

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh proudové dráhy odpojovače vvn s ohledem na  
ampacitu**

**autor:**

**Bc. Karolína Duchanová**

**2013**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karolína DUCHANOVÁ**  
Osobní číslo: **E11N0112P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Návrh proudové dráhy odpojovače vvn s ohledem na ampacitu**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

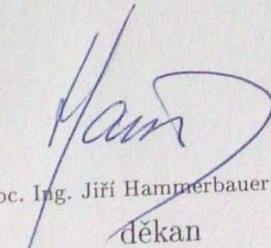
1. Zpracujte stav techniky v ČR a ve světě s ohledem na teoretické a provozní podmínky.
2. Vypracujte teoretické vztahy pro výpočet trvalého proudu vodiče v závislosti na okolním prostředí, větru a teplotě.
3. Zpracujte závislosti dovoleného proudu ve vodiči v závislosti na počátečním proudu pro odpojovač 123 kV 1600 A, a 420 kV 3150 A.
4. Porovnejte výsledky výpočtů s experimentálními výsledky, navrhněte závěry pro provoz.
5. Navrhněte další zadání pro následující etapu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

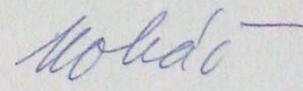
1. Vostracký, Z.: Spínací přístroje velmi vysokého napětí, SNTL, Praha, 1983
2. Havelka, O.: Elektrické přístroje, SNTL, Praha, 1985
3. Vostracký, Z.: Spínací přístroje velmi vysokého napětí, SNTL
4. Rusňák, Š.: Elektrické přístroje 1, ZČU, Plzeň, 2001
5. Vávra, Z., Vostracký, Z.: Stavba elektrických přístrojů II, VUT, Brno, 1985
6. Časopisy CGRE, IEEE, normy ČSN

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2012  
Termín odevzdání diplomové práce: 9. května 2013

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Tato práce se zabývá návrhem proudové dráhy odpojovače a možností jej přetěžovat pro proměnné podmínky okolí. Je zde stanoven součinitel přestupu tepla v závislosti na rychlosti proudění vzduchu. Dále je součástí řešení oteplení odpojovače pomocí metody tepelné sítě. K modelování tepelné sítě je využit Simulink, nástavba programu MATLAB, konkrétně knihovna Simscape. Do modelu je zanesena i proměnlivost odvodu tepla při různých rychlostech proudění.

## **Klíčová slova**

Odpojovač, proudová kapacita, oteplení, přetěžování, dovolený proud

## **Abstract**

This thesis describes the design of the current path switches and options can overload for variable environmental conditions. There is a fixed heat transfer coefficient, depending on the speed of the airflow. Furthermore, part of the solution by the method of warming disconnecter heating network. The thermal network modeling is used Simulink, MATLAB extension, specifically Simscape library. The variability of heat dissipation at different velocities is entered into the model as well.

