cdot \theta$$

Z charakteru vzorců v tabulce zjistíme, že spád prvního sčítance ve vzorci je 0,05/5 °C. a druhého 0,001/5 °C. Odhadne činitel stínění na  $N = 0,8$ . Vyjádříme vzorec pro chladiivost zářením:

$$\alpha_z = N \cdot [1,1 - 0,2 + (0,006 - 0,004) \cdot \theta]$$

$$\alpha_z = N \cdot [0,9 + 0,002 \cdot \theta] \quad [\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}; -, \text{K}] \quad (8)$$

$$\alpha_z = 0,8 \cdot [0,9 + 0,002 \cdot 50] = 0,8 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

b) Chladivost prouděním [8; str. 52; Tabulka 2 – 44]

Pro stěnu o šířce 10 cm:

$$\alpha_{k10cm} = 3,7 + 0,046 \cdot \theta$$

Pro stěnu o šířce 5 cm:

$$\alpha_{k5cm} = 4,3 + 0,055 \cdot \theta$$

Provedeme lineární aproximaci na stěnu o šířce 6 cm:

$$\alpha_k = \left( 3,7 + \frac{4,3 - 3,7}{5} \cdot 4 \right) + \left( 0,046 + \frac{0,055 - 0,046}{5} \cdot 4 \right) \cdot \theta$$

$$\alpha_k = 4,18 + 0,0532 \cdot \theta \quad [\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}; -, \text{K}] \quad (9)$$

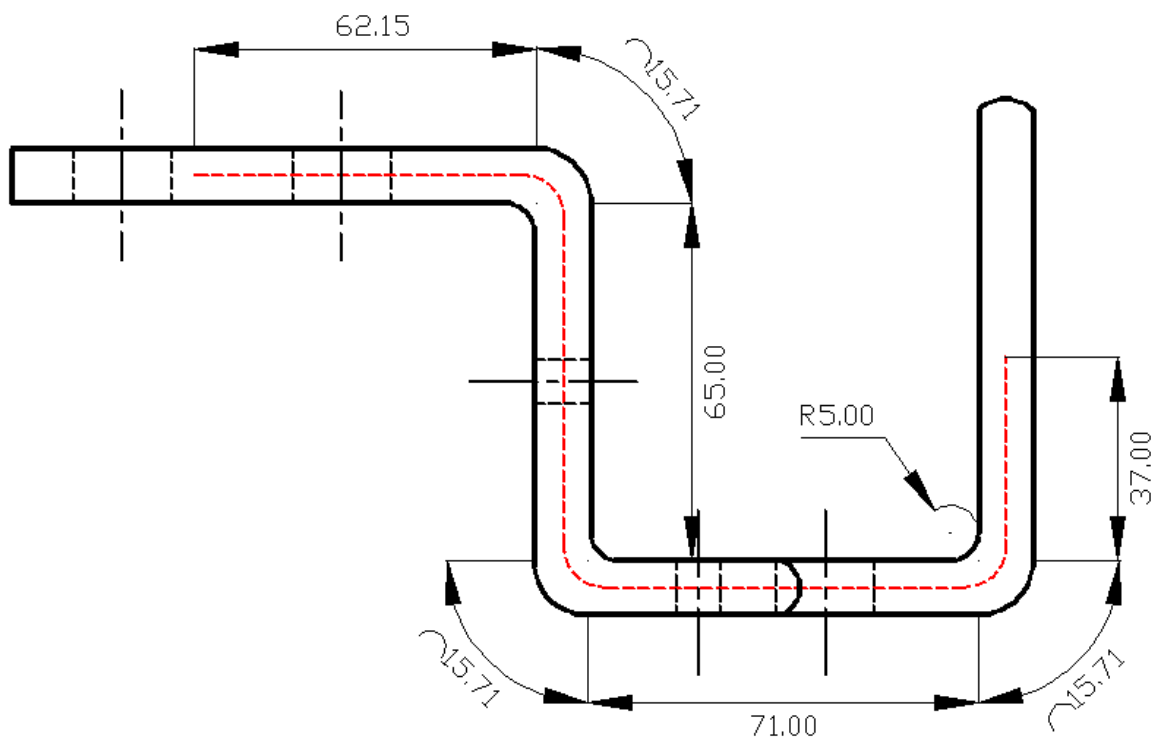
$$\alpha_k = 4,18 + 0,0532 \cdot 50 = 6,84 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

c) Celková náhradní chladivost [8; str. 119]

$$\alpha_{on} = \alpha_z + \alpha_k = 0,8 + 6,84 = 7,64 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

#### 4.3.7 Výpočet chladicí plochy

Jako chladicí povrch uvažujeme povrch podél proudovodné dráhy, tudíž budeme vyjadřovat plochu podél myšlené červené čáry znázorněné v obrázku 4. Konce praporce budeme později uvažovat jako krátké chladicí tyče, proto je nesmíme započítat. Vliv zvýšení chlazení částmi šroubů budeme uvažovat jako 5 % plochy navíc. Malé oblouky budeme brát jako pravý úhel. Plochu zakrytou izolátorem, uchycením kabelu, uchycením kloubu a kontaktem neuvažujeme jako chladicí plochu. Plochy budou opět rozděleny dle rozdělení v obrázku 3.



Obrázek 6 - Znázornění rozměrů potřebných pro výpočet chladicí plochy



- A) Plocha u přívodních kabelů. Styčnou plochu přívodu a praporce tvoří obdélník o stranách  $a_s = 30$  mm a  $b_s = 35$  mm. Budeme uvažovat pouze jeden styk, protože další dva kabely leží mimo proudovodnou dráhu. Uvažujeme dvě boční plochy, horní plochu a dolní plochu:

$$S_A = 2 \cdot (0,01 + 0,06) \cdot 0,06215 - 0,03 \cdot 0,035 = 7,651 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

- B) Plocha se dvěma otvory o průměru  $d = 0,008$  m. Uvažujeme celou plochu, vliv děr zanedbáme.

$$S_B = 2 \cdot (0,01 + 0,06) \cdot 0,065 = 9,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

- C) Plocha s uchycením kloubu, budeme uvažovat pouze horní plochu a dvě boční plochy. Dolní plocha je kryta izolátorem. K horní ploše je připevněn kloub, jeho uchycení tvoří plocha  $S_u = 0,05 \cdot 0,03 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ . Změnu šířky praporce zde zakomponujeme uvažováním dvoutřetinové velikosti horní plochy po odečtení plochy uchycení kloubu, protože kloub leží uprostřed:

$$S_C = 2 \cdot 0,01 \cdot 0,071 + \frac{2}{3} (0,06 \cdot 0,071 - 1,5 \cdot 10^{-3}) = 3,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

- E) Plocha na straně kontaktního nože. Nebudeme uvažovat boční plochy, protože jsou kryty kontaktním nožem. Vliv zaoblení zaneseme do výpočtu tak, že šířku pasu budeme uvažovat i se zaobleními. Pozor – šířka praporce je zde jiná viz obrázek 3.

$$S_E = 2 \cdot 0,03798 \cdot 0,037 = 2,811 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Nyní vypočítáme horní a dolní plochu danou ohyby o poloměru  $r = 10$  mm:

$$S_{Oh1} = b \cdot \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = 0,06 \cdot \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,01 = 9,425 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Máme celkem tři ohyby:

$$S_{Oh} = 3 \cdot S_{Oh1} = 3 \cdot 9,425 \cdot 10^{-4} = 2,827 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Boční plocha u ohybu, zde už musíme uvážit vliv malého poloměru  $r_m = 5$  mm:

$$S_{Ob1} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot r^2 - \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot r_m^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,01^2 - \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,005^2 = 5,89 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Bočních stěn ohybů máme celkem šest:

$$S_{Ob} = 6 \cdot S_{Ob1} = 6 \cdot 5,89 \cdot 10^{-5} = 3,534 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Můžeme vypočítat celkovou chladicí plochu, vliv šroubů zakomponujeme jako nárůst plochy o 5 %:

$$P_P = S_A + S_B + S_C + S_E + S_{Oh} + S_{Ob}$$

$$P_P = 1,05 \cdot (7,651 + 9,1 + 3,26 + 2,811 + 2,827 + 0,3534) \cdot 10^{-3} = 2,7303 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

#### 4.3.8 Výpočet velikosti chladícího obvodu [8; str. 119]

$$O_{vp} = \frac{P_p}{l} = \frac{0,0273}{0,25501} = 0,10707 \text{ m}$$

#### 4.3.9 Veličiny náhradního $\pi$ – článku [8; str. 119]

$$\beta l = l \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{on} \cdot O_{vp}}{\lambda_{cu} \cdot S_p}} = 0,25501 \cdot \sqrt{\frac{7,64 \cdot 0,10707}{385 \cdot 6 \cdot 10^{-4}}} = 0,479879$$

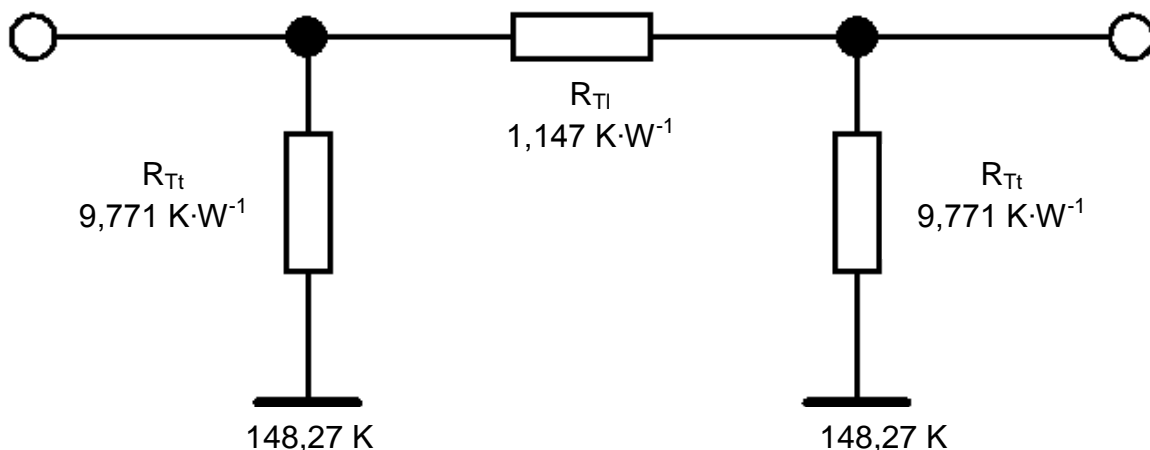
$$\delta = \sqrt{\alpha_{on} \cdot O_{vp} \cdot \lambda_{cu} \cdot S_p} = \sqrt{7,64 \cdot 0,10707 \cdot 385 \cdot 6 \cdot 10^{-4}} = 0,434697$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(0,479879)}{0,434697} = 1,147 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,434697 \cdot \tanh\left(\frac{0,479879}{2}\right)} = 9,771 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\theta_{\infty} = \frac{R_p \cdot I^2}{\alpha_{on} \cdot P_p} = \frac{1,20802 \cdot 10^{-5} \cdot 1600^2}{7,64 \cdot 0,0273} = 148,27 \text{ K}$$

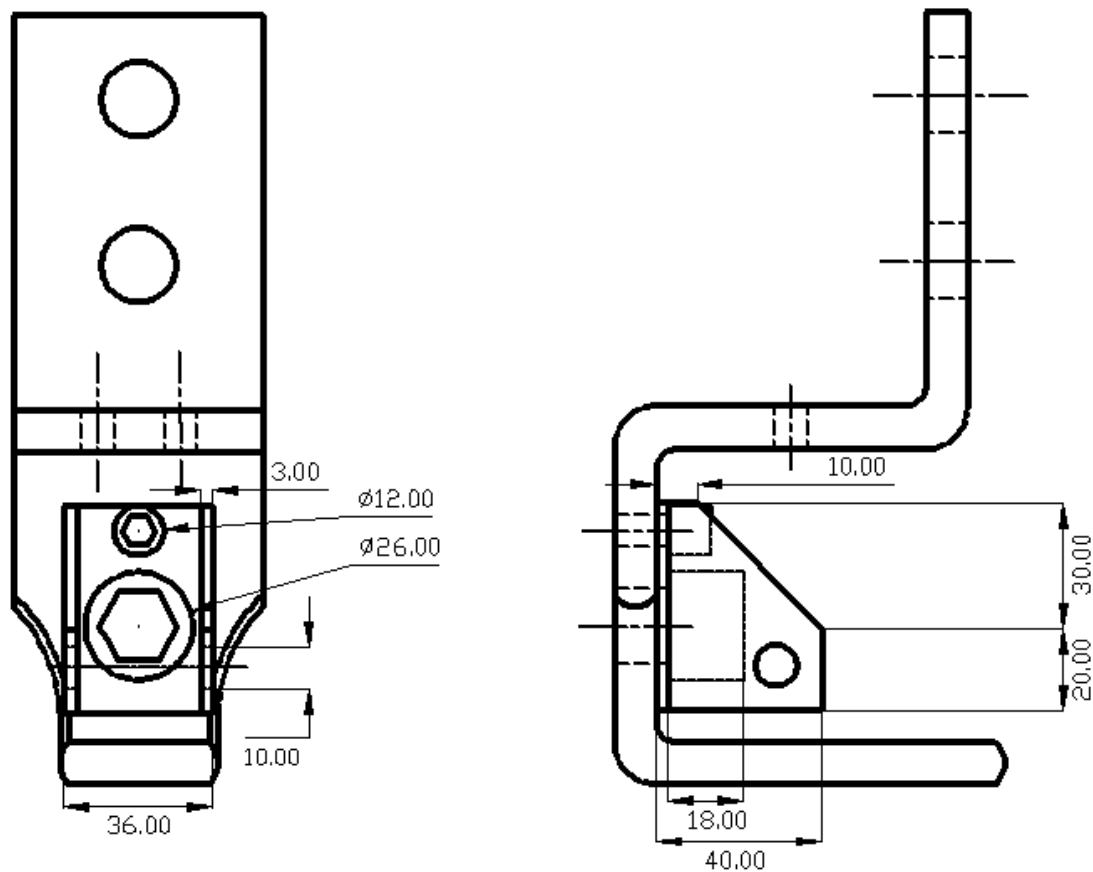
Z vypočtených hodnot sestavíme náhradní  $\pi$ -článek vstupního praporce:



Obrázek 7 - Náhradní  $\pi$ -článek vstupního praporce odpojovače

#### 4.3.10 Zařazení u-profilu uchycení kloubu do schématu

U-profil je vyroben z oceli 11373, tudíž vede minimum proudu a do schématu ho zařadíme jako krátkou chladící tyč. Umístění profilu viz obrázek 8:



Obrázek 8 - Rozměry úchytu kloubu

#### 4.3.10.1 Rozdělení podélného odporu praporce

Rozdělíme podélný odpor,  $R_{Tl} = 1,147 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ , na dvě části dle umístění uchycení kloubu vzhledem k proudovodné dráze. Jako umístění uchycení kloubu považujeme střed uchycení. Délky úseků odečteme z obrázku 4.

Určíme vzdálenost od přívodních kabelů po střed uchycení kloubu:

$$l_{k1} = 59,65 + 11,78 + 60 + 11,78 + \frac{65,52}{2} = 175,97 \text{ mm}$$

Podélný odpor od přívodních kabelů po střed uchycení kloubu vypočítáme trojčlenkou:

$$R_{Tla} = R_{Tl} \cdot \frac{l_{k1}}{l} = 1,147 \cdot \frac{175,97}{255,01} = 0,7915 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Podélný odpor od středu uchycení kloubu po pracovní kontakt:

$$R_{Tlb} = R_{Tl} - R_{Tla} = 1,147 - 0,7915 = 0,3555 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

#### 4.3.10.2 Výpočet plochy chlazení

Z obrázku 8 určíme chladičí povrch uchycení kloubu. Ve výpočtu uvažujeme: dvě boční plochy, dvě vnitřní svislé plochy, jednu spodní stěnu (druhá je kryta praporcem), tenké



proužky krajů stěn a povrchy pláště šroubů (bez horní stěny, protože ta je započítána ve spodní stěně u-profilu. Jako část krytou každým kontaktním nožem uvažujeme plošku 20 mm x 20 mm, kterou musíme od chlazení odečíst.

$$P_{CH} = 2 \cdot \left( 20 \cdot 40 + 10 \cdot 30 + \frac{30 \cdot 30}{2} \right) \cdot 10^{-6} + 2 \cdot \left( 20 \cdot 37 + 7 \cdot 30 + \frac{30 \cdot 30}{2} \right) \cdot 10^{-6} \\ + 30 \cdot 50 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 3 \cdot (40 + 30 + 10 + 20 + 30 \cdot \sqrt{2}) \cdot 10^{-6} + \pi \cdot 26 \cdot 18 \\ \cdot 10^{-6} + \pi \cdot 12 \cdot 10 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot (20 \cdot 20) \cdot 10^{-6} = 9,1818 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

#### 4.3.10.3 Výpočet chladiivosti oceli 11373.

a) Chladiivost zářením

Určíme emisivitu [8; str. 49; Tabulka 2 – 38]. Volíme hodnotu mezi čistě opracovanou ocelí a oxidovanou ocelí:

$$E_z = 0,4$$

Základní odečtený vzorec musíme opět upravit lineární aproximací stejně jako v části 4.3.6 [8; str. 52; Tabulka 2 – 44]:

$$\alpha_z = 2,8 + 0,017 \cdot \theta$$

Z charakteru vzorců v tabulce zjistíme, že spád prvního sčítance ve vzorci je 0,1/5 °C. a druhého 0,001/5 °C. Odhadne činitel stínění na  $N = 0,8$ . Vyjádříme vzorec pro chladiivost zářením:

$$\alpha_z = N \cdot [2,8 - 0,4 + (0,017 - 0,004) \cdot \theta]$$

$$\alpha_z = N \cdot [2,4 + 0,013 \cdot \theta] = 0,8 \cdot [2,4 + 0,013 \cdot 50] = 2,44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

b) Chladiivost prouděním [8; str. 52; Tabulka 2 – 44]

Použijeme vzorec pro stěnu o šířce 5 cm:

$$\alpha_k = 4,3 + 0,055 \cdot \theta = 4,3 + 0,055 \cdot 50 = 7,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

c) Celková náhradní chladiivost [8; str. 119]

$$\alpha_{on} = \alpha_z + \alpha_k = 2,44 + 7,05 = 9,49 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

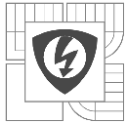
#### 4.3.10.4 Přechodový tepelný odpor

Určíme součinitel přestupu tepla pro vzduch o teplotě 70 °C. Tabulková hodnota součinitele přestupu tepla pro vzduch při 20 °C:

$$\lambda_{A20} = 0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Gradient změny součinitele přestupu tepla pro vzduch je 0,0002 W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>/ 5 K. Vypočítáme součinitel přestupu tepla pro vzduch o teplotě 70 °C:

$$\lambda_{A70} = \lambda_{A20} + \frac{\theta}{5} \cdot 0,0002 = 0,026 + \frac{50}{5} \cdot 0,0002 = 0,028 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$



Vzduchovou mezeru mezi praporcem a uchycením kloubu odhadneme vzhledem k velmi silnému šroubovému spojení na  $\delta = 10 \mu\text{m}$ .

Plocha styku je  $P_s = 30 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Vypočítáme odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru [8; str.112]:

$$R_{st} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta}{P_s} = \frac{1}{0,028} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 0,24 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

#### 4.3.10.5 Výpočet celkového tepelného odporu uchycení kloubu

Tepelný odpor samotného uchycení kloubu [8; str.109]:

$$R_{tCH01} = \frac{1}{\alpha_{on} \cdot P_{CH}} = \frac{1}{9,49 \cdot 9,1818 \cdot 10^{-3}} = 11,476 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tepelný odpor uchycení kloubu s uvážením stykového odporu:

$$R_{tCH1a} = R_{tCH1} + R_{st} = 11,476 + 0,24 = 11,716 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

#### 4.3.11 Uvážení části neprotékané proudem na straně kabelů jako chlazení

Chladicí plochu určíme z obrázků 3 a 6. Budeme uvažovat celý povrch s odpočtem ploch zakrytých dvěma vstupními kontakty o rozměrech 35 mm x 30 mm. Plocha chladiče:

$$P_{CH} = 2 \cdot (95,35 - 59,65) \cdot 60 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot (95,35 - 59,65 + 30) \cdot 10 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 35 \cdot 30 \cdot 10^{-6} = 3,498 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Chladivost odpovídá chladivosti praporce.

$$\alpha_{on} = 7,64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Přechodový tepelný odpor mezi chladicí částí a proudovodnou drahou praporce zde není, protože chladič je součástí praporce. Můžeme tedy vypočítat rovnou tepelný odpor [8; str.109]:

$$R_{tCH1b} = \frac{1}{\alpha_{on} \cdot P_{CH}} = \frac{1}{7,64 \cdot 3,498 \cdot 10^{-3}} = 37,419 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

#### 4.3.12 Uvážení části neprotékané proudem na straně nože jako chladiče

Chladicí plochu určíme z obrázků 3 a 6. Budeme uvažovat povrch bez ploch zakrytých kontaktním nožem. Zaoblení v místech kontaktního styku nahradíme tím, že šířku bočních stěn budeme uvažovat jako vzdálenost mezi kontaktními noži. Horní plošku uvažujeme zaoblenou (čtvrt kružnice).

Po aplikaci výše vypsáných zjednodušení můžeme psát:

$$P_{CH} = 2 \cdot (84 - 37) \cdot 37,98 \cdot 10^{-6} + 37,98 \cdot \frac{\pi \cdot 14}{4} \cdot 10^{-6} = 3,988 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Chladivost odpovídá chladivosti praporce.

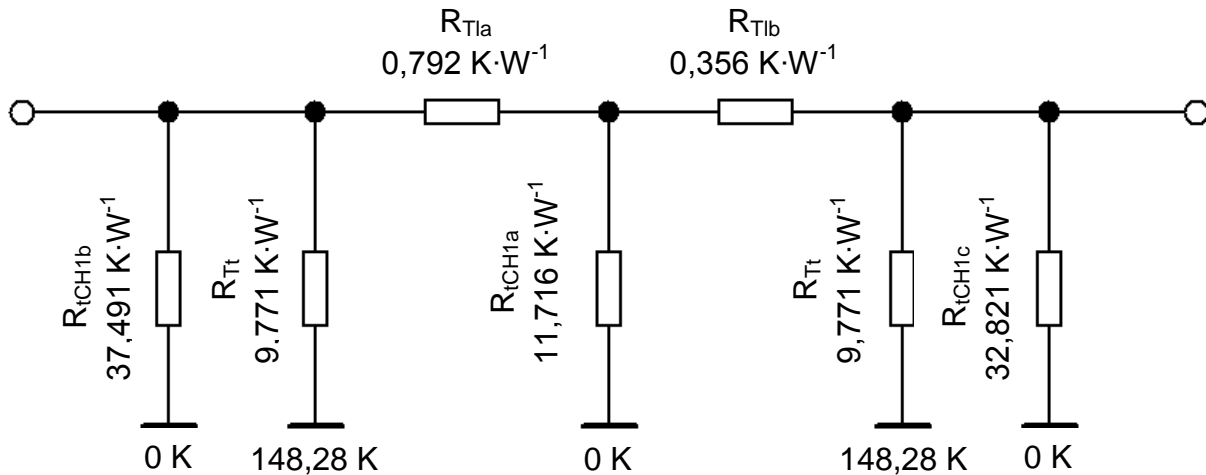
$$\alpha_{on} = 7,64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Přechodový tepelný odpor mezi chladicí částí a proudovodnou drahou praporce zde není, protože chladič je součástí praporce. Můžeme tedy vypočítat rovnou tepelný odpor [8; str.109]:

$$R_{tCH1c} = \frac{1}{\alpha_{on} \cdot P_{CH}} = \frac{1}{7,64 \cdot 3,988 \cdot 10^{-3}} = 32,821 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

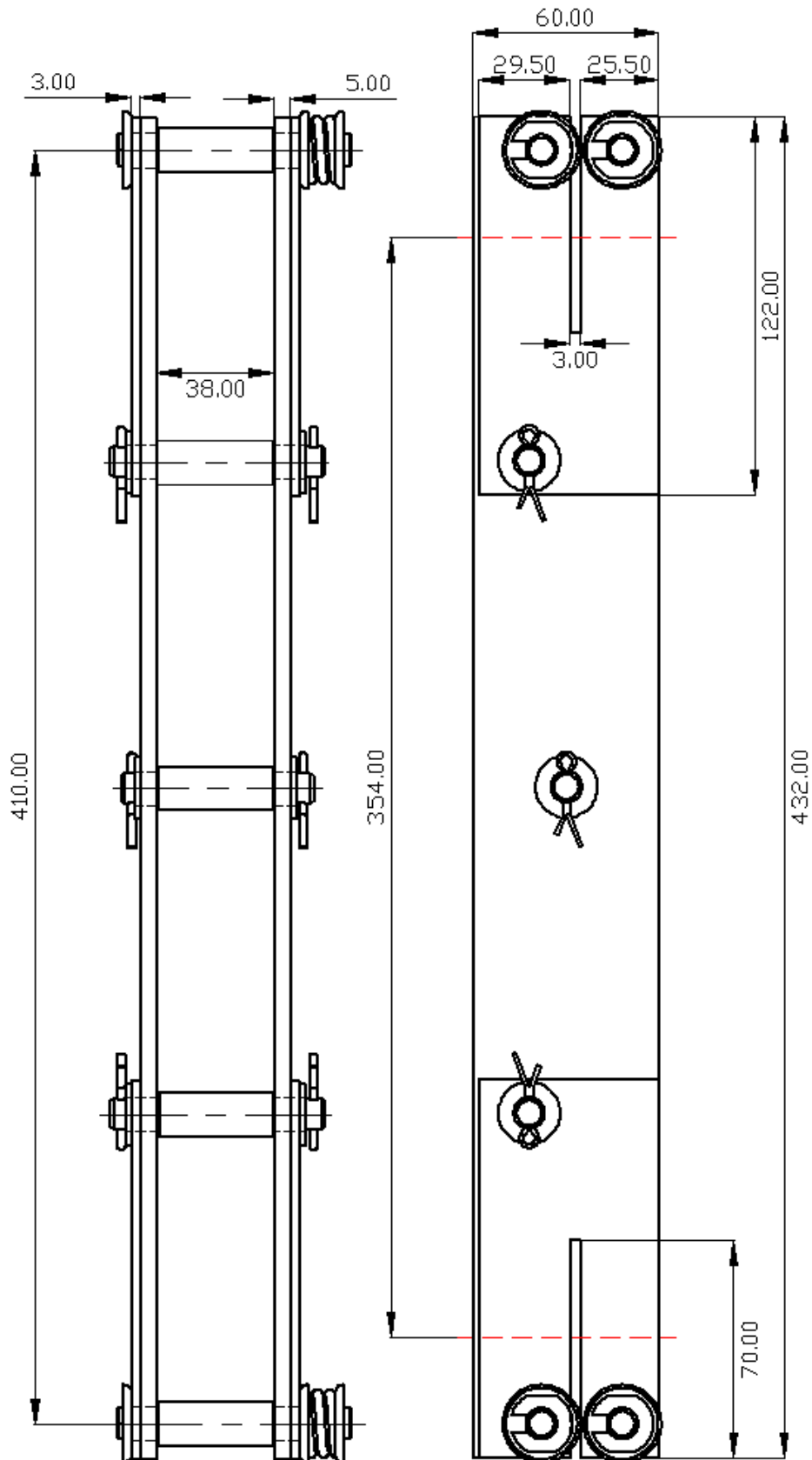
#### 4.3.13 Kompletní tepelné schéma vstupního praporce

Při sestavování vycházíme z obrázku 7 a hodnot z podkapitol 4.3.10 - 4.3.12:

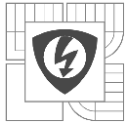


Obrázek 9 - Kompletní tepelné schéma vstupního praporce

#### 4.4. Výpočet náhradního schématu odpojovacího nože



Obrázek 10 - Odpojovací nůž odpojovače



#### 4.4.1. Koeficienty zhuštění proudnic

Dle obrázku 10 vidíme, že v odpojovacím noži se nachází celkem pět zúžení, dvě štěrby a tři kulaté otvory pro čepy:

- F) Tři kulaté otvory pro čepy jsou stejné a budou mít stejný koeficient zhuštění, jedná se o díry průměru 11 mm:  
 $b = 60 \text{ mm} - \text{výška nože}$   
 $a = b - \varnothing = 60 - 11 = 49 \text{ mm}$   
 $\frac{a}{b} = \frac{49}{60} = 0,82$

Uurčíme koeficient zhuštění [8; str. 31; Graf 2 – 6; typ 4] :

$$K_{1,2,3} = 1,2$$

- G) Štěrby jsou opět stejné a koeficient zúžení bude stejný, rozměr  $a_1$  bude zbylá výška nože po odpočtu výšky štěrby:

$$a_1 = 60 - 3 = 57 \text{ mm}$$
$$\frac{a_1}{b} = \frac{57}{60} = 0,95$$

Uurčíme koeficient zhuštění [8; str. 31; Graf 2 – 6; typ 1] :

$$K_{4,5} = 1,02$$

#### 4.4.2. Určení činitele skin efektu

Průřez jednoho nože, kde  $b$  je delší rozměr průřezu:

$$S_{n1} = b \cdot h = 0,06 \cdot 0,005 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Hodnoty potřebné pro odečtení z grafu:

$$\frac{b}{h} = \frac{0,06}{0,005} = 12$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{cu}}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{2,016 \cdot 10^{-8}}} = 862,6$$

Na základě výše uvedených hodnot odečteme činitel skinu [8; str. 29; Graf 2 – 4]:

$$K_s = 1,04$$

#### 4.4.3. Výpočet elektrického odporu

Délku proudovodné dráhy odečteme z obrázku 10:

$$l_n = 0,354 \text{ m}$$

Vypočítáme odpor nože [8; str. 122]:

$$R_n = \frac{\rho_{Cu}}{S_{n1}} [l_n + 2 \cdot b \cdot (3 \cdot k_{1,2,3} + 2 \cdot k_{4,5} - 5)] \cdot k_s$$

Dosadíme:

$$R_p = \frac{2,016 \cdot 10^{-8}}{300 \cdot 10^{-6}} [0,354 + 2 \cdot 60 \cdot 10^{-3} (3 \cdot 1,2 + 2 \cdot 1,02 - 5)] \cdot 1,04$$

$$R_p = 3,0108 \cdot 10^{-5} \Omega$$

#### 4.4.4. Určení náhradní chladivosti

a) Chladivost sáláním

Jelikož je materiál kontaktního nože stejný jako materiál praporce počítaného v předešlé podkapitole, bude i vzorec pro výpočet stejný, nicméně koeficient zastínění bude jiný.

Vypočítáme činitel stínění vnitřních ploch. Vlastní činitel stínění vnitřní plochy nelze přesně určí, odhadujeme  $K_{z1} \approx 0,95$ .

Vypočítáme činitel vzájemného stínění vnitřních ploch, kdy  $h$  je výška nože a  $a$  představuje vzdálenost nožů od sebe, viz obrázek 10 [8; str. 122]:

$$K_{z2} = \frac{h + a - \sqrt{h^2 + a^2}}{h} = \frac{0,06 + 0,038 - \sqrt{0,06^2 + 0,038^2}}{0,06} = 0,45$$

Pro celkový koeficient stínění vnitřních ploch platí [8; str. 122]:

$$K_n = K_{z1} \cdot K_{z2} = 0,95 \cdot 0,45 = 0,43$$

Vypočítáme chladicí povrch jedné z vnitřních ploch odpojovacího nože. Uvažujeme plochu podél proudovodné dráhy (mezi červenými přerušovanými čarami). Distanční válečky v této fázi neuvažujeme, budou použity později jako krátké chladiče, plochu jimi zakrytou musíme odečíst.

Plocha zakrytá jedním válečkem o průměru  $d_v = 14$  mm:

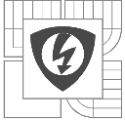
$$P_{sv} = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,014^2}{4} = 1,539 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Chladicí plocha vnitřní strany jednoho odpojovacího nože podél proudovodné dráhy s odpočtem tří ploch zakrytých distančními válečky:

$$P_{n1} = l_n \cdot h - 3 \cdot P_{sv} = 0,354 \cdot 0,06 - 3 \cdot 1,539 \cdot 10^{-4} = 0,0208 \text{ m}^2$$

Činitel stínění vnějších ploch bude odpovídat zvolenému činiteli  $K_{z1} \approx 0,95$ .