## **Key words**

Disconnecter, ampacity, heating, overloading, allowed current

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 9.5.2013

Bc. Karolína Duchanová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Zdeňkovi Vostrackému, DrSc., dr. h. c. a konzultantovi Ing. Jaroslavovi Šnajdrovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>ODPOJOVAČE</b> .....	<b>12</b>
2.1	ZÁKLADNÍ TYPY ODPOJOVAČŮ .....	14
2.2	CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY .....	15
<b>3</b>	<b>PROUDOVÁ ZATÍŽITELNOST</b> .....	<b>16</b>
3.1	PRACOVNÍ PODMÍNKY .....	17
3.2	ZÁVISLOST DOVOLENÉHO PROUDU VE VODIČI NA POČÁTEČNÍM PROUDU .....	17
<b>4</b>	<b>SDÍLENÍ TEPLA</b> .....	<b>23</b>
4.1	OTEPLOVÁNÍ PROUDOVÉ DRÁHY .....	25
4.2	OCHLAZOVÁNÍ POVRCHU PROUDOVÉ DRÁHY .....	26
4.2.1	<i>Sálání</i> .....	27
4.2.2	<i>Proudění a teorie podobnosti</i> .....	29
<b>5</b>	<b>NÁVRH PROUDOVÉ DRÁHY ODPOJOVAČE</b> .....	<b>32</b>
5.1	IZOLAČNÍ VZDÁLENOST V ODPOJOVACÍ DRÁZE.....	32
5.1.1	<i>Dočasné přepětí</i> .....	33
5.1.2	<i>Atmosférická přepětí</i> .....	33
5.2	RAMENA ODPOJOVAČE .....	34
5.3	KONTAKTNÍ HLAVICE .....	37
5.3.1	<i>Návrh kontaktních palců</i> .....	37
5.3.2	<i>Návrh kontaktní pružiny</i> .....	39
5.4	KONTROLA OTEPLENÍ .....	41
5.4.1	<i>Rameno odpojovače</i> .....	41
5.4.2	<i>Kontaktní palce</i> .....	43
5.4.3	<i>Shrnutí</i> .....	44
5.5	MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ RAMENE .....	45
<b>6</b>	<b>SIMULACE OTEPLOVÁNÍ PROUDOVÉ DRÁHY</b> .....	<b>48</b>
6.1	METODA TĚPELNÉ SÍTĚ .....	50
6.2	MĚŘENÍ TERMOVIZÍ .....	51
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>52</b>



<b>8</b>	<b>LITERATURA</b> .....	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>55</b>

**Seznam použitých symbolů a zkratk**

$a$	hloubka vniku [m]
$A$	povrch [m <sup>2</sup> ]
$b$	výška pružiny [m]
$c_v$	měrná tepelná kapacita vztažená na objem tělesa [J/m <sup>3</sup> K]
$d$	průměr trubkového vodiče [m]
$f$	frekvence [Hz]
$F_k$	přítláčná síla [N]
$g$	gravitační zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]
$h$	tloušťka pružiny [m]
$I$	intenzita slunečního záření [W/m <sup>2</sup> ]
$k_{pi}$	faktor zahrnující vliv povrchového jevu [-]
$l$	délka [m]
$m$	hmotnost [kg]
$M$	moment síly [Nm]
$n$	počet kontaktních palců [-]
$p$	tlak [Pa]
$P$	elektrický výkon [W]
$r$	rameno síly [m]
$R$	elektrický odpor [Ω]
$S$	průřez [m <sup>2</sup> ]
$T$	termodynamická teplota [K]
$V$	objem [m <sup>3</sup> ]
$w$	rychlost proudění tekutiny [m/s]
$W_o$	průřezový modul v ohybu [m <sup>3</sup> ]
$x$	šířka kontaktního palce [m]
$y$	délka kontaktního palce [m]
$Y$	průhyb kontaktní pružiny [m]
$\alpha$	součinitel elektrického odporu [1/K]

$\alpha_0$	součinitel přestupu tepla [W/m <sup>2</sup> K]
$\beta$	součinitel objemové roztažnosti [K <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	konduktivita [S/m]
$\varepsilon$	emisivita [-]
$\vartheta$	teplota [°C]
$\Delta\vartheta$	oteplení [°C]
$\lambda$	tepelná vodivost [W/mK]
$\mu$	permeabilita [H/m]
$\nu$	kinematická viskozita [m <sup>2</sup> /s]
$\pi$	Ludolfovo číslo [-]
$\rho$	měrný elektrický odpor [Ωm]
$\sigma$	mechanické napětí [MPa]
$\tau$	tepelná časová konstanta [h]
$\omega$	úhlová rychlost
tzv.	tak zvaný
viz	
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
např.	například

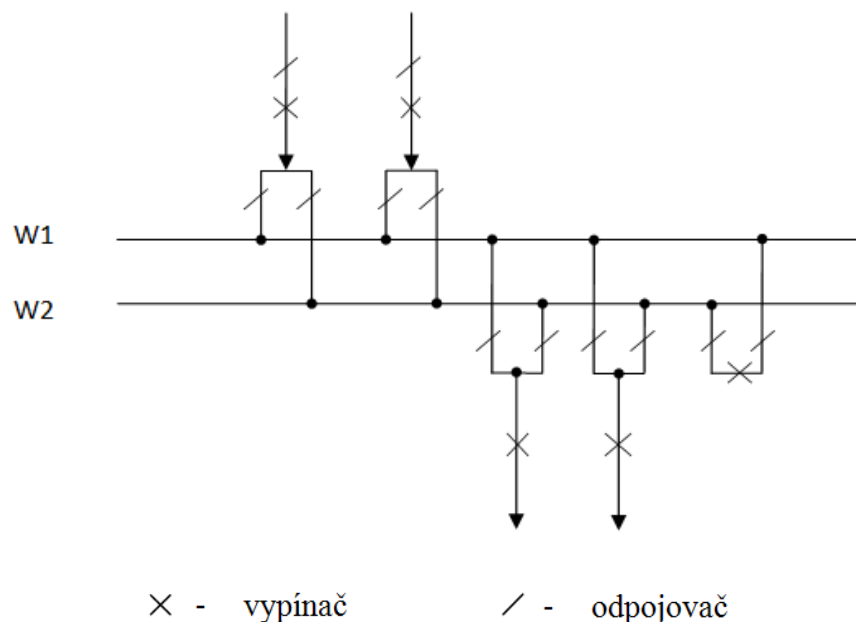
## 1 Úvod

V dnešní době dochází k přenášení velkých výkonů přenosovými linkami. Kvůli výkyvům výkonu je občas nutné přenášet i vyšší výkon, než na které je přenosová cesta dimenzována, toto krátkodobé přetížení musí snést také přístroje připojené do proudové cesty. Možnost přetěžování spínacích přístrojů je dána nejen konstrukčním řešením, tedy dimenzováním na větší výkony a větším oteplováním, ale také je provázána s podmínkami, za jakých k přetížení dojde. Například bude-li se pohybovat teplota okolí pod bodem mrazu, bude možno odpojovač zatěžovat větším proudem, aniž by došlo k překročení dovoleného oteplení stanoveného normou. Při vyšší teplotě okolí a zatěžování stejným proudem pak tentýž odpojovač můžeme zatěžovat po kratší dobu, projevuje se tady časová závislost oteplovací křivky. Uvažujeme-li také vliv ochlazování prouděním vzduchu, bude možné velikost přetížení navýšit. V rovnici pro přestup tepla do okolí závisí množství odebraného tepla z povrchu proudové dráhy na součiniteli přestupu tepla. Ten je podmíněn velikostí teplotního rozdílu mezi povrchem vodiče a teplotou okolí, ale také rychlostí proudění vzduchu. Čím rychleji vzduch proudí, tím více dochází k ochlazování povrchu vodiče a zpomaluje se teplotní nárůst. Na základě těchto poznatků je poté možné sestavit pro konkrétní odpojovač závislosti, které mohou pomoci při návrhu odpojovače do lokality, kde by k přetěžování docházelo. Teoretické oteplování je však nutné porovnat se skutečným oteplením reálného odpojovače, vystaveného určitým podmínkám, neboť ve výpočtu součinitele přestupu tepla figuruje spousta veličin, jejichž velikosti se se změnou vztažné teploty mění, a proto bude mezi skutečným a teoretickým stavem vždy rozdíl.

## 2 ODPOJOVAČE

Odpojovače patří mezi spínací přístroje, které nejsou vybaveny zhášecím ústrojím a spínají tedy elektrické obvody pouze bez zatížení elektrickým proudem. Slouží k viditelnému rozpojení obvodu, na němž probíhá revize, oprava či změna konfigurace a k ochraně osob pracujících na odpojeném úseku. Z tohoto důvodu se nesmí přenést napětí z živé části obvodu do odpojeného úseku. Proto se odpojovače navrhují tak, aby k přeskočení došlo proti zemi, nikoliv v odpojovací dráze. Během sepnutého stavu musí být odpojovač schopen přenášet nejen jmenovité hodnoty proudu, ale také po určitou dobu přenášet proudy vyšší, než jmenovité, např. zkratové proudy, aniž by došlo k nadměrnému oteplení proudové dráhy.