Vypočítáme chladicí povrch vnější plochy kontaktního nože. Uvažujeme pouze vnější plochu jednoho kontaktního nože, bez ploch zakrytých dvěma kovovými příložkami a podložkou o průměru  $d_p = 20$  mm:



$$P_{n2} = 0,354 \cdot (0,06 + 2 \cdot 0,005) - \frac{\pi \cdot 0,02^2}{4} - 2 \cdot \left(0,122 - \frac{0,432 - 0,354}{2}\right) \cdot 0,058$$
$$= 0,0148 \text{ m}^2$$

Určíme výsledný činitel stínění [8; str. 110]:

$$k_{zn} = \frac{k_n \cdot P_{n1} + k_{z1} \cdot P_{n2}}{P_{n1} + P_{n2}} = \frac{0,43 \cdot 0,0208 + 0,95 \cdot 0,0148}{0,0208 + 0,0148} = 0,646$$

Pro určení chladiivosti zářením použijeme rovnici 8:

$$\alpha_z = k_{zn} \cdot [0,9 + 0,002 \cdot \theta] = 0,646 \cdot (0,9 + 0,002 \cdot 50) = 0,646 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

b) Chladiivost prouděním

Chladiivost prouděním bude stejná, jako u přívodního praporce viz bod 4.3.6:

$$\alpha_k = 6,84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

c) Celková náhradní chladiivost [8; str. 119]

$$\alpha_{on} = \alpha_z + \alpha_k = 0,646 + 6,84 = 7,486 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### 4.4.5. Výpočet velikosti chladičícího obvodu [8; str. 123]

$$O_{vp} = \frac{P_{n1} + P_{n2}}{l_n} = \frac{0,0208 + 0,0148}{0,354} = 0,10056 \text{ m}$$

#### 4.4.6. Výpočet veličin náhradního schématu odpojovacího nože [8; str. 123]

$$\beta l = l_n \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{on} \cdot 2 \cdot O_{vp}}{\lambda_{cu} \cdot 2 \cdot S_n}} = 0,354 \cdot \sqrt{\frac{7,486 \cdot 2 \cdot 0,10056}{385 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4}}} = 0,90375$$

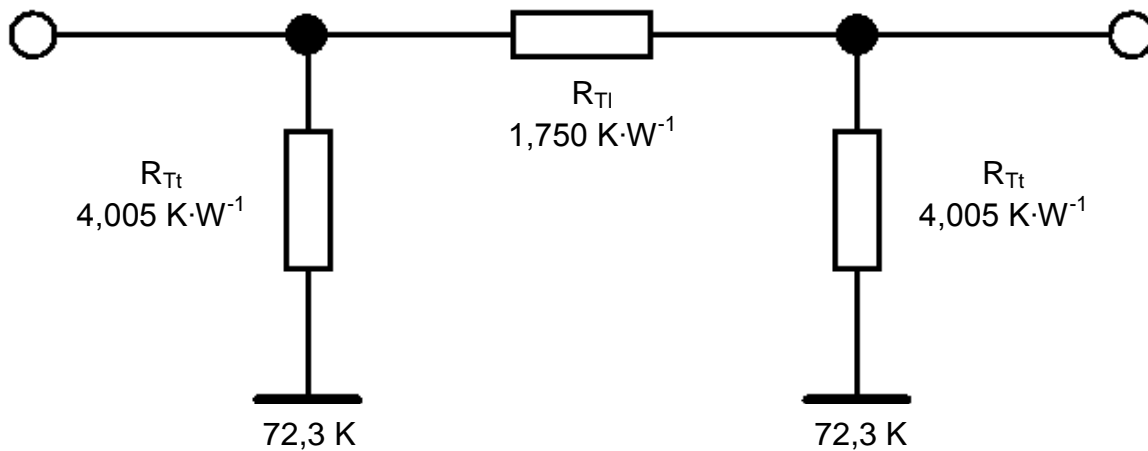
$$\delta = \sqrt{\alpha_{on} \cdot 2 \cdot O_{vp} \cdot \lambda_{cu} \cdot 2 \cdot S_p} = \sqrt{7,486 \cdot 2 \cdot 0,10056 \cdot 385 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4}} = 0,58974$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(0,90375)}{0,58974} = 1,7498 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,58974 \cdot \tanh\left(\frac{0,90375}{2}\right)} = 4,005 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\theta_{\infty} = \frac{\frac{R_p}{2} \cdot I^2}{\alpha_{on} \cdot 2 \cdot (P_{n1} + P_{n2})} = \frac{\frac{3,0108 \cdot 10^{-5}}{2} \cdot 1600^2}{7,486 \cdot 2 \cdot (0,0208 + 0,0148)} = 72,3 \text{ K}$$

Z vypočtených hodnot sestavíme náhradní  $\pi$ -článek kontaktního nože:



Obrázek 11 - Náhradní  $\pi$ -článek odpojovacího nože

#### 4.4.7. Uvážení kraje nože jako krátké chladicí tyče

Kraje nože, kterými neprotéká proud, čili za červenými čárkovanými čarami, uvažujeme jako krátké chladicí tyče.

##### 4.4.7.1. Postříbřená část chladicí plochy

Nejdříve musíme určit činitel stínění. Činitel stínění vnitřních i vnějších ploch bude stejný jako v bodě 4.4.4, protože kraje nože mají stejné geometrické uspořádání jako zbytek nože.

Činitel stínění vnějších ploch:

$$K_{z1} \approx 0,95$$

Činitel stínění vnitřních ploch:

$$K_n = 0,43$$

Vyčíslíme vnitřní chladicí povrch postříbřené mědi, což je vnitřní povrch s odečtem ploch zakrytých distančními válečky, vliv šterbiny uprostřed nože neuvažujeme. Nůž tvoří dva pasy, tudíž plocha bude rovna dvojnásobku vnitřní chladicí plochy konce jednoho pasu:

$$P_{CH1} = 2 \cdot (l_{CH} \cdot h - 2 \cdot P_{sv}) = 2 \cdot \left( \frac{0,432 - 0,354}{2} \cdot 0,06 - 2 \cdot 1,539 \cdot 10^{-4} \right) \\ = 4,064 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Nyní vyčíslíme vnější chladicí povrch postříbřené mědi, což je vnější povrch s odečtem ploch zakrytých ocelovými příložkami o výšce  $h_{Fe} = 0,058$  m, vliv šterbiny uprostřed nože opět neuvažujeme. Nůž tvoří dva pasy, tudíž plocha bude rovna dvojnásobku vnější chladicí plochy konce jednoho pasu:



$$\begin{aligned}P_{CH2} &= 2 \cdot [l_{CH} \cdot (h + 2 \cdot b - h_{Fe}) + h \cdot b] \\ &= 2 \cdot \left[ \frac{0,432 - 0,354}{2} \cdot (0,06 + 2 \cdot 0,005 - 0,058) + 0,06 \cdot 0,005 \right] \\ &= 1,536 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\end{aligned}$$

Určíme výsledný činitel stínění postříbřené mědi [8; str. 110]:

$$k_{CHzn} = \frac{k_n \cdot P_{CH1} + k_{z1} \cdot P_{CH2}}{P_{CH1} + P_{CH2}} = \frac{0,43 \cdot 4,064 \cdot 10^{-3} + 0,95 \cdot 1,536 \cdot 10^{-3}}{4,064 \cdot 10^{-3} + 1,536 \cdot 10^{-3}} = 0,573$$

a) Pro určení chladiivosti zářením postříbřených částí použijeme rovnici 8:

$$\alpha_z = k_{CHzn} \cdot [0,9 + 0,002 \cdot \theta] = 0,573 \cdot (0,9 + 0,002 \cdot 50) = 0,573 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

b) Chladiivost prouděním

Chladiivost prouděním bude stejná, jako u přívodního praporence viz bod 4.3.6:

$$\alpha_k = 6,84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

c) Celková náhradní chladiivost [8; str. 119]

$$\alpha_{on} = \alpha_z + \alpha_k = 0,573 + 6,84 = 7,413 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### 4.4.7.2. Ocelové části chladicí plochy

Nyní je třeba započítat distanční válečky z oceli 11 373.

Plocha jednoho válečku o průměru  $d_v = 14$  mm:

$$P_{CHv1} = \pi \cdot d_v \cdot a = \pi \cdot 0,014 \cdot 0,038 = 1,671 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Válečky zde máme dva, viz obrázek 10:

$$P_{CHv} = 2 \cdot P_{CHv1} = 2 \cdot 1,671 \cdot 10^{-3} = 3,3427 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Činitel stínění použijeme jako u vnitřních ploch, protože válečky leží uvnitř odpojovacího nože:

$$K_n = 0,43$$

a) Chladiivost zářením

U výpočtu chladiivosti vycházíme z odstavce 4.3.10.3. Rozdílem je činitel stínění, který zde bude jiný:

$$\alpha_{zv} = k_n \cdot [2,4 + 0,013 \cdot \theta] = 0,43 \cdot [2,4 + 0,013 \cdot 50] = 1,31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

b) Chladiivost prouděním [8; str. 52; Tabulka 2 – 44]

Použijeme vzorec pro stěnu o šířce 5 cm:

$$\alpha_{kv} = 4,3 + 0,055 \cdot \theta = 4,3 + 0,055 \cdot 50 = 7,05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

c) Celková náhradní chladiivost [8; str. 119]

$$\alpha_{onv} = \alpha_{zv} + \alpha_{kv} = 1,31 + 7,05 = 8,36 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### 4.4.7.3. Výpočet tepelného odporu chladiče

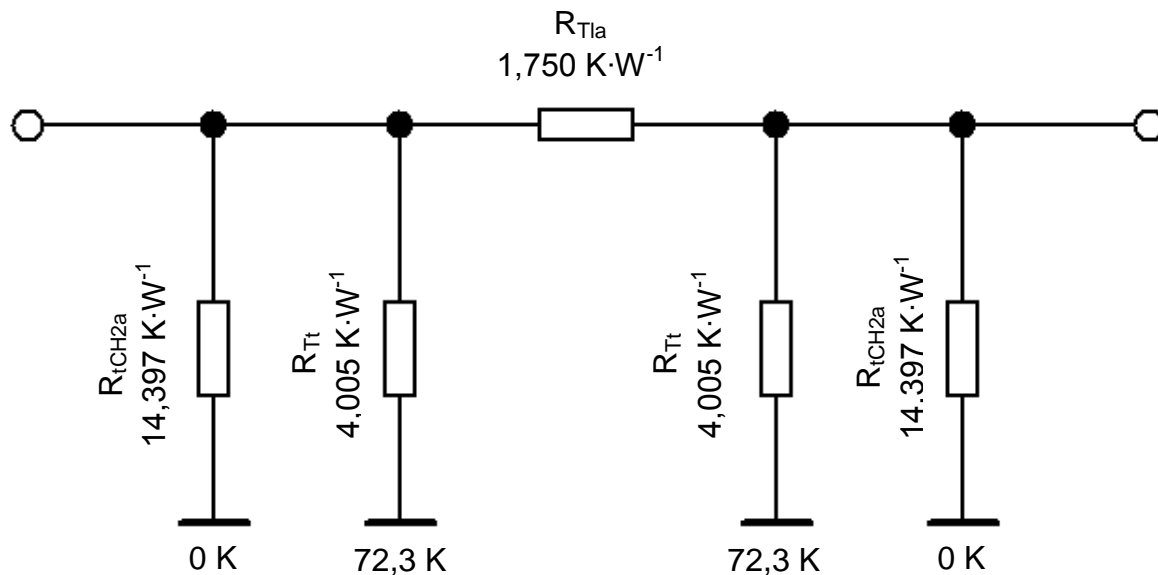
Přechodový tepelný odpor mezi chladicí částí a proudovodnou drahou nože zde opět není, protože chladič je součástí nože. U ocelových válečků přechodový tepelný odpor také zanedbáme, protože přitlačná síla  $F_p = 586 \text{ N}$  je značná a vzhledem k umístění válečků dochází i k velkému přenosu tepla z kontaktního styku do válečku záření. Můžeme tedy vypočítat rovnou tepelný odpor [8; str. 109]:

$$R_{tCH2a} = \frac{1}{\alpha_{on} \cdot (P_{CH1} + P_{CH2}) + \alpha_{onv} \cdot P_{CHv}}$$

$$R_{tCH2a} = \frac{1}{7,413 \cdot (1,536 \cdot 10^{-3} + 4,064 \cdot 10^{-3}) + 8,36 \cdot 3,3427 \cdot 10^{-3}} = 14,397 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

#### 4.4.8. Zařazení okrajů nože do schématu

Dle bodu 4.4.6 a 4.4.7 zařadíme do obrázku 11 konce nože jako chladiče:



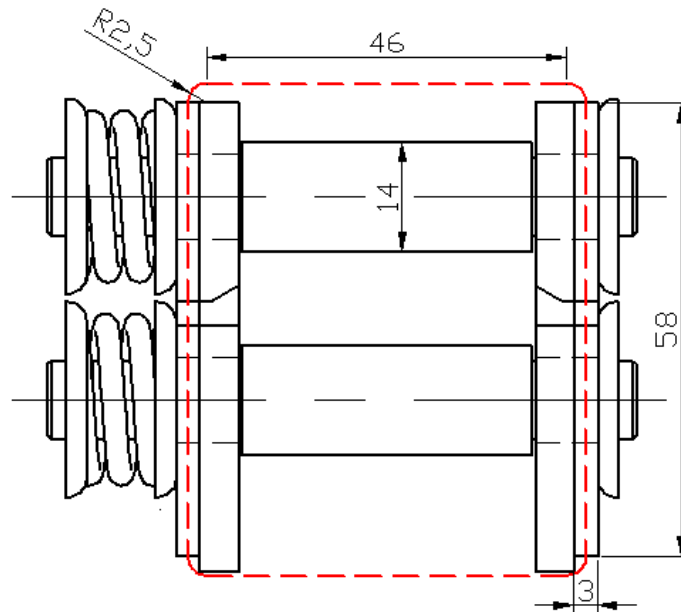
Obrázek 12 - Schéma odpojovacího nože se zařazenými kraji nože jako chladiči

#### 4.4.9. Výpočet vlivu ocelových příložek na ustálené oteplení

##### 4.4.9.1. Určení délky magnetické siločáry

Délku magnetické siločáry určíme z obrázku 13:

$$l_h = 2 \cdot (0,046 + 0,058) + 2 \cdot \pi \cdot 0,0025 = 0,2237 \text{ m}$$



Obrázek 13 - Znárodnění délky magnetické siločáry ocelových příložek

#### 4.4.9.2. Určení elektromagnetické indukce tohoto elektromagnetického obvodu

Obecně platí, že magnetomotorická síla je dána vztahem  $F_m = N \cdot I$ , náš nůž představuje pouze jeden závit a tudíž lze psát:

$$F_m = \sum I = 1600 \text{ A}$$

Vypočítáme intenzitu magnetického pole [8; str. 124]:

$$H = \frac{F_m}{l_h} = \frac{1600}{0,2237} = 7152 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Z magnetizační křivky pro ocel, téměř totožnou jako pro ocelolitinu, odečteme elektromagnetickou indukci [8; str. 124, obr. 4 – 29]:

$$B_{Fe} = 1,75 \text{ T}$$

#### 4.4.9.3. Výpočet ztrát v příložce

V ocelové příložce je vyfrézována drážka, která slouží ke snížení ztrát v příložce. Vzhledem k tomu že je drážka velice úzká, zanedbáme její vliv. Vliv této drážky se bude projevovat výrazně při nadproudech, což není náš případ. Pokud by však drážka byla větší, je důležité ji uvážit i ve výpočtu ustáleného oteplení!

Z obrázku 10 určíme délku železných příložek v místech, kde prochází elektrický proud:

$$l_{Fe} = 0,122 - \frac{0,432 - 0,354}{2} = 0,083 \text{ m}$$

Ztráty v jedné ocelové příložce potom budou ( $b_{Fe}$  je tloušťka jedné příložky, viz obr. 10,  $h_{Fe}$  je výška příložky a  $\rho_{Fe} = 0,15 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$ ) [9; str. 41]:



$$Q_1 = \frac{(\pi \cdot f \cdot B_{Fe})^2 \cdot (l_{Fe} \cdot b_{Fe})^3 \cdot h_{Fe}}{8 \cdot \rho_{Fe} \cdot (l_{Fe}^2 + b_{Fe}^2)} = \frac{(\pi \cdot 50 \cdot 1,75)^2 \cdot (0,083 \cdot 0,003)^3 \cdot 0,058}{8 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} \cdot (0,083^2 + 0,003^2)}$$

$$Q_1 = 8,174 \text{ W}$$

#### 4.4.9.4. Určení chladiivosti příložek

Činitel stínění použijeme jako u vnějších ploch odpojovacího nože:

$$K_{z1} = 0,95$$

a) Chladiivost zářením

U výpočtu chladiivosti vycházíme z odstavce 4.3.10.3. Rozdílem je činitel stínění, který zde bude jiný:

$$\alpha_{zFe} = k_{z1} \cdot [2,4 + 0,013 \cdot \theta] = 0,95 \cdot [2,4 + 0,013 \cdot 50] = 2,90 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

b) Chladiivost prouděním [8; str. 52; Tabulka 2 – 44]

Použijeme vzorec pro stěnu o šířce 5 cm:

$$\alpha_{kFe} = 4,3 + 0,055 \cdot \theta = 4,3 + 0,055 \cdot 50 = 7,05 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

c) Celková náhradní chladiivost [8; str. 119]

$$\alpha_{oFe} = \alpha_{zFe} + \alpha_{kFe} = 2,90 + 7,05 = 9,95 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

#### 4.4.9.5. Výpočet chladící plochy, průřezu a náhradního obvodu chlazení příložek

Uvažujeme celý povrch jedné příložky se zanedbáním vlivu drážky. Zvýšení plochy podložkou a boky čepu zakomponujeme zvýšením plochy o 5 %:

$$P_{Fe} = 1,05 \cdot [h_{Fe} \cdot (l_{Fe} + b_{Fe}) + 2 \cdot l_{Fe} \cdot b_{Fe}] \\ = 1,05 \cdot [0,058 \cdot (0,083 + 0,003) + 2 \cdot 0,083 \cdot 0,003] = 5,7603 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Vypočítáme celkový průřez obou příložek, vliv drážky zanedbáme:

$$S_{Fe} = 2 \cdot h_{Fe} \cdot b_{Fe} = 2 \cdot 0,058 \cdot 0,003 = 3,48 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Délka náhradního chladícího obvodu potom bude [8; str. 125]:

$$O_{Fe} = \frac{2 \cdot P_{Fe}}{l_{Fe}} = \frac{2 \cdot 5,7603 \cdot 10^{-3}}{0,083} = 0,1388 \text{ m}$$

#### 4.4.9.6. Náhradní schéma příložky

Opět nahradíme příložku náhradním  $\pi$ -článkem. Při výpočtu předpokládáme rovnoměrné rozložení ztrát [8; str. 125]:

$$\beta l = l_{Fe} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{oFe} \cdot O_{Fe}}{\lambda_{Fe} \cdot S_{Fe}}} = 0,083 \cdot \sqrt{\frac{9,95 \cdot 0,1388}{4 \cdot 3,48 \cdot 10^{-4}}} = 0,8267$$

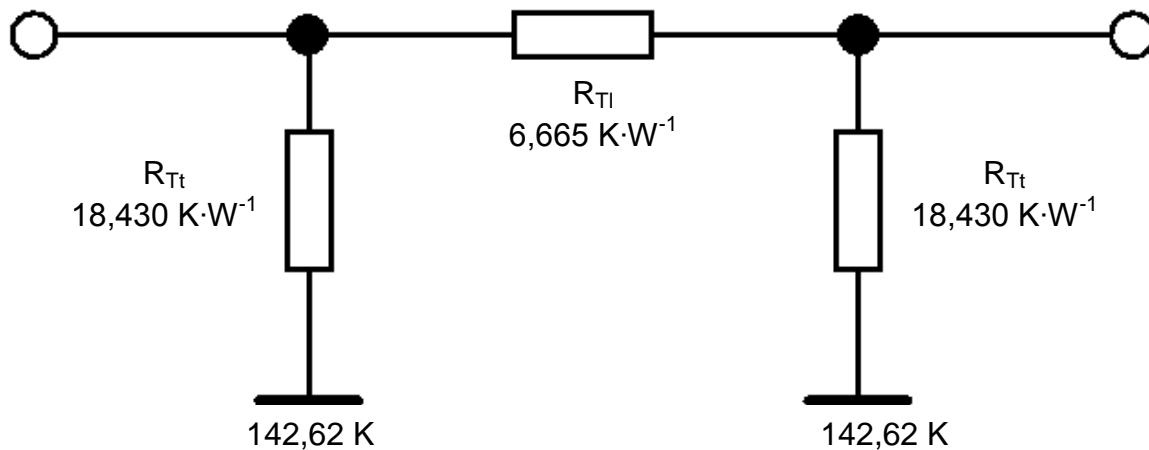
$$\delta = \sqrt{\alpha_{oFe} \cdot O_{Fe} \cdot \lambda_{Fe} \cdot S_{Fe}} = \sqrt{9,95 \cdot 0,1388 \cdot 40 \cdot 3,48 \cdot 10^{-4}} = 0,1387$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(0,92418)}{0,13865} = 6,665 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,13865 \cdot \tanh\left(\frac{0,92418}{2}\right)} = 18,430 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\theta_{\infty} = \frac{2 \cdot Q_1}{\alpha_{oFe} \cdot 2 \cdot P_{Fe}} = \frac{2 \cdot 8,174}{9,95 \cdot 2 \cdot 5,7603 \cdot 10^{-3}} = 142,62 \text{ K}$$

Z vypočtených hodnot sestavíme  $\pi$ -článek:



Obrázek 14 - Náhradní  $\pi$ -článek kovových příložek

#### 4.4.9.7. Propojení kontaktního nože a příložek ve schématu

Abychom mohli příložku propojit ve schématu s kontaktním nožem, je třeba vypočítat přechodový tepelný odpor přes vzduchovou mezeru, viz odstavec 4.3.10.4.