Odpojovače se používají na hladinách zvn, vvn, vn a méně často na hladinách nn. Příklad toho, jak je odpojovač zařazen ve spínaném obvodu, je na (obr. 1). Je zde zařazen do série s vypínačem v odbočkách a v příčném spínači přípojnic [1].



**Obr. 1 – Příklad řazení odpojovače**

V elektrických rozvodnách jsou instalovány odpojovače přípojnicové a odpojovače vývodové, které jsou navíc vybaveny uzemňovacím nožem. Je-li odpojovač v sepnutém stavu, nesmí dojít k zapnutí uzemňovacího nože [1]. Jinými slovy, přípojnicové odpojovače nesmějí být spínány, pokud je zapnutý zemní nůž kteréhokoliv přípojnicového odpojovače nebo zemní odpojovač. Toto je jedna z hlavních blokovacích podmínek při spínání. Dále nesmí být spínán přípojnicový odpojovač, je-li

zapnutý vypínač v odbočce, nebo je-li zapnutý další z přípojnicových odpojovačů odbočky. [12]

Odpojovače lze dělit podle různých hledisek [12], například:

**A. Podle provedení:**

- Venkovní
- Vnitřní

**B. Podle počtu izolátorů:**

- S jedním izolátorem
- Se dvěma izolátory
- Se třemi izolátory

**C. Podle počtu pólů:**

- Jednypólové
- Dvojpolové
- Trojpolové

**D. Podle účelu:**

- Přípojnicové
- Vývodové
- K pomocné přípojnicí nebo přemostovací

**E. Podle roviny odpojovací dráhy:**

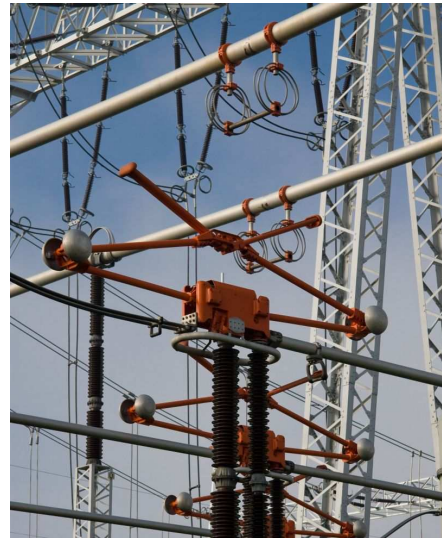
- Horizontální
- Vertikální

Dalším bodem při popisu odpojovače je pohon. U starších odpojovačů se používalo tlakovzdušné ovládání, u novějších odpojovačů se používá motorové ovládání (asynchronní motor). Elektrický motor je umístěn v kovové skříni, která je upevněna na nosnou konstrukci odpojovače. Ovládání motoru je dálkové nebo podle potřeby i pomocí tlačítek elektrického ovládání a případně ručně klikou. Jmenovité napětí motoru je podle typu 3x230/400, ovládací napětí potom je 230V při 50 Hz nebo například 220 V stejnosměrných [15].