Součinitel přestupu tepla pro vzduch o teplotě 70 °C:

$$\lambda_{A70} = 0,028 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Vzduchovou mezeru mezi kontaktním nožem a příložkou odhadneme vzhledem ke kontaktní síle a nerovnostem při dosedání povrchů na  $\delta = 0,1 \text{ mm}$ .

Plocha styku jedné příložky:

$$P_s = l_{Fe} \cdot h_{Fe} = 83 \cdot 10^{-3} \cdot 58 \cdot 10^{-3} = 4,814 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Vypočítáme odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru [8; str. 112]:

$$R_{st} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta}{2 \cdot P_s} = \frac{1}{0,028} \cdot \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4,814 \cdot 10^{-3}} = 0,371 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Dostali jsme celkový přechodový tepelný odpor, pro připojení do schématu potřebujeme vzhledem k stavbě  $\pi$ -článku dva odpory paralelně. Rozdělíme tedy přechodový odpor na dva paralelně zařazené odpory:

$$R_{st1} = 2 \cdot R_{st} = 2 \cdot 0,371 = 0,742 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Dále je třeba podélný tepelný odpor kontaktního nože rozdělit v poměru přílozek:

$$l_{Fe} : l_{Cuv} : l_{Fe}$$

Volná část nože má délku, viz obrázek 10:

$$l_{Cuv} = 0,432 - 0,122 - 0,122 = 0,188 \text{ m}$$

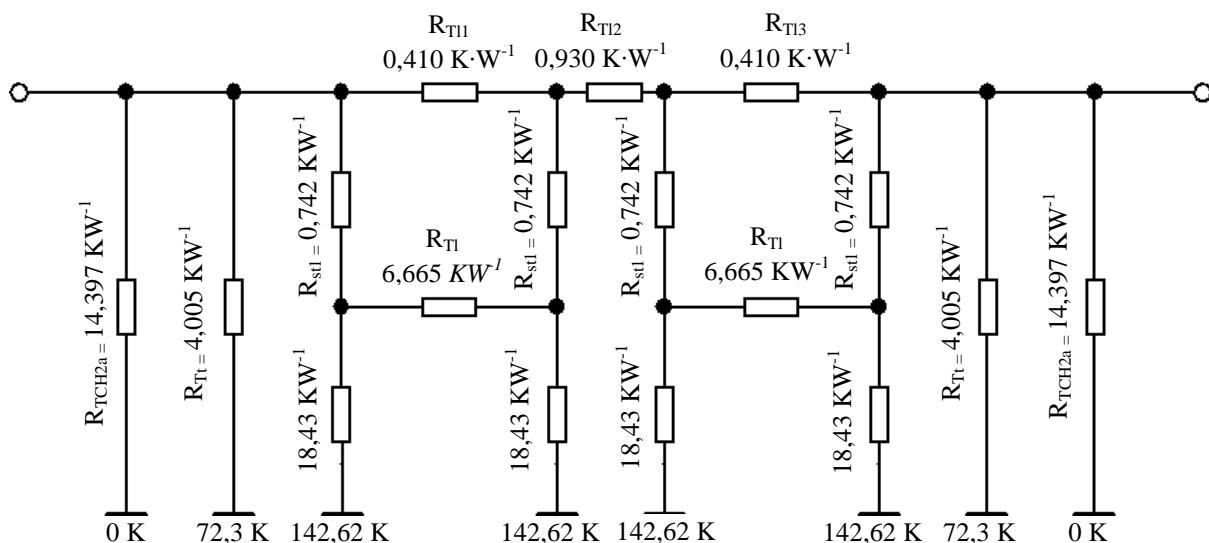
Poměr tedy bude:

$$0,083 : 0,188 : 0,083$$

$$R_{Tl1} = R_{Tl3} = l_{Fe} \cdot \frac{R_{Tl}}{l_{Fe} + l_{Cuv} + l_{Fe}} = 0,083 \cdot \frac{1,75}{0,083 + 0,188 + 0,083} = 0,410 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{Tl2} = R_{Tl} - R_{Tl1} - R_{Tl3} = 0,930 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Schéma po připojení ke kontaktnímu noži bude vypadat takto, vycházíme z obrázku 12, obrázku 14 a výpočtů, viz výše.



Obrázek 15 - Náhradní schéma odpojovacího nože včetně ztrát v ocelových příložkách

#### 4.4.9.8. Výpočet krajů ocelových příložek jako krátkých chladičů

Z obrázku 10 je patrné, že tyto konce ocelových příložek mimo proudovodnou dráhu jsou propojeny přímo s ocelovými příložkami a přes vzduchovou mezeru s konci kontaktního nože, což musí odpovídat i schématu.

Chladiivost použijeme stejnou jako u zbytku příložek:

$$\alpha_{oFe} = 9,95 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Vyčíslíme přechodový odpor mezi nožem a příložkou podle odstavce 4.3.10.4:

$$\lambda_{A70} = 0,028 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\delta = 0,1 \text{ mm}$$

Plocha styku volné části jedné příložky z obrázku 10:

$$P_{sch} = (l_p - l_{Fe}) \cdot (h_{Fe} - 0,003) = (0,122 - 0,083) \cdot (0,058 - 0,003) = 1,911 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Vypočítáme odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru pro dvě volné části příložek [8; str.112]:

$$R_{stCH} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta}{2 \cdot P_{sch}} = \frac{1}{0,028} \cdot \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,911 \cdot 10^{-3}} = 0,934 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Vypočítáme chladicí povrch volné části jedné příložky, výřez nyní uvažujeme, vliv pružin a podložek započítáme odhadem z obrázku 10, jako 50 % plochy navíc:

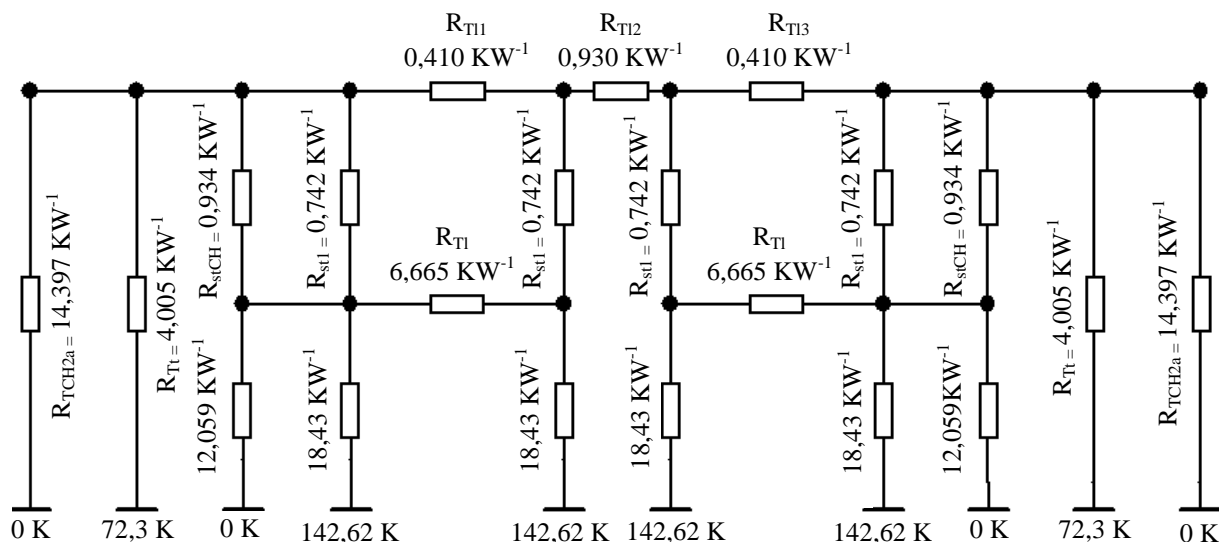
$$P_{CHFe} = 1,5 \cdot [(l_p - l_{Fe}) \cdot (h_{Fe} + 3 \cdot 0,003) + (h_{Fe} - 0,003) \cdot 0,003] = 1,2 \cdot [(0,122 - 0,083) \cdot (0,058 + 3 \cdot 0,003) + (0,058 - 0,003) \cdot 0,003] = 4,167 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Vypočítáme tepelný odpor chladiče [8; str. 109]:

$$R_{TCHFe} = \frac{1}{\alpha_{oFe} \cdot 2 \cdot P_{ChFe}} = \frac{1}{9,95 \cdot 2 \cdot 4,167 \cdot 10^{-3}} = 12,059 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

#### 4.4.9.9. Zařazení chladičů vypočítaných v bodě 4.4.9.8 do schématu

Do obrázku 15 přidáme chladiče vypočítané v bodě 4.4.9.8:



Obrázek 16 - Náhradní schéma odpojovacího nože bez distančních válečků

#### 4.4.10. Zařazení tří distančních válečků do schématu

Posledním členem schématu odpojovacího nože bude chladič tvořený třemi distančními válečky, viz obrázek 10. Chladicí plochu válečku a jeho náhradní chladičivost použijeme z kapitoly 4.4.7.2, kde byly počítány stejné válečky.

Plocha jednoho válečku o průměru  $d_v = 14 \text{ mm}$ :

$$P_{CHv1} = \pi \cdot d_v \cdot a = \pi \cdot 0,014 \cdot 0,038 = 1,671 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Celková náhradní chladiivost:

$$\alpha_{onv} = 8,36 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

Můžeme tedy vypočítat rovnou tepelný odpor jednoho válečku [8; str. 109]:

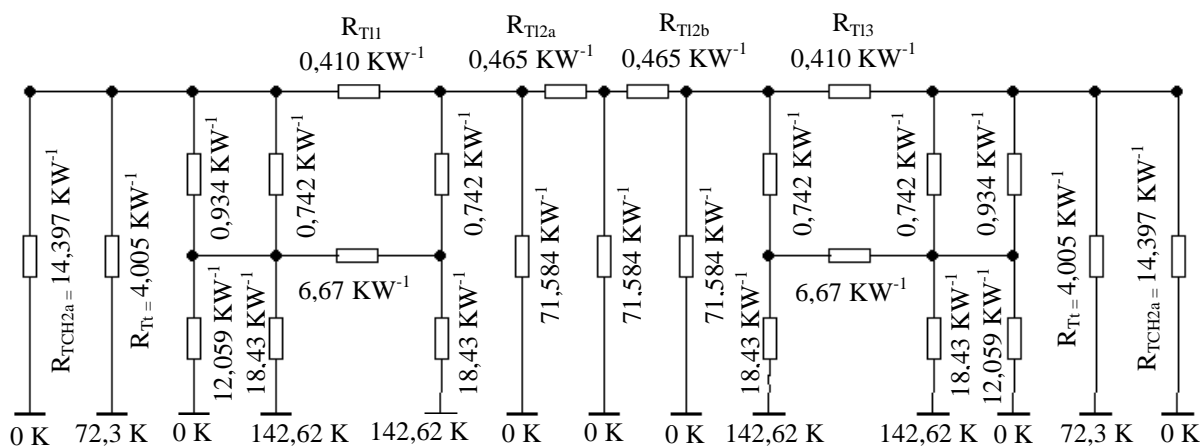
$$R_{tCH2a} = \frac{1}{\alpha_{onv} \cdot P_{CHv1}} = \frac{1}{8,36 \cdot 1,671 \cdot 10^{-3}} = 71,584 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Válečky umístíme do schématu přesně podle obrázku 10. První na konec první příložky, druhý doprostřed volné části mezi příložkami a třetí na začátek druhé příložky. Musíme proto podílný odpor  $R_{Tl2}$  z obrázku 16 rozdělit na dvě poloviny.

$$R_{Tl2a} = R_{Tl2b} = \frac{R_{Tl2}}{2} = \frac{0,93}{2} = 0,465 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

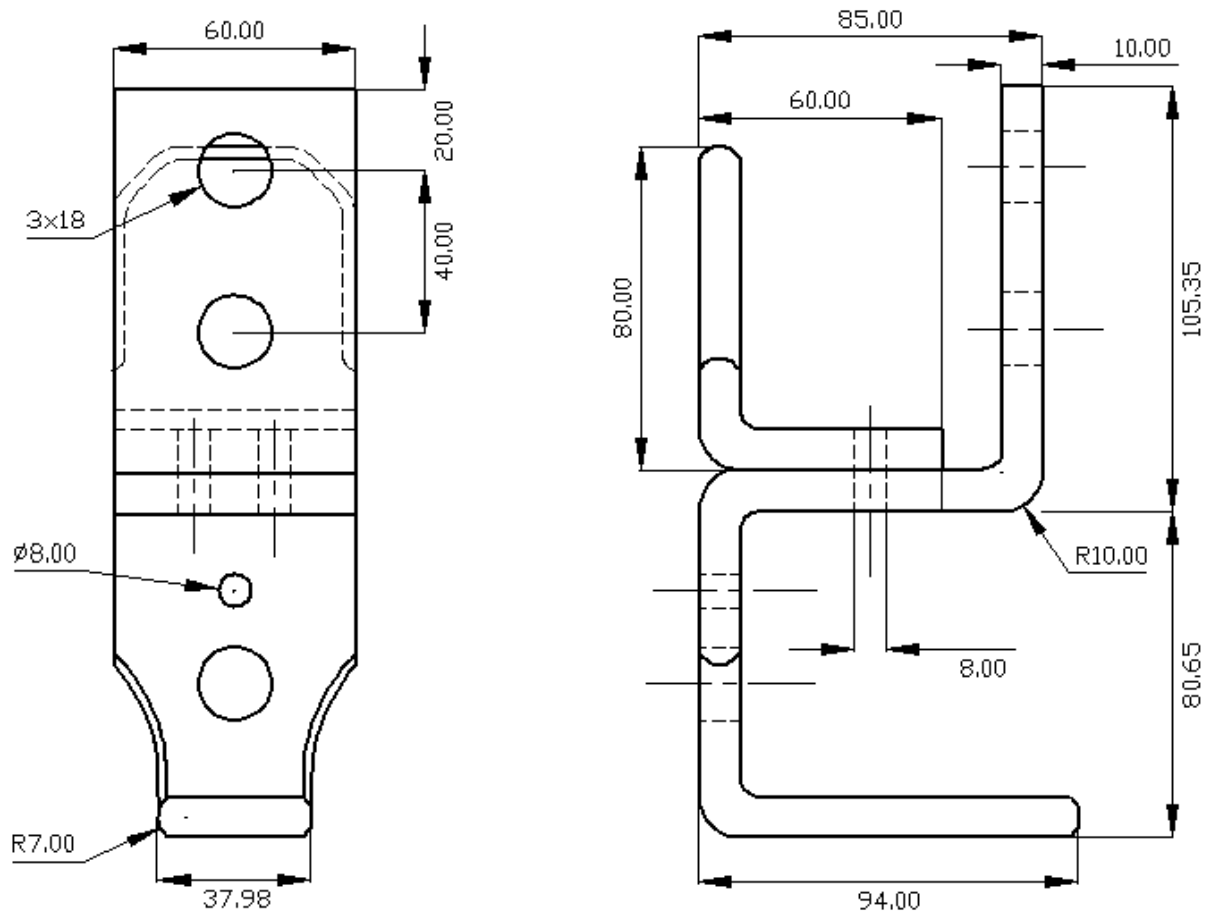
#### 4.4.11. Kompletní náhradní tepelné schéma odpojovacího nože

Do obrázku 16 přidáme distanční válečky vypočítané v kapitole 4.4.10. Pro lepší přehlednost zde nebudou použita některá označení tepelných odporů, a některé hodnoty budou zaokrouhleny:



Obrázek 17 - Kompletní schéma odpojovacího nože

## 4.5. Výpočet náhradního schématu výstupního praporce



Obrázek 18 - Výstupní praporec s uzemňovacím kontaktem

Při výpočtu výstupního praporce s uzemňovacím kontaktem budeme vycházet z výpočtu vstupního praporce, viz kapitola 4.3. Rozdíl je zde v tom, že výstupní praporec obsahuje kontakt uzemňovače, ale neobsahuje uchycení kloubu kontaktního nože. Můžeme tedy přeskočit kapitoly 4.3.1-4.3.3.

### 4.5.1. Elektrický odpor

Při výpočtu budeme zanedbávat přechodový odpor mezi pasem a kontaktem uzemňovače, protože jde o velkou plochu postříbřeného mědi a odpor bude velice malý. Budeme předpokládat, že v místě uchycení uzemňovacího kontaktu bude odpor proudovodné dráhy poloviční než v jiných místech. Rozdělíme tedy elektrický odpor vypočítaný v bodě 4.3.4 na tři části, jednu část před uchycením kontaktu uzemňovače, druhou, která vede paralelně s uchycením uzemňovače a třetí, která je za uchycením uzemňovače.

$$R_p = 1,20802 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Z obrázku 4 a obrázku 18 vypočítáme všechny délky jednotlivých úseků:

$$l_1 = (59,65 + 11,78 + 60 - 50) \cdot 10^{-3} = 81,43 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$



Uzemňovací kontakt vede souběžně s praporcem v délce:

$$l_2 = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

U výpočtu třetího úseku použijeme střední délku proudnice  $l$  z kapitoly 4.3.3:

$$l_3 = (l - l_1 - l_2) \cdot 10^{-3} = (255,01 - 81,43 - 50) \cdot 10^{-3} = 123,58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Nyní rozdělíme elektrický odpor v poměru na jednotlivé úseky:

$$R_{p1} = l_1 \cdot \frac{R_p}{l} = 81,43 \cdot \frac{1,20802 \cdot 10^{-5}}{255,01} = 3,85746 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$R_{p2} = l_2 \cdot \frac{R_p}{l} = 50 \cdot \frac{1,20802 \cdot 10^{-5}}{255,01} = 2,36857 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$R_{p3} = R_p - R_{p1} - R_{p2} = (1,20802 - 0,385746 - 0,236857) \cdot 10^{-5} = 5,85417 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Kontakt uzemňovače je přiložen v úseku o odporu  $R_{p2}$ . Průřez i materiál kontaktu uzemňovače je stejný jako u praporce. Budeme tedy brát, že v místě uchycení kontaktu uzemňovače jsou dva pasy paralelně, tudíž odpor úseku bude poloviční:

$$R_{p2p} = \frac{R_{p2}}{2} = \frac{2,36857 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,184285 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Celkový odpor praporce potom bude:

$$R_{2p} = R_{p1} + R_{p2p} + R_{p3} = (3,85746 + 1,184285 + 5,85417) \cdot 10^{-6} = 1,0896 \cdot 10^{-5} \Omega$$

#### 4.5.2. Střední délka proudovodné dráhy

Střední délka proudnice bude stejná jako u vstupního praporce:

$$l = 0,25501 \text{ m}$$

#### 4.5.3. Chladicí plocha výstupního praporce

U chladicí plochy vyjdeme z chladicí plochy vstupního praporce. Rozdílem je, že zde není uchycení kloubu, tudíž musíme k chladicí ploše vstupního praporce přičíst plochu zakrytou ve vstupním praporci uchycením kloubu a jako chlazení započítat i hlavy šroubů. Vliv šroubů zohledníme zvětšením chladicí plochy o 10 %. Posledním rozdílem je povrch části kontaktu uzemňovače, který vede paralelně s praporcem. Tento povrch musíme také přičíst.

Plocha vstupního praporce včetně 5 % na plochu šroubů:

$$P_p = 1,05 \cdot P = 2,7303 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Povrch počítaný jako zakrytý upevněním kloubu, viz kapitola 4.3.7:

$$S_u = 0,05 \cdot 0,03 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Horní plocha kontaktu uzemňovače je již započítána, protože chladicí plocha osahovala plochu stejné velikosti, která je teď zakryta kontaktem uzemňovače. Záměrně není připočítána plocha vyčnívající do volného prostoru, bude použita jako krátká chladicí tyč. Musíme tedy vypočítat pouze boční plochy:

$$S_+ = 0,01 \cdot (0,05 + 0,06 + 0,05) = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Nyní vypočítáme celkovou chladicí plochu výstupního praporce včetně navýšení o 10 % způsobené hlavami šroubů a izolátorem:

$$P_{p2} = 1,1 \cdot \left( \frac{P_p}{1,05} + S_u + S_+ \right) = 1,1 \cdot \left( \frac{2,7303 \cdot 10^{-2}}{1,05} + 1,5 \cdot 10^{-3} + 1,6 \cdot 10^{-3} \right) \\ = 3,2013 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

#### 4.5.4. Velikost náhradního tepelného obvodu [8; str. 119]

$$O_{vp} = \frac{P_{p2}}{l} = \frac{0,03201}{0,25501} = 0,12552 \text{ m}$$

#### 4.5.5. Určení náhradní chladiivosti

Materiál i geometrie je přibližně stejná jako u vstupního praporce, náhradní chladiivost použijeme stejnou:

$$\alpha_{on} = \alpha_z + \alpha_k = 0,8 + 6,84 = 7,64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### 4.5.6. Výpočet veličin náhradního $\pi$ -článku [8; str. 119]

$$\beta l = l \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{on} \cdot O_{vp}}{\lambda_{cu} \cdot S_p}} = 0,25501 \cdot \sqrt{\frac{7,64 \cdot 0,12552}{385 \cdot 6 \cdot 10^{-4}}} = 0,51958$$

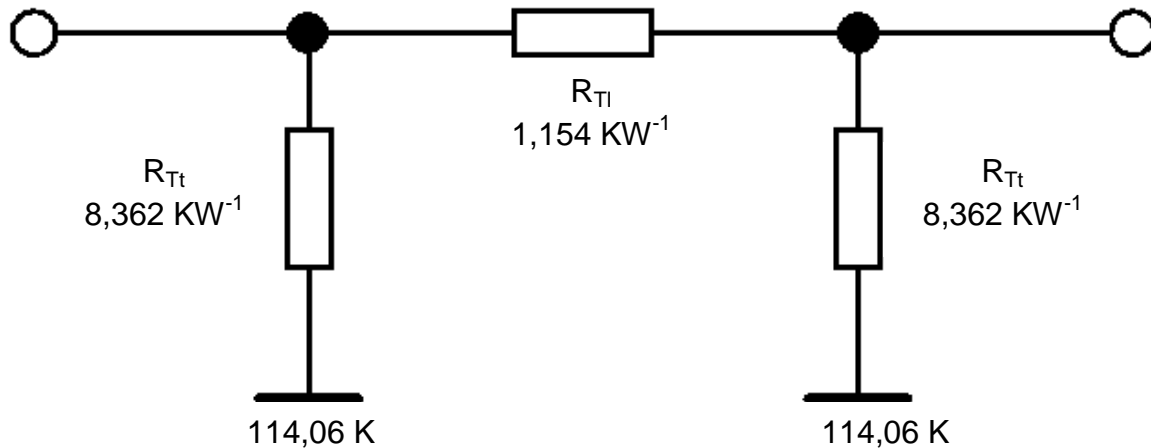
$$\delta = \sqrt{\alpha_{on} \cdot O_{vp} \cdot \lambda_{cu} \cdot S_p} = \sqrt{7,64 \cdot 0,12552 \cdot 385 \cdot 6 \cdot 10^{-4}} = 0,47066$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(0,51955)}{0,47066} = 1,154 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,47066 \cdot \tanh\left(\frac{0,51958}{2}\right)} = 8,362 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\theta_{\infty} = \frac{R_{2p} \cdot I^2}{\alpha_{on} \cdot P_{p2}} = \frac{1,0896 \cdot 10^{-5} \cdot 1600^2}{7,64 \cdot 0,03201} = 114,06 \text{ K}$$

Z vypočtených hodnot sestavíme náhradní  $\pi$ -článek výstupního praporce:



Obrázek 19 - II-článek výstupního praporce

#### 4.5.7. Uvážení volné části kontaktu uzemňovače jako chladiče

Náhradní chladičovost budeme uvažovat stejnou jako u praporce:

$$\alpha_{on} = \alpha_z + \alpha_k = 0,8 + 6,84 = 7,64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Vypočítáme plochu podle obrázku 18, vliv zaoblení budeme uvažovat snížením plochy o 5 %, malý ohyb zanedbáme. Plocha chlazení tedy bude spodní plocha, horní plocha, rovné boční plochy, zaoblená plocha zespod ohybu a dvě čtvrtkruhové plochy jako boky ohybu:

$$P_{CHu} \approx 0,95 \cdot \left[ 0,07 \cdot 0,06 + 0,01 \cdot (2 \cdot 0,07 + 0,06) + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 0,06 + \frac{1 \cdot \pi \cdot 0,01^2}{2} \right]$$

$$P_{CHu} \approx 6,9346 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Můžeme vypočítat tepelný odpor:

$$R_{tCHu} = \frac{1}{\alpha_{on} \cdot P_{CHu}} = \frac{1}{7,64 \cdot 6,9346 \cdot 10^{-3}} = 18,875 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Umístění chladiče do schématu určíme z obrázku 18. Bude to na spodním konci paralelního propojení praporce s kontaktem uzemňovače. Tuto vzdálenost jsme vypočítali v bodě 4.5.1. Je tedy třeba rozdělit podélný tepelný odpor praporce  $R_{Tl} = 1,154 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$  v poměru délek z bodu 4.5.1. Poměr bude brán směrem od pracovního kontaktu po přívodní kabely.

$$l_3 : (l_1 + l_2)$$

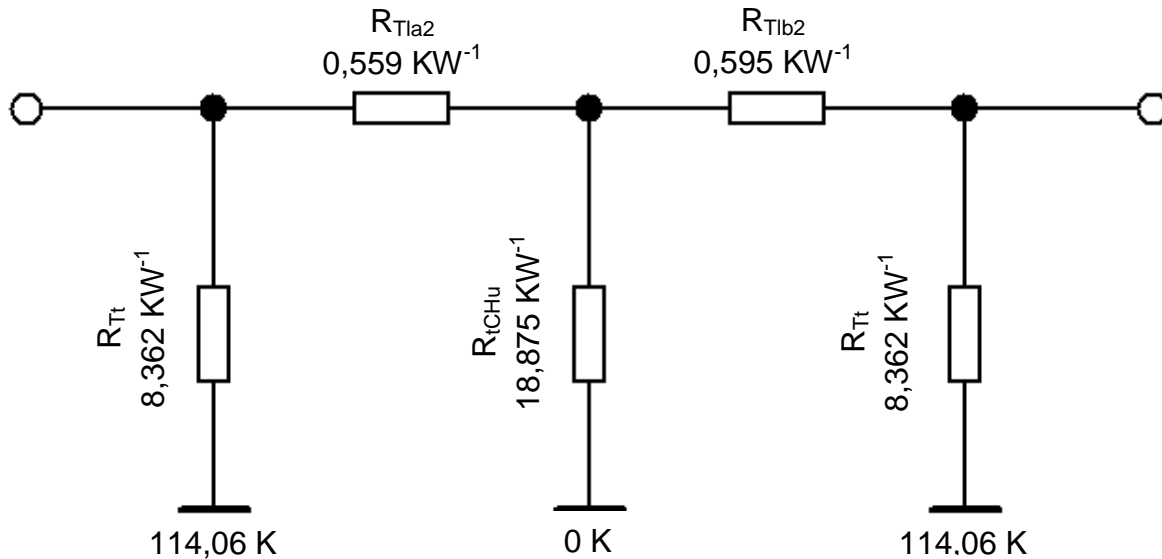
$$123,58 : (81,43 + 50)$$

$$123,58 : 131,43$$

$$R_{Tla2} = \frac{R_{Tl}}{123,58 + 131,43} \cdot 123,58 = 0,559 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{Tlb2} = \frac{R_{Tl}}{123,58 + 131,43} \cdot 131,43 = 0,595 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Do obrázku 19 dokreslíme chladič tvořený kontaktem uzemňovače:



Obrázek 20 - Náhradní schéma výstupního praporce s uvážením kontaktu uzemňovače

#### 4.5.8. Kompletní schéma výstupního praporce odpojovače

Do kompletního schématu výstupního praporce je třeba zakomponovat opět chlazení volnými konci praporce, které budou mít v náhradním schématu stejné hodnoty jako u vstupního praporce. Musíme si ovšem dát pozor kam je zařadit, protože náhradní schéma výstupního praporce je orientováno opačně než schéma vstupního praporce. Z obrázku 20, vpravo pokračujeme směrem ke kabelům připojení odpojovače a vlevo do pracovního kontaktního styku.

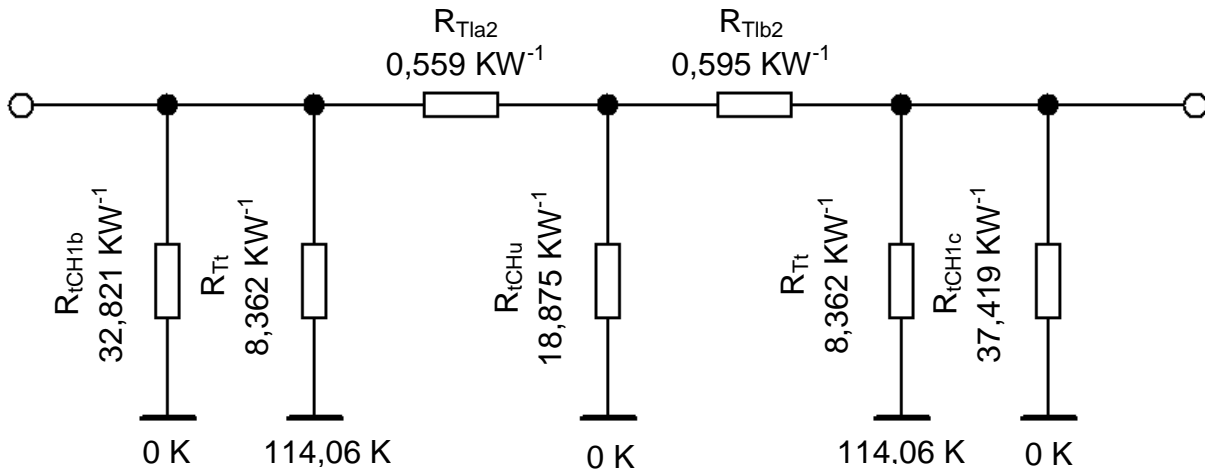
Chlazení volným koncem praporce na straně kabelů, viz 4.3.11. Chladič této hodnoty zařadíme doprava:

$$R_{tCH1b} = 37,419 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Chlazení volným koncem praporce na straně kontaktního nože, viz 4.3.12. Chladič této hodnoty zařadíme doleva:

$$R_{tCH1c} = 32,821 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Obrázek 20 upravíme do kompletní podoby přidáním chladících tyčí, viz výše:



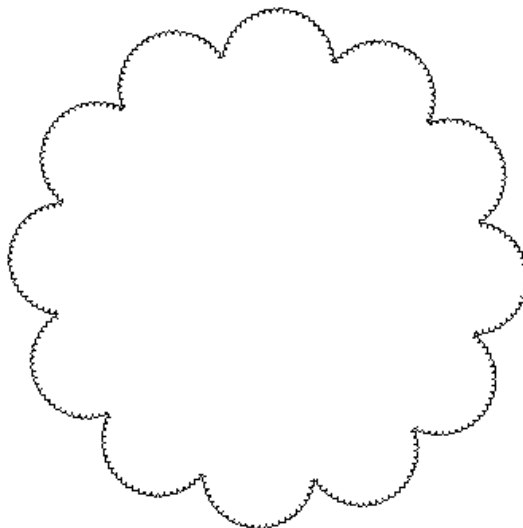
Obrázek 21 - Kompletní tepelné schéma výstupního praporce odpojovače

#### 4.6. Zakomponování přívodních kabelů do schématu

Byly použity tři kabely z mědi. Průřez jednoho kabelu je  $S_n = 500 \text{ mm}^2$ . Přívodní kabely budeme uvažovat jako tepelně dlouhé tyče. U tepelně dlouhé tyče se předpokládá, že na jejím konci je hodnota oteplení nenulová. Kabely budeme počítat do jednoho metru délky od přístroje, získáme tak hodnotu oteplení v této vzdálenosti, která je změřena v experimentu v kapitole 5.

##### 4.6.1. Určení chladícího povrchu kabelů

Jelikož jsou kabely tvořeny více vodiči, je velmi těžké určit jejich povrch, snažíme se mu alespoň přiblížit.



Obrázek 22 - Předpokládaná geometrie kabelu

Na obrázku 22 vidíme náhradní obvod jednoho kabelu složeného z polovin obvodů dvanácti menších kabelů, tyto kabely jsou tvořeny malými fiktivními drátky o průměru



$d_{dr} = 0,5$  mm. V zapojení máme tři kusy těchto kabelů. Vzhledem ke členitosti obvodu, nebudeme uvažovat spodní polovinu kabelu jako chladicí plochu, protože proudění i záření je zde velmi omezeno. Pokud by byly přívody přípojnice, spodní plochy by byly započítány.