## 2.1 Základní typy odpojovačů

### PANTOGRAF

- odpojovač s jedním izolátorem
- nůžkové kontakty
- jeho výhodou je nízká náročnost, co do zabrané plochy rozvodny
- na hladinách vvn 123 kV, 245 kV, 420 kV



### HORIZONTÁLNÍ ODPOJOVAČ

- odpojovač se dvěma izolátory
- je nejrozšířenějším typem
- spínání probíhá v horizontální rovině
- oba izolátory jsou otočné a nesou pohyblivé kontakty



### OTOČNÝ ODPOJOVAČ

- ramena odpojovače se třemi izolátory
- odpojují v horizontální rovině
- otočný izolátor je umístěn ve středu
- krajní izolátory jsou řešeny jako nepohyblivé



## SKLÁPĚCÍ ODPOJOVAČ

- výhodou je úspora místa v rovině kolmé na rovinu pohybu kontaktů
- kontakty se pohybují ve vertikální rovině
- je tvořen dvěma podpěrnými izolátory
- ke spínání dochází buď pohybem kontaktů na obou izolátorech, nebo pomocí jednoho pohyblivého kontaktu a druhého pevného



## 2.2 Charakteristické hodnoty

Jako jmenovité charakteristické hodnoty jsou podle ČSN EN 62271-1 jmenovité napětí  $U_r$ , jmenovitý kmitočet  $f_r$ , jmenovitý proud  $I_r$ , jmenovitý krátkodobý výdržný proud  $I_k$ , jmenovitý dynamický výdržný proud  $I_p$ , jmenovitá doba zkratu  $t_k$ , jmenovité napětí ovládacích ústrojí a pomocných obvodů  $U_a$ , jmenovitá izolační hladina a další. V následující tabulce jsou uvedeny některé vybrané hodnoty pro odpojovače vvn převzaté ze stránek výrobce [15].

Tab. 2.1 – Vybrané hodnoty odpojovačů vvn

Jmenovité napětí [kV]	123	245	420
Jmenovitý proud [A]	1600 - 2000 - 3150	2000 - 3150	2000 - 3150
Jmenovitý krátkodobý zkratový proud [kA]	25 - 31,5 - 40 - 50	40 - 50	40 - 50
Jmenovitý dynamický zkratový proud [kA]	63 - 80 - 100 - 125	100 - 125	100 - 125



Definice některých jmenovitých hodnot udávaných pro odpojovače je převzata z normy

ČSN EN 62271-1:

- **Jmenovité napětí** – je rovno nejvyššímu napětí soustavy, pro kterou je spínací zařízení určeno, a jsou pro něj zavedeny normalizované hodnoty jmenovitých napětí
- **Jmenovitý proud** – je efektivní hodnota proudu, kterou musí být spínací zařízení schopno přenášet v nepřerušovaném provozu za předepsaných podmínek užití a funkce
- **Krátkodobý zkratový proud** – efektivní hodnota proudu, kterou kontaktní spínací přístroj může vést v zapnuté poloze po stanovenou krátkou dobu za předepsaných podmínek užití a provozu. Určuje tepelnou odolnost proudové dráhy.
- **Jmenovitý dynamický výdržný proud** – vrcholová hodnota první největší půlvlny zkratového proudu, který spínací zařízení snese bez poškození v zapnuté poloze za předepsaných podmínek užití a provozu

### 3 Proudová zatížitelnost

Jako elektrická veličina je ampacita udávána v jednotkách ampérech [A]. Význam této veličiny je obsažen v názvu, který vznikl v angličtině spojením dvou slov *ampere* a *capacity*, zkráceně pak *ampacity*. Jedná se tedy o přenosovou schopnost elektrického vodiče (nebo také proudovou kapacitu) a udává, jaký maximální proud může vodičem protékat, aniž by došlo k jeho poškození. [15]

Přenosová schopnost vodiče je závislá nejen na elektrických a tepelných vlastnostech vodiče, ale také na podmínkách okolního prostředí. Elektrické spínací prvky, stejně jako elektrická vedení se dimenzují na tepelné účinky elektrického proudu a to z důvodu zachování minimální životnosti a funkčnosti daného prvku. Průchod elektrického proudu zahřívá vodič (příp. proudovou dráhu odpojovače) a tím způsobuje stárnutí materiálu. Jak je také známo, elektrický odpor roste se zvyšující se teplotou, dochází tedy k nárůstu tepelných ztrát. Záleží potom tedy také na vlivu vnějšího prostředí. Dochází-li k současnému ochlazování vodiče vlivem větru či odpařováním vody z povrchu proudové dráhy, je nárůst teploty omezován. Logicky, pokud je teplota okolí nižší, než teplota povrchu vodiče přechází teplo do okolí a nárůst teploty je opět omezen. Z toho plyne, že s rostoucí teplotou okolí, narůstá riziko překročení povoleného oteplení proudové dráhy.