Vypočítáme obvod jednoho drátku:

$$O_{dr} = \pi \cdot d_{dr} = \pi \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Polovina obvodu drátku je směrem dovnitř kabelu, jako chladicí obvod uvažujeme pouze polovinu obvodu drátku. Po vnějším obvodu jednoho svazku je 23 drátků. Vnější obvod kabelu je tvořen dvanácti polovinami svazků. Jako chladicí plochu uvažujeme pouze jednu polovinu obvodu. Tedy pro vnější obvod jednoho kabelu platí:

$$O_{k1} = \frac{1}{2} \cdot 12 \cdot 23 \cdot \frac{1}{2} \cdot O_{dr} = \frac{1}{2} \cdot 12 \cdot 23 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,57 \cdot 10^{-3} = 0,10833 \text{ m}$$

Máme tři kabely:

$$O_k = 3 \cdot O_{k1} = 3 \cdot 0,10833 = 0,325 \text{ m}$$

S délkou kabelu jeden metr, jak již bylo psáno výše, máme potřebné hodnoty k výpočtu plochy chlazení:

$$P_k = l_k \cdot O_k = 1 \cdot 0,325 = 0,325 \text{ m}^2$$

#### 4.6.2. Výpočet délky chladicího obvodu kabelů

Pro kabel protékající proudem obecně platí, že délka chladicího obvodu je rovna obvodu kabelu. Pro názornost si to zde odvodíme:

$$O_{vcu} = \frac{P_k}{l_k} = \frac{O_k \cdot l_k}{l_k} = O_k = 0,325 \text{ m}$$

#### 4.6.3. Určení náhradní chladivosti kabelů

Kabel je vyroben z mědi, předpokládáme oteplení  $\theta = 22$  K, určíme emisivitu [8; tabulka 2 – 38; str. 49]:

$$E_z \approx 0,15$$

Kabely se v části délky značně překrývají, budeme tedy uvažovat činitel stínění větří než u ostatních částí odpojovače.  $K_k = 0,7$ . Pro výpočet chladivosti zářením použijeme rovnici 8:

$$\alpha_z = K_k \cdot [0,9 + 0,002 \cdot \theta] = 0,7 \cdot [0,9 + 0,002 \cdot 22] = 0,661 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Určíme vzorec pro chladivost prouděním pro válec chlazený nahoru [8; tabulka 2 – 44; str. 52]:

$$\alpha_k = 3 + 0,03 \cdot \theta = 3 + 0,03 \cdot 22 = 3,66 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Celková náhradní chladivost je součtem chladivosti zářením a chladivosti prouděním:

$$\alpha_{on} = \alpha_z + \alpha_k = 0,661 + 3,66 = 4,321 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

#### 4.6.4. Hodnoty náhradního schématu kabelů

Nominální průřez kabelu je  $S_n = 500 \text{ mm}^2$ . Pro tři kabely bude tedy průřez:

$$S_{Cu} = 3 \cdot 500 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Je také důležité přepočítat rezistivitu mědi na předpokládané oteplení kabelů. Použijeme rovnici 6:

$$\rho_{cuk} = \rho_{cu20}(1 + \alpha \cdot \theta) = 0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,004 \cdot 22) = 1,8278 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$$

Vypočítáme hodnoty náhradního schématu kabelů [8; str. 115]:

$$\delta_{Cu} = \sqrt{\alpha_{on} \cdot O_{VCu} \cdot \lambda_{cu} \cdot S_{Cu}} = \sqrt{4,321 \cdot 0,325 \cdot 385 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} = 0,90055$$

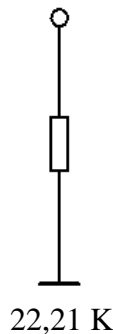
$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta_{Cu}} = \frac{1}{0,90055} = 1,1104 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\theta_{\infty} = \frac{\rho_{cuk} \cdot I^2}{\alpha_{on} \cdot O_{VCu} \cdot S_{Cu}} = \frac{1,8278 \cdot 10^{-8} \cdot 1600^2}{4,321 \cdot 0,325 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} = 22,21 \text{ K}$$

Pokud by nám vyšla odlišná teplota nežli zvolená, je nutné přepočítat rezistivitu a chladivost, čili celý výpočet kabelů opakovat!

#### 4.6.5. Náhradní teplené schéma kabelů

Kabel bude znázorněn jako dlouhá tyč [8; str. 116]:



Obrázek 23 - Náhradní schéma přívodních kabelů

## 4.7. Výpočet pracovního kontaktního styku

### 4.7.1. Výpočet činného odporu v pracovním styku

U počítaného odpojovače je přítlačná síla:

$$F_{pp} = 586 \text{ N}$$

Vypočítáme elektrický odpor, za  $n$  dosazujeme 0,7, což je hodnota pro přímkový styk [8; str. 115]:

$$R_{kp1} = k_{Cu} \cdot F^{-n} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot 586^{-0,7} = 9,23765 \cdot 10^{-6} \Omega$$

#### 4.7.2. Výpočet tepelného odporu pracovního styku

Určíme koeficient přestupu tepla mezerou v okolí kontaktních plošek [8; str. 61; tabulka 2 – 58]:

$$c = 0,8$$

Tepelný odpor jednoho kontaktního styku [8; str. 128]:

$$R_{Tkp1} = \frac{c \cdot R_{kp1}}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu}} = \frac{0,8 \cdot 9,23765 \cdot 10^{-6}}{385 \cdot 2,016 \cdot 10^{-8}} = 0,952 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

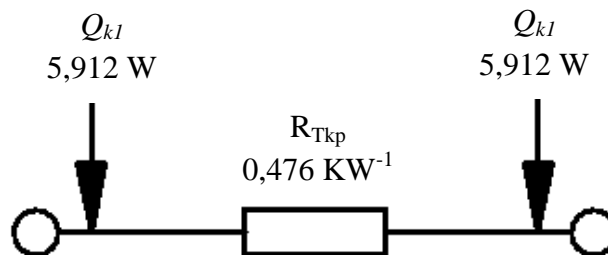
Tepelný odpor dvou styků paralelně:

$$R_{Tkp} = \frac{R_{Tkp1}}{2} = \frac{0,952}{2} = 0,476 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

#### 4.7.3. Výpočet tepelných ztrát v pracovním styku [8; str. 128]

$$Q_{k1} = R_{kp1} \cdot \left(\frac{I}{2}\right)^2 = 9,23765 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1600}{2}\right)^2 = 5,912 \text{ W}$$

#### 4.7.4. Náhradní schéma pracovního kontaktu

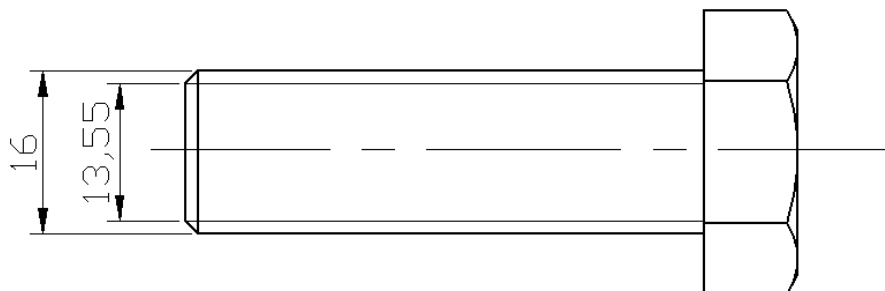


Obrázek 24 - Náhradní schéma pracovního kontaktu

### 4.8. Výpočet kontaktního styku praporců s kabely

#### 4.8.1. Výpočet styčného odporu styku praporců s kabely

Přívod je řešen třemi kabely, každý kabel je připevněn k praporci šroubem M16.



Obrázek 25 - Šroub M16

Při dovoleném namáhání  $\sigma_d = 30$  MPa vyvíjí jeden šroub o průměru jádra  $d_j = 13,55$  mm sílu [8; str. 127]:

$$F_{p10} = \frac{\pi \cdot d_j^2}{4} \cdot \sigma_d = \frac{\pi \cdot 0,01355^2}{4} \cdot 30 \cdot 10^6 = 4326 \text{ N}$$

Při provozu dochází k ohřívání a opětovnému chladnutí šroubů i praporce, předpokládáme snížení přítláčné síly na 50 % otláčením. Přítláčná síla potom bude:

$$F_{p1} = 0,5 \cdot F_{p10} = 0,5 \cdot 4326 = 2163 \text{ N}$$

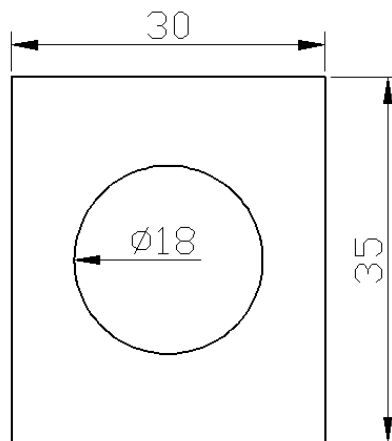
Vypočítáme odpor jednoho styku, pro plošný styk je  $n = 1$  [8; str. 127]

$$R_{k1} = k_{Cu} \cdot F_{p1}^{-n} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot 2163^{-1} = 3,6986 \cdot 10^{-7} \Omega$$

Máme zapojeny tři kabely paralelně, pro výsledný kontaktní odpor platí:

$$R_k = \frac{R_{k1}}{3} = \frac{3,6986 \cdot 10^{-7}}{3} = 1,2328 \cdot 10^{-7} \Omega$$

#### 4.8.2. Výpočet tepelného odporu styku praporce s přívodním kabelem



Obrázek 26 - Styčná plocha mezi praporcem a přívodním kabelem

Vypočítáme styčnou plochu mezi kabely a praporcem z obrázku 26. Nezapomeňme, že kabely jsou zde tři, čili tři styčné plochy z obrázku 26. Celková styčná plocha:

$$S_{st} = 3 \cdot \left( 0,03 \cdot 0,035 - \frac{\pi \cdot 0,018^2}{4} \right) = 2,3866 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Na základě vypočítaných parametrů styku odečteme koeficient přestupu tepla mezerou v okolí kontaktních plošek [8; str. 61; tabulka 2 – 58]:

$$c_1 = 0,5$$

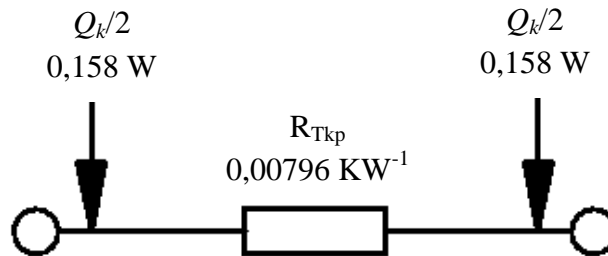
Vypočítáme tepelný odpor styku praporce a kabelů [8; str. 128]:

$$R_{Tk1} = \frac{c_1 \cdot R_k}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu}} = \frac{0,5 \cdot 1,2328 \cdot 10^{-7}}{385 \cdot 2,016 \cdot 10^{-8}} = 7,94 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

#### 4.8.3. Výpočet ztrát ve styku praporce a kabelů [8; str. 128]

$$Q_k = R_k \cdot I^2 = 1,2328 \cdot 10^{-7} \cdot 1600^2 = 0,316 \text{ W}$$

#### 4.8.4. Náhradní schéma styku praporce s kabely



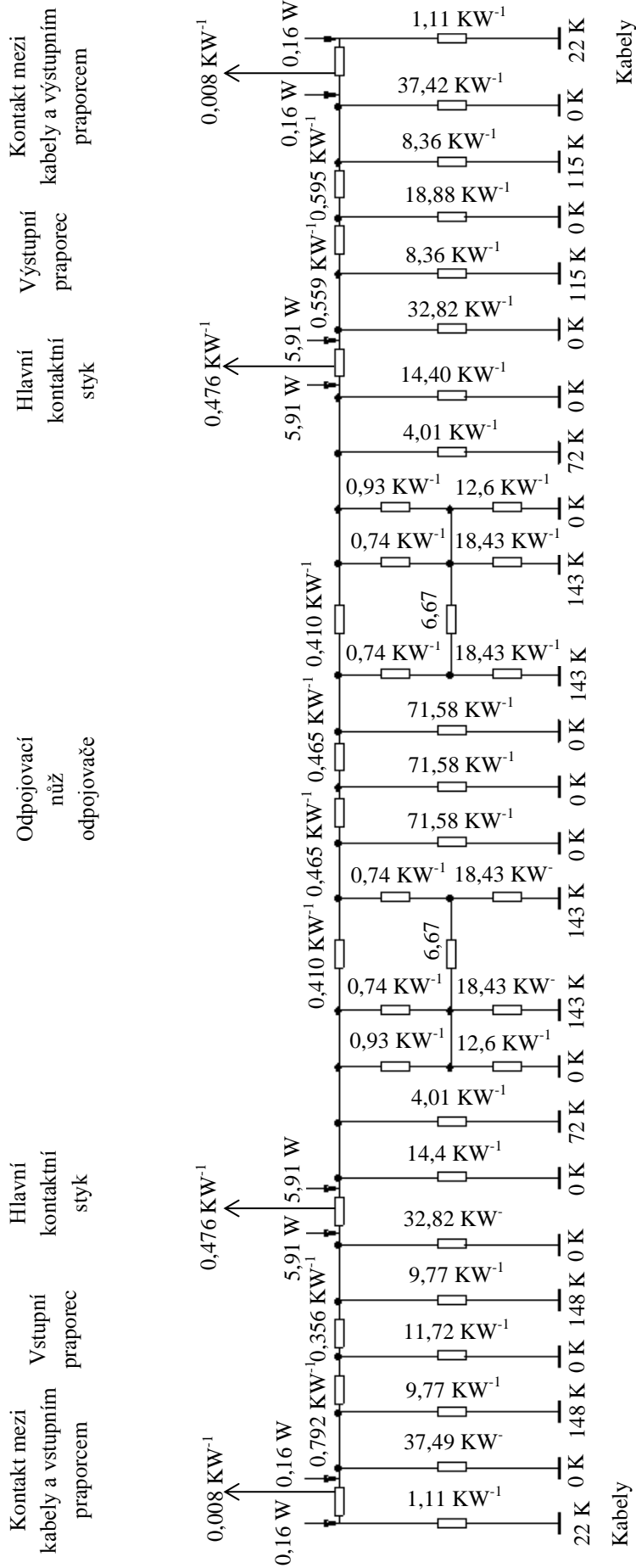
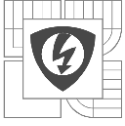
Obrázek 27 - Náhradní schéma styku praporce s kabely

### 4.9. Kompletace celého tepelného schématu

Celé schéma vytvoříme propojením všech dílčích náhradních schémat v pořadí:

1. Kabely
2. Styk mezi kabely a praporcem
3. Vstupní praporec
4. Pracovní kontakt
5. Odpojovací nůž
6. Pracovní kontakt
7. Výstupní praporec s kontaktem uzemňovače
8. Kontaktní styk mezi kabely a praporcem
9. Kabely

Celé schéma můžete pozorovat na obrázku 28.



Obrázek 28 - Kompletní tepelné schéma odpojovače

#### 4.10. Metoda výpočtu a výpočet ustáleného oteplení odpojovače

Při výpočtu ustáleného oteplení využijeme podobnosti tepelných a elektrotechnických schémat. Tepelné odpory nahradíme elektrickými. Tepelné potenciály nahradíme napěťovými potenciály. Zdroje tepleného toku budou nahrazeny proudovými zdroji. Jako výstup dostaneme hodnoty napěťových potenciálů ve zkoumaných bodech. Zjištěná napětí jsou úměrná hodnotám oteplení přístroje v daných bodech. Kompletní elektrické schéma můžeme pozorovat v obrázku 29. Pro výpočet i nákres schématu byl použit program TINA od výrobce DesignSoft, vydán v roce 2011 společností Texas Instruments. Okolní teplota byla během výpočtu předpokládána  $\vartheta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tabulka 2 - Tabulka vypočítaných hodnot oteplení v bodech dle obrázku 28

Označení a popis bodu	$U$ [V] Hodnota napětí v programu	$\Theta$ [K] Hodnota oteplení
1 – přívodní kabel (1 m od přístroje)	22,21	22,21
2 - přechod kabel-vstupní praporec (za kontaktním stykem)	46,69	46,69
3 – přechod vstupní praporec-kontaktní nůž (za pracovním kontaktním stykem)	64,80	64,80
4 – střed kontaktního nože (v místě prostředního distančního válečku)	65,15	65,15
5 - přechod kontaktní nůž-výstupní praporec (před pracovním kontaktním stykem)	64,18	64,18
6 - přechod výstupní praporec-odchozí kabel (před kontaktním stykem)	45,00	45,00
7 - odchozí kabel (1 m od přístroje)	22,21	22,21



## 5 MĚŘENÍ OTEPLENÍ ODPOJOVAČE

### 5.1. Oteplovací zkouška dle ČSN EN 62271-1

#### 5.1.1. Stav zkoušeného zařízení

Oteplovací zkouška je prováděna na novém zařízení, pokud není uvedeno jinak v nadřazeném dokumentu.

Měřené zařízení musí být kompletní, tj. včetně všech krytů a provozních součástí. [10]

#### 5.1.2. Umístění zařízení

Zkouška probíhá v prostředí, kde nedochází k proudění vzduchu více než 0,5 m/s, kromě proudění teplého vzduchu z měřeného zařízení.

Při zkoušce zařízení, které je určeno pro více než jednu instalační polohu, je zkouška prováděna v poloze nejnepříznivější pro oteplení. [10]

#### 5.1.3. Parametry zkoušky

Zkouška se provádí trojpólově, nebo jednopólově. Pro spínací přístroje, které nejsou v kovovém krytu, což je náš případ, platí, že zkoušku lze provádět jednopólově za předpokladu zanedbatelného vlivu ostatních pólů na oteplení měřeného pólu.