Na podmínkách okolního prostředí tedy závisí, po jakou dobu a jaká velikost proudu může odpojovačem procházet. Je zřejmé, že v zimním období, kdy teplota vzduchu klesá pod nulovou

hodnotu, nebude oteplení proudové dráhy tak vysoké, jako v letních měsících a je dokonce možné odpojovač krátkodobě přetížit.[4]

### **3.1 Pracovní podmínky**

#### **A. Normální pracovní podmínky**

Pro spínací přístroje venkovního provedení udává norma **ČSN EN 62271-1**:

- teplota okolního vzduchu nepřekročí  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a její průměr během 24 hodin nepřesáhne  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$
- rychlost větru dosahuje maximální hodnoty 34 m/s (tlak větru 700 Pa na válcovou plochu)
- slunečního záření o hodnotě  $1000\text{ W/m}^2$  (za jasného dne v poledne)
- nadmořská výška nepřesahuje 1000 m
- tloušťka námrazy se pohybuje v intervalu od 1 mm do 20 mm
- znečištění okolního vzduchu nepřekračuje mez znečištění II.

#### **B. Zvláštní pracovní podmínky**

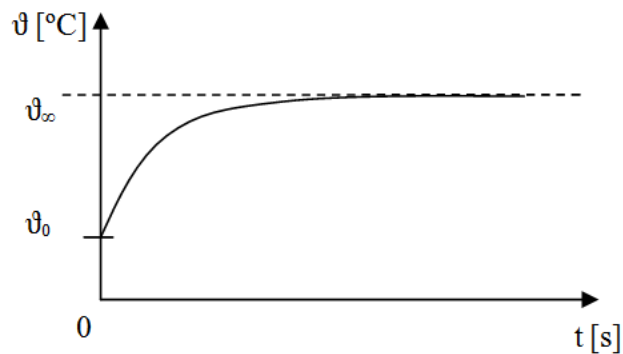
Opět se jedná o hodnoty stanované výše zmíněnou normou:

- dle typu klimatu rozlišujeme teploty pro velmi studený typ (-50 a +40) a (-5 a +55) pro velmi horký typ klimatu
- nadmořská výška přesahující 1000 m (je nutné vnější izolační hladiny spínacích přístrojů přenásobit korekčním činitelem  $K_a$ )
- ostatní parametry jsou dále upravovány v normě **IEC 60721**

### **3.2 Závislost dovoleného proudu ve vodiči na počátečním proudu**

Jak již bylo řečeno, proud procházející vodičem, způsobí jeho oteplení. Doba ustálení tohoto oteplení na konstantní hodnotě je závislá na velikosti proudu, teplotě okolního prostředí, elektrických parametrech vodiče a jeho rozměrech. Na (Obr. 2) je oteplovací křivka pro případ, kdy byl vodič již zahřátý.

Chceme-li určit proud, který může procházet proudovou dráhou odpojovače, aniž by došlo k překročení maximálního dovoleného oteplení, je nutné uvažovat právě teplotu okolí a jmenovitý proud. Dále je nutné stanovit dobu, po kterou může tento proud daným vodičem procházet.



Obr. 2

Pro stanovení doby dovoleného zatížení vycházíme ze vztahu pro teplo nebo také tepelné ztráty vznikající při průchodu proudu činným odporem.