Zařízení je zkoušeno jmenovitým proudem prakticky sinusového průběhu.

Střídavé přístroje musí být testovány pracovními frekvencemi s tolerancí horní +2 % a dolní tolerancí -5 %. Odpojovač 2QAK je určen pro kmitočet 50 Hz, tudíž si můžeme dovolit frekvenci napájecího proudu 47,5 Hz - 51 Hz.

Měření se provádí až do dosažení ustálené teploty, za což se považuje nárůst oteplení maximálně o 1 K za hodinu. Čas ustálení obvykle trvá dobu rovnající se pětinasobku časové konstanty  $\tau$  přístroje. Časová konstanta je čas, za který by zařízení dosáhlo ustáleného oteplení bez jakéhokoli odvodu tepla.

Měření se provádí teploměry, nebo termoelektrickými články v přístupných místech dosahujících největších teplot. [10]

#### 5.1.4. Podmínky pro měřicí články popřípadě teploměry

a) Konce článků, teploměrů musí být vhodně chráněny proti ochlazení zvenčí. Chránění proti tomuto jevu však nesmí ovlivnit chladicí plochu měřeného zařízení.

b) Musí být zajištěna dobrá tepelná vodivost mezi měřeným místem a měřicím termočlánkem.

c) U zařízení, kde vzniká střídavé magnetické pole, je doporučeno používat lihové teploměry namísto rtuťových. Jelikož rtuť je kov a střídavé magnetické pole ovlivňuje její chování. [10]

### 5.1.5. Teplota okolního vzduchu

Teplota okolního vzduchu je průměrná teplota vzduchu obklopující měřené zařízení. Teploměr měřící tuto teplotu musí být chráněn proti vlivům prouděním a sáláním.

Abychom nemuseli provádět žádné korekce, je důležité, aby okolní teplota byla v rozmezí +10 °C až +40 °C. [10]

### 5.1.6. Vyhodnocování oteplovací zkoušky

Zařízení musí splňovat hodnoty oteplení, popřípadě maximálních dovolených teplot uvedených v tabulce 3. Pokud přístroj podmínku nesplňuje, nevyhověl při oteplovací zkoušce. [10]

Tabulka 3 - Nejvyšší dovolené hodnoty teploty a oteplení částí elektrických přístrojů <sup>[10]</sup>

Součást	Materiál	Pracovní médium	Nejvyšší hodnota	
			Teplota	Oteplení
			[°C]	[K]
kontakty	slitiny mědi bez pokovení	vzduch	75	35
		fluorid sírový (SF <sub>6</sub> )	105	65
		olej	80	40
	slitiny mědi postříbřené	vzduch	105	65
		fluorid sírový (SF <sub>6</sub> )	105	65
		olej	90	50
šroubová nebo ekvivalentní spojení	slitiny mědi bez pokovení	vzduch	90	50
		fluorid sírový (SF <sub>6</sub> )	115	75
		olej	100	60
	slitiny mědi postříbřené	vzduch	115	75
		fluorid sírový (SF <sub>6</sub> )	115	75
		olej	100	60

## 5.2. Vlastní měření ustáleného oteplení odpojovače 2QAKZ

### 5.2.1. Úvod do měření

V následující kapitole bude popsáno a zdokumentováno vlastní měření odpojovače 2QAKZ 25.1600.20. Měření proběhlo ve spolupráci s firmou IVEP, a.s. v jejich zkušebně na adrese: Vídeňská 137/117a, 619 00 Brno-Dolní Heršpice pod vedením vedoucího zkušebny ing. Petra Kaluse. Měření bylo provedeno dle ČSN EN 62271-1 viz kapitola 5.1. Jako měřící čidla byly použity termočlánky a sběrným datovým zařízením byl počítač vybaven analogově digitálním převodníkem ADVANTECH ADAM 4520 a softwarem firmy IVEP, a.s. Termočlánky byly od PC galvanicky odděleny převodníky RAWET PXL212.

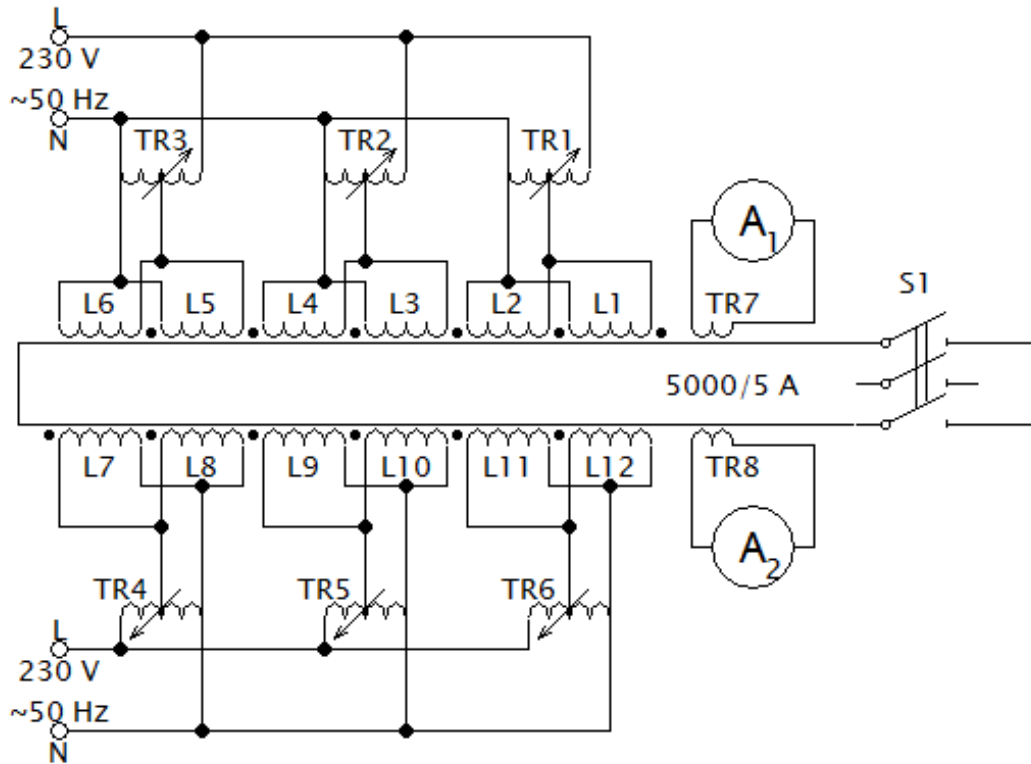


### 5.2.2. Použité měřicí přístroje a pomůcky

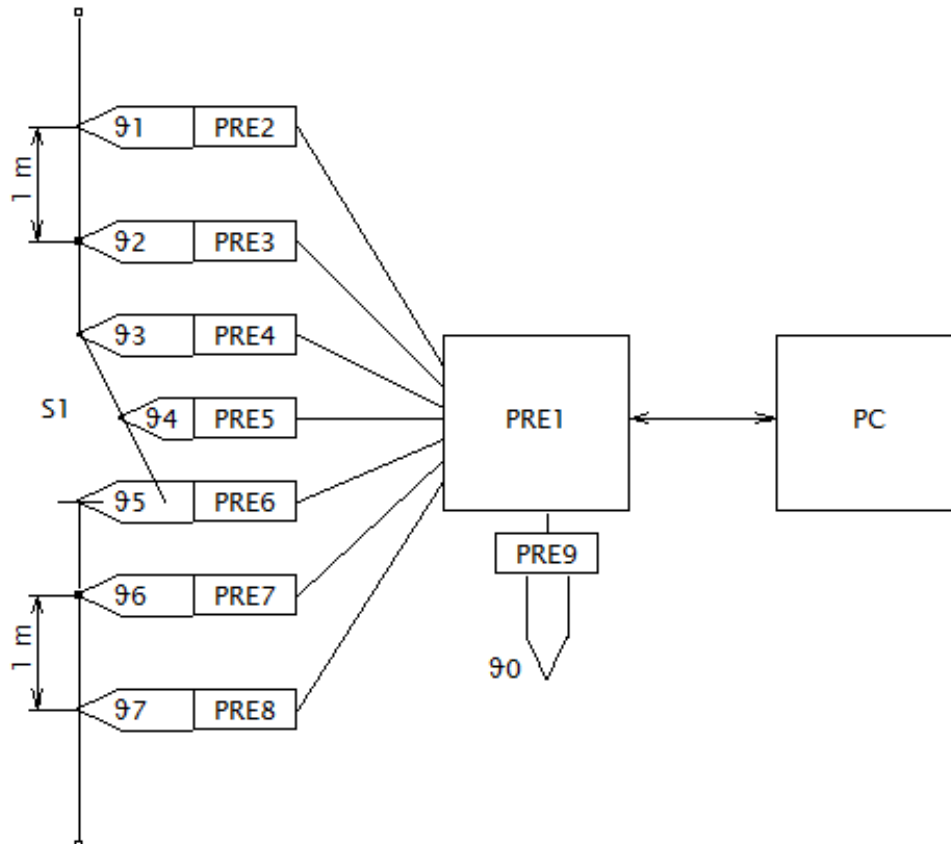
Tabulka 4 - Soupis použitých měřicích přístrojů a pomůcek

Označení	Přístroj	Výrobce	Typ	Třída přesnosti	Výrobní číslo	Poznámka
S1	Odpojovač	IVEP	2QAKZ 25.1600.20		P8-134	$U_n = 25 \text{ kV}$ $U_i = 125/145 \text{ kV}$ $I_n = 1600 \text{ A}$ $I_k = 20 \text{ kA}$
TR1	Regulovatelný transformátor	KŘÍŽÍK PRAHA	RA 20		4521	$U_2 = 0-250 \text{ V}$ $S = 5 \text{ kVA}$
TR2	Regulovatelný transformátor	ZPA Prešov	RA 20		61705	$U_2 = 0-250 \text{ V}$ $S = 5 \text{ kVA}$
TR3	Regulovatelný transformátor	KŘÍŽÍK PRAHA	RA 20		1811	$U_2 = 0-250 \text{ V}$ $S = 5 \text{ kVA}$
TR4	Regulovatelný transformátor	ZPA Prešov	RA 20		01243	$U_2 = 0-250 \text{ V}$ $S = 5 \text{ kVA}$
TR5	Regulovatelný transformátor	ZPA Prešov	RA 20		01259	$U_2 = 0-250 \text{ V}$ $S = 5 \text{ kVA}$
TR6	Regulovatelný transformátor	ZPA Prešov	RA 20		033911	$U_2 = 0-250 \text{ V}$ $S = 5 \text{ kVA}$
L1-12	Proudová cívka	EJF Škoda	1972			$U = 220 \text{ V}$ $S = 1000 \text{ VA}$
PC	Stolní počítač					+software
PRE1	Externí převodník	ADVANTECH	ADAM-4520			Převod RS485 na RS232 Data format 10 bit Bus speed 9600 bps
A1	Ampérmetr	Metra Blansko		1,5	55606	
A2	Ampérmetr	Metra Blansko		1,5	120114	
PRE2	Převodník U/I	Ravet	PXL212		2907033	RS485
PRE3	Převodník U/I	Ravet	PXL212		2907034	RS485
PRE4	Převodník U/I	Ravet	PXL212		2907035	RS485
PRE5	Převodník U/I	Ravet	PXL212		2907036	RS485
PRE6	Převodník U/I	Ravet	PXL212		2907037	RS485
PRE7	Převodník U/I	Ravet	PXL212		2907038	RS485
PRE8	Převodník U/I	Ravet	PXL212		2907039	RS485
PRE9	Převodník U/I	Ravet	PXL212		2907040	RS485
TR7	Měřicí transformátor	EJF	BN 00-50	0,5	1008250	$p = 5000/5 \text{ A}$
TR8	Měřicí transformátor	EJF	BN 00-50	0,5	1008252	$p = 5000/5 \text{ A}$
$\vartheta_0 - \vartheta_7$	termočlánek	Ivep				Dvojkov
	9 x Kabel					$l = 3 \text{ m}$ $S = 500 \text{ mm}^2$
	Termokamera	Fluke	TI20		6549	do 600 °C

### 5.2.3. Schéma zapojení



Obrázek 30 - Schéma silového obvodu měření oteplení odpojovače



Obrázek 31 - Principiální schéma snímání měřených hodnot do PC

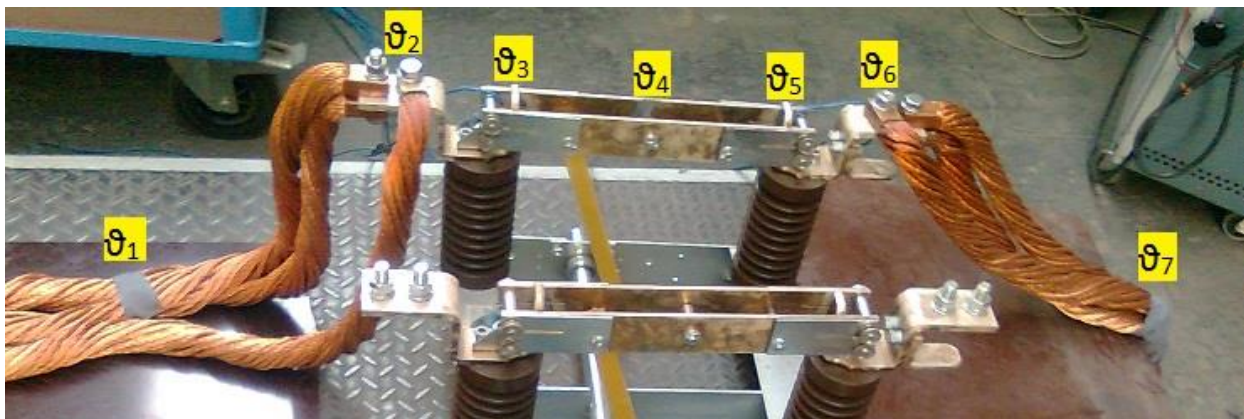
#### 5.2.4. Postup měření

- Zapojili jsme odpojovač do elektrického obvodu dle obrázku 30. Jako přívody mezi napájecí částí a odpojovačem byly použity kabely o průřezu  $3 \times 500 \text{ mm}^2$  a délce 3 m.
- Zapojily jsme měřící aparaturu dle obrázku 31.
- Byl zapnut přívod elektrické energie a autotransformátory nastaveny tak, aby výchylka ampérmetrů odpovídala proudu 1600 A hlavním obvodem.
- V počítači byl zapnut software pro měření oteplení a byly zapnuty všechny pomocné zdroje převodníků.
- Proběhlo vlastní měření teploty v čase, naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 6.
- Z naměřených hodnot byly sestaveny grafické závislosti.
- Vyhodnocení.

#### 5.2.5. Tabulky naměřených a vypočítaných hodnot

Tabulka 5 - Rozmístění termočlánků

$\vartheta_0$	Teplota okolí
$\vartheta_1$	přívodní kabel (1 m od přístroje)
$\vartheta_2$	přechod kabel-vstupní praporec (za kontaktním stykem)
$\vartheta_3$	přechod vstupní praporec-kontaktní nůž (za pracovním kontaktním stykem)
$\vartheta_4$	střed kontaktního nože (v místě prostředního distančního válečku)
$\vartheta_5$	přechod kontaktní nůž-výstupní praporec (před pracovním kontaktním stykem)
$\vartheta_6$	přechod výstupní praporec-odchozí kabel (před kontaktním stykem)
$\vartheta_7$	odchozí kabel (1 m od přístroje)



Obrázek 32 - Reálné zobrazení rozložení termočlánků

Tabulka 6 - Měření teplot odpojovače 2QAKZ 25.1600.20

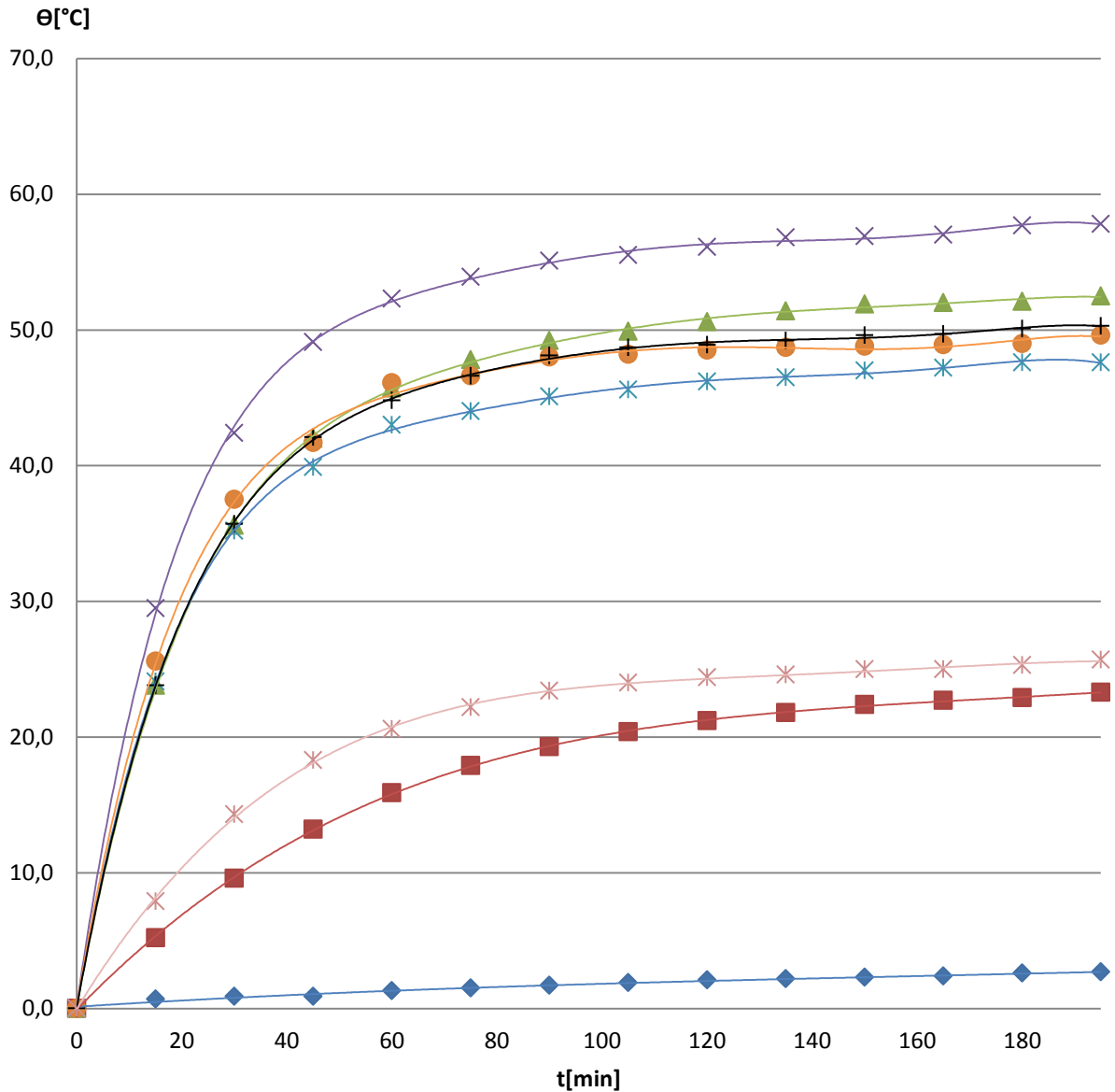
$I$	$t_0$	$t$	$\vartheta_0$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_4$	$\vartheta_5$	$\vartheta_6$	$\vartheta_7$
[A]	[-]	[min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1600	8:28	0	19,3	20,0	20,6	20,4	20,5	19,9	21,1	19,8
1600	8:43	15	20,0	25,2	44,4	49,9	44,6	45,5	44,9	27,7
1600	8:58	30	20,2	29,6	56,2	62,8	55,7	57,4	56,8	34,1
1600	9:13	45	20,2	33,2	62,6	69,5	60,4	61,6	63,2	38,1
1600	9:28	60	20,6	35,9	66,3	72,7	63,5	66,0	65,9	40,4
1600	9:43	75	20,8	37,9	68,4	74,3	64,5	66,5	67,7	42,0
1600	9:58	90	21,0	39,3	69,8	75,5	65,6	67,9	69,2	43,2
1600	10:13	105	21,2	40,4	70,5	75,9	66,1	68,1	69,8	43,8
1600	10:28	120	21,4	41,2	71,2	76,5	66,7	68,4	70,0	44,2
1600	10:43	135	21,5	41,8	72,0	77,2	67,0	68,6	70,3	44,4
1600	10:58	150	21,6	42,4	72,5	77,3	67,5	68,7	70,7	44,8
1600	11:13	165	21,7	42,7	72,6	77,4	67,7	68,8	70,8	44,8
1600	11:28	180	21,9	42,9	72,7	78,1	68,1	68,9	71,2	45,1
1600	11:43	195	22,0	43,3	73,1	78,2	68,1	69,5	71,4	45,5

Tabulka 7 - Výpočet oteplení odpojovače 2QAKZ 25.1600.20

$I$	$t_0$	$t$	$\theta_0$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$
[A]	[-]	[min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1600	8:28	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1600	8:43	15	0,7	5,2	23,8	29,5	24,1	25,6	23,8	7,9
1600	8:58	30	0,9	9,6	35,6	42,4	35,2	37,5	35,7	14,3
1600	9:13	45	0,9	13,2	42,0	49,1	39,9	41,7	42,1	18,3
1600	9:28	60	1,3	15,9	45,7	52,3	43,0	46,1	44,8	20,6
1600	9:43	75	1,5	17,9	47,8	53,9	44,0	46,6	46,6	22,2
1600	9:58	90	1,7	19,3	49,2	55,1	45,1	48,0	48,1	23,4
1600	10:13	105	1,9	20,4	49,9	55,5	45,6	48,2	48,7	24,0
1600	10:28	120	2,1	21,2	50,6	56,1	46,2	48,5	48,9	24,4
1600	10:43	135	2,2	21,8	51,4	56,8	46,5	48,7	49,2	24,6
1600	10:58	150	2,3	22,4	51,9	56,9	47,0	48,8	49,6	25,0
1600	11:13	165	2,4	22,7	52,0	57,0	47,2	48,9	49,7	25,0
1600	11:28	180	2,6	22,9	52,1	57,7	47,6	49,0	50,1	25,3
1600	11:43	195	2,7	23,3	52,5	57,8	47,6	49,6	50,3	25,7

### 5.2.6. Průběhy oteplení

#### Průběhy oteplení částí odpojovače s přívodními kabely 3x 500 mm<sup>2</sup>



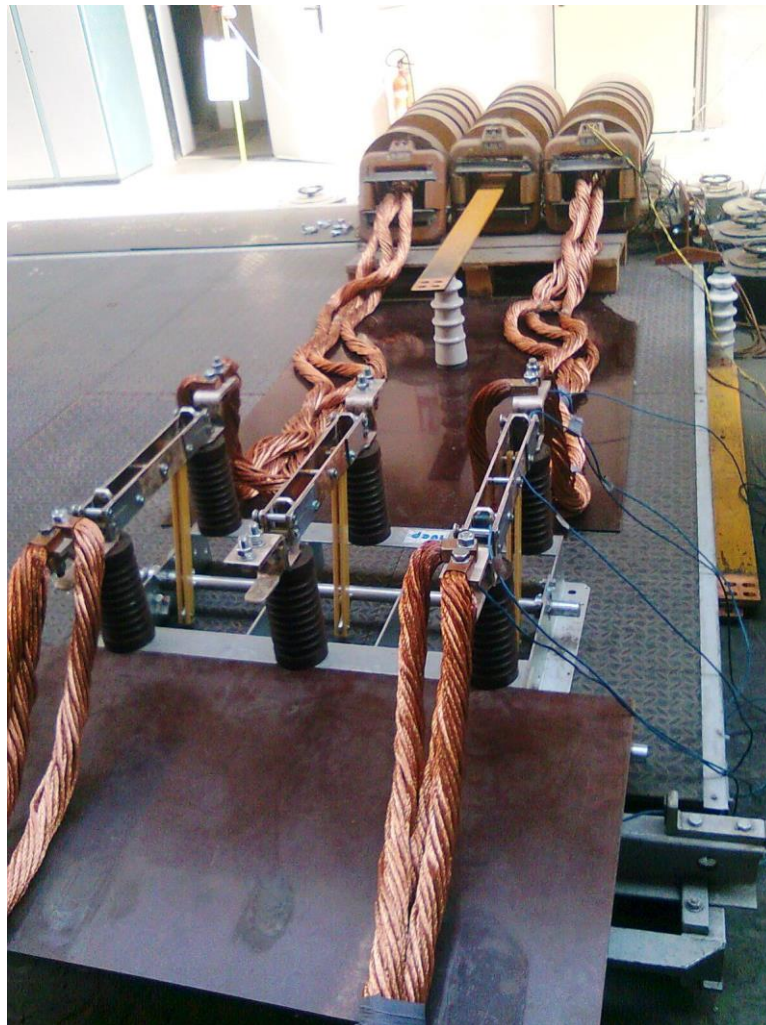
- ◆ Průběh oteplení okolí
- Průběh oteplení vstupního kabelu 1m od odpojovače
- ▲ Průběh oteplení přechodu vstupní kabel - vstupní praporec
- × Průběh oteplení pevného kontaktu odpojovače
- ✱ Průběh oteplení nože odpojovače
- Průběh oteplení pohyblivého kontaktu odpojovače
- + Průběh oteplení přechodu výstupní praporec - výstupní kabel
- ✱ Průběh oteplení výstupního kabelu 1m od odpojovače

Obrázek 33 - Průběhy oteplení částí odpojovače 2QAKZ 25.1600.20

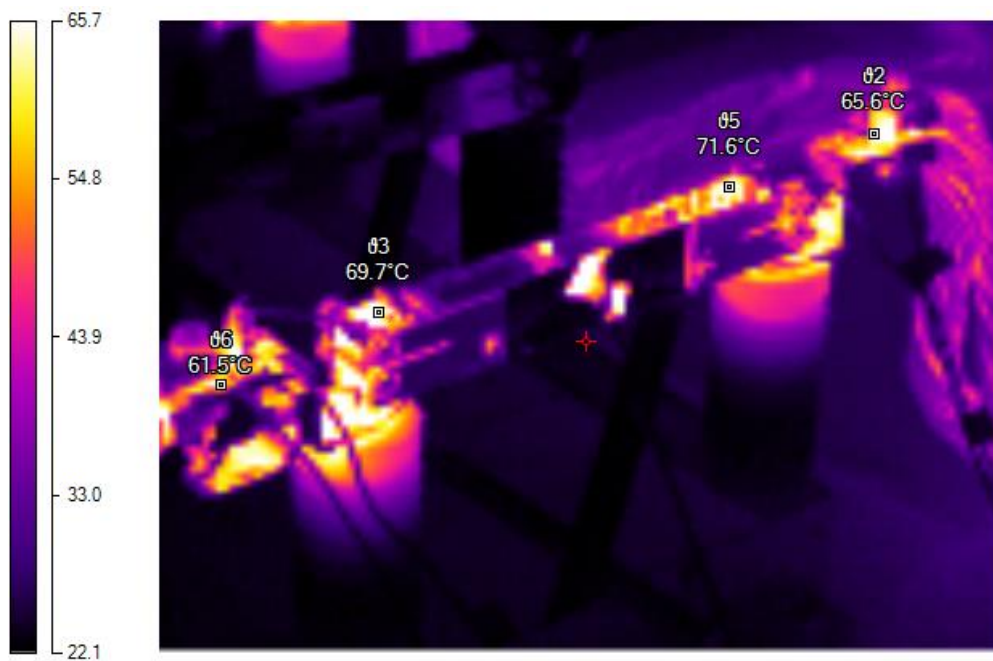
### 5.3. Zhodnocení měření

Jednotlivé teploty naměřené během zkoušky jsou zaneseny v tabulce 6. Tabulka 7 dále zobrazuje vypočítané hodnoty oteplení jednotlivých částí odpojovače dle obrázku 32. Průběhy oteplení jednotlivých částí najdeme v obrázku 33. Odpojovač 2QAKZ 25.1600.20 vyhověl normě ČSN EN 62271-1. Maximální hodnoty oteplení 57,8 K dosáhl pevný kontakt odpojovače. Norma udává maximální dovolené oteplení 65 K, viz tabulka 3.

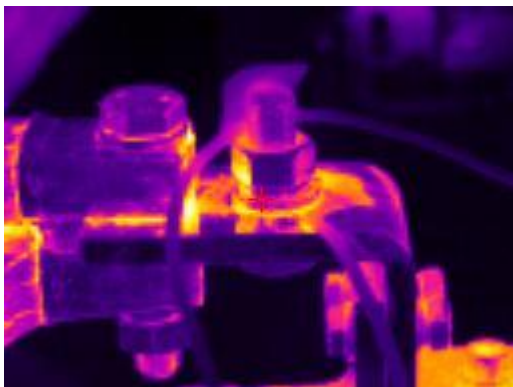
### 5.4. Vizuální materiály



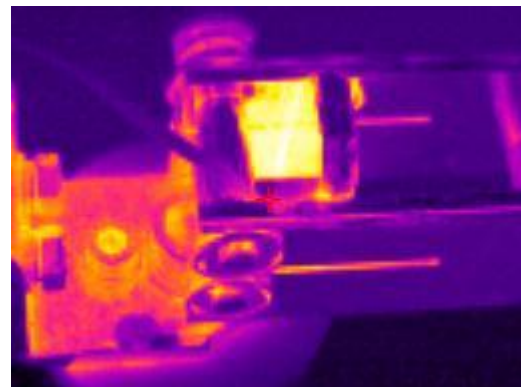
Obrázek 34 - Měřicí pracoviště



Obrázek 35 - Záběr termokamerou během měření na odpojovač jako celek



Obrázek 36 - Termo snímek přechodu výstupní praporec – výstupní kabel



Obrázek 37 - Termo snímek pohyblivého kontaktu odpojovače



Obrázek 38 - Termo snímek pevného kontaktu odpojovače



Obrázek 39 - Termo snímek přechodu vstupní praporec – vstupní kabel

## 6 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ S VÝPOČTEM

### 6.1 Výčet výsledků měření a výpočtu oteplení

Tabulka 8 - Výčet výsledků měření a výpočtu oteplení z kapitoly 4.10 a 5.2.5

Označení a popis bodu	$\Theta_v$ [K] Vypočítaná hodnota oteplení	$\Theta_m$ [K] Změřená hodnota oteplení
1 – přívodní kabel (1 m od přístroje)	22,21	23,30
2 - přechod kabel-vstupní praporec (za kontaktním stykem)	46,69	52,50
3 – přechod vstupní praporec-kontaktní nůž (za pracovním kontaktním stykem)	64,80	57,80
4 – střed kontaktního nože (v místě prostředního distančního válečku)	65,15	47,60
5 - přechod kontaktní nůž-výstupní praporec (před pracovním kontaktním stykem)	64,18	49,60
6 - přechod výstupní praporec-odchozí kabel (před kontaktním stykem)	45,00	50,30
7 - odchozí kabel (1 m od přístroje)	22,21	25,70

### 6.2 Porovnání výsledků

Při výpočtu bylo použito mnoho zjednodušení. Při většině zjednodušení, byly hodnoty voleny spíše k vyšší možné hranici volby, z důvodu rezervy u oteplení reálného přístroje. Na základě této volby by měly být vypočítané hodnoty vyšší než hodnoty měřené. Tomuto předpokladu odpovídají hodnoty ve středu proudovodné dráhy. Nejdůležitějšími hodnotami z hlediska ustáleného oteplení elektrickým proudem pro návrh přístroje jsou hodnoty oteplení v hlavních kontaktních stycích, které vyšly při výpočtu vyšší než při měření, což je správně. Jak při výpočtu, tak při měření vyhovují tyto hodnoty normě ČSN EN 62271-1. Z hlediska výpočtu se normě ČSN EN 62271-1 vymyká pouze hodnota oteplení ve středu kontaktního nože a to o 0,15 K, viz tabulka Tabulka 3. Jde zde zřejmě o chybu výpočtu magnetického obvodu ocelových příložek, vypočítat analogicky tento obvod je však velmi obtížné a přesný výpočet by měl obsah zhruba jedné takovéto práce. Bylo by tedy vhodné obvod nasimulovat v některém ze simulačních počítačových programů. Teoretické výpočty a simulace jsou nutné pro návrh přístroje, nicméně přesné provozní hodnoty oteplení a ostatních parametrů přináší až měření na zkušebně. Změřené hodnoty adekvátní měřicí metodou mají přednost před vypočítanými hodnotami.



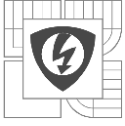
## 7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést výpočet a měření elektrického přístroje s názvem odpojovač. První tři kapitoly obsahují teoretický úvod týkající se problematiky oteplení elektrického přístroje.

Ve čtvrté kapitole byl proveden výpočet kompletního náhradního schématu odpojovače 2QAKZ 25.1600.20., výsledek viz obrázek 28. Dle podobnosti elektrických a tepelných obvodů byl tepelný obvod převeden na ekvivalentní elektrický obvod, viz obrázek 29. Pomocí programu TINA, od vývojářů DesignSoft, byla vypočítána ustálená oteplení v bodech potřebných pro porovnání s experimentem.

Kapitola 5 pojednává o oteplovací zkoušce stejného odpojovače, jehož výpočet byl proveden v kapitole 4. Odpojovač 2QAKZ 25.1600.20. vyhověl normě ČSN EN 62271-1.

Šestá kapitola obsahuje porovnání vypočtených a naměřených hodnot. Mezi hodnotami je jistá diference, kterou jsme předpokládali. Výpočtem nelze dosáhnout naměřených hodnot, pouze se jim přiblížit. Při výpočtu byly voleny v místech s možností volby méně příznivé hodnoty pro ustálené oteplení, tudíž jsou vypočítané hodnoty oteplení vyšší. Upřesnění výpočtových hodnot oteplení získaných pomocí tepelné sítě v této práci by bylo možno dosáhnout v další práci, a to pomocí počítačové simulace např. Ansys. Proto je nutné závěrem podotknout, že výpočet je při vývoji přístroje nezbytný, ale přesné provozní parametry jsou zjištěny až experimentální zkouškou.



---

## LITERATURA

1. BÁRTA, Karel a Zdeněk VOSTRACKÝ. *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*. Vydání první. Praha: SNTL, 1983, s. 134.
2. Tamtéž, s. 134-135.
3. Tamtéž, s. 139-140.
4. Tamtéž, s. 136-149.
5. HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje I*. 3. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1982, s. 129-130.
6. BÁRTA, Karel a Zdeněk VOSTRACKÝ. *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*. Vydání první. Praha: SNTL, 1983, s. 189-191.
7. Tamtéž, s. 26-27.
8. HAVELKA, Otto, Zdeněk VÁVRA a Dalibor SVOBODA. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1985.
9. CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice*. Praha: SNTL, 1958.
10. ČSN EN 62271-1. *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení: Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.