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Delta \vartheta dt + cV d\vartheta \quad (3.2.1)$$

Nejprve budeme uvažovat jednoduchý případ, kdy vodičem neprocházela původně žádná proud. Vztah (3.2.1) vychází z předpokladu, že ztrátové teplo se částečně odvede do okolí a zbylá část se podílí na oteplování vodiče. Následným řešením této rovnice získáme vztah pro zjištění doby trvání průchodu proudu o určité velikosti, kdy ještě nedojde k překročení povoleného oteplení proudové dráhy. Z rovnice tedy vyjádříme  $dt$ .

$$dt = \frac{cV d\vartheta}{RI^2 - \alpha_0 A \Delta \vartheta} \quad (3.2.2)$$

Po integraci neurčitého integrálu získáme hledaný čas.

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \cdot \ln \left[ \frac{RI^2}{cV} - \frac{\alpha_0 A \Delta \vartheta}{cV} \right] + K \quad (3.2.3)$$

K určení integrační konstanty využijeme znalost počátečních podmínek, kdy v čase nula byl i přírůstek teploty roven nule a tedy  $t = 0 \rightarrow \Delta \vartheta = 0$ .

$$0 = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \cdot \ln \left[ \frac{RI^2}{cV} - 0 \right] + K \Rightarrow K = \frac{cV}{\alpha_0 A} \cdot \ln \left[ \frac{RI^2}{cV} \right]$$

Výsledný tvar potom vypadá takto:

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{\alpha_0 A \Delta \vartheta}{RI^2} \right] = -\tau \cdot \ln \left[ 1 - \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_\infty} \right] \quad (3.2.4)$$

Zde člen  $\frac{cV}{\alpha_0 A}$  je roven tepelné časové konstantě  $\tau$ , která udává rychlost ustálení části proudové dráhy na nové teplotě. Nyní převedeme rovnici do exponenciálního tvaru a vyjádříme  $\Delta \vartheta$ . Tvar této rovnice odpovídá známému průběhu oteplovací křivky:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_\infty \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (3.2.5)$$

Zavedeme-li nyní, že  $\Delta \vartheta = \vartheta_{\max} - \vartheta_i$  a  $\Delta \vartheta_\infty = \vartheta_s - \vartheta_i$  získáme tvar rovnice (3.2.6) pro dobu trvání protékajícího nadproudu odpojovačem v závislosti na počátečním proudu [4]:

$$t = -\tau \cdot \ln \left[ 1 - \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta_i}{\vartheta_s - \vartheta_i} \right]. \quad (3.2.6)$$

Časová konstanta  $\tau$  není ve skutečnosti neměnná, ale je závislá na teplotě odpojovače, neboť vlivem změny teploty dochází i ke změně součinitele přestupu tepla.

Pro oteplení, které nestane vlivem změny proudu tekoucím proudovou drahou, musí platit podmínka  $\vartheta_i \leq \vartheta_{\max}$ . Tedy nesmí dojít k překročení povoleného oteplení, které je normou stanoveno na  $65^\circ\text{C}$ .

V uvedeném vztahu jsou:

$\vartheta_{\max}$  ... maximální dovolená teplota proudové dráhy

$$\vartheta_{\max} = \Delta \vartheta_r + 40^{\circ}\text{C}$$

$\vartheta_i$  ... pracovní teplota počátečního proudu

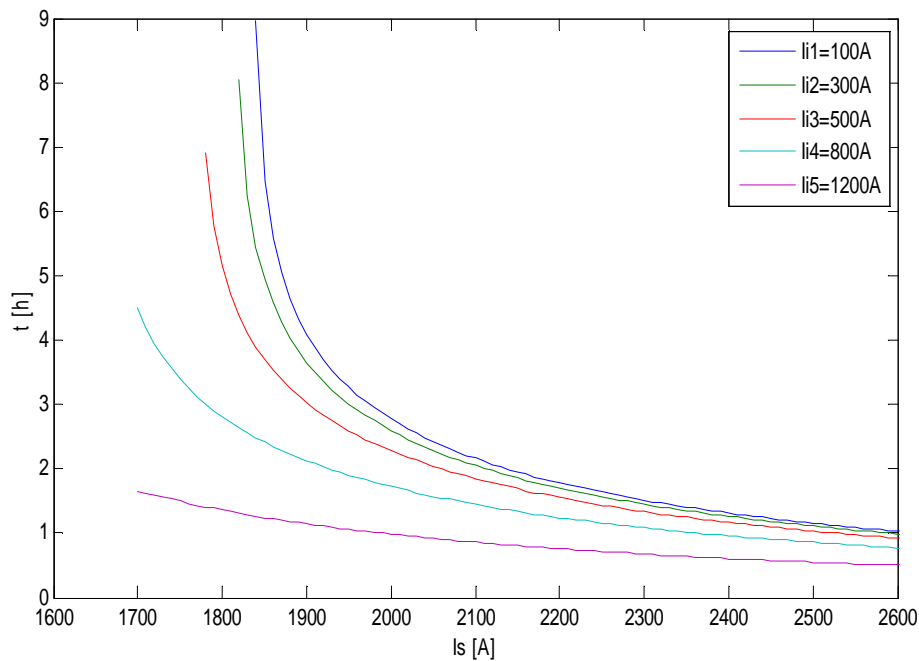
$$\vartheta_i = (\vartheta_{\max} - 40^{\circ}\text{C}) \cdot \left(\frac{I_i}{I_r}\right)^k + \vartheta_a$$

$\vartheta_s$  ... pracovní teplota během přetížení

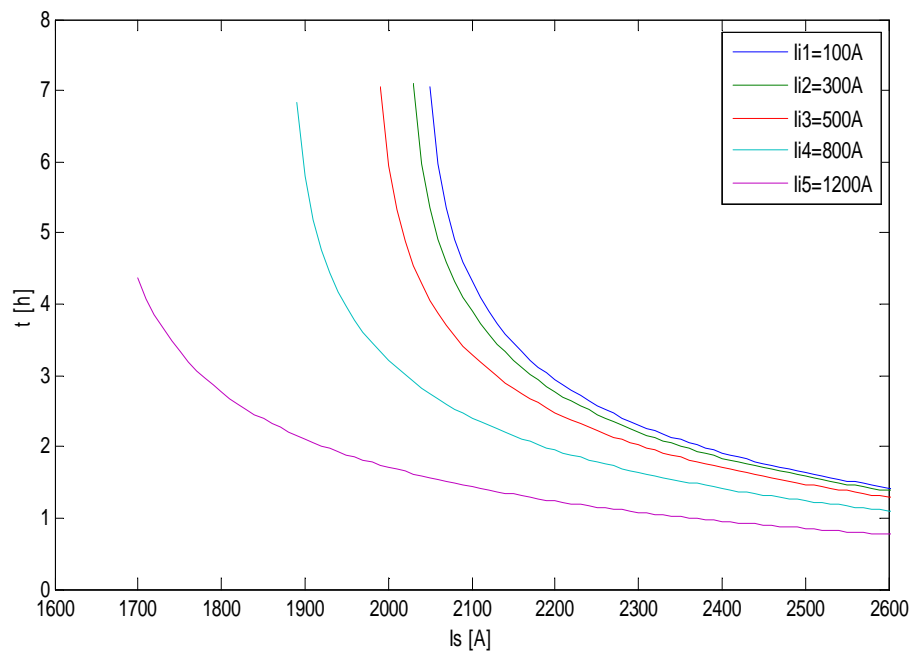
$$\vartheta_s = (\vartheta_{\max} - 40^{\circ}\text{C}) \cdot \left(\frac{I_s}{I_r}\right)^k + \vartheta_a$$

V grafu níže lze sledovat, jak předchozí dovolený proud ovlivnil dobu, po kterou mohl protékat následný přetěžující proud. Časová konstanta  $\tau$  byla volena 1.5 h, což podle normy odpovídá hodnotě dané typovými zkouškami odpojovačů.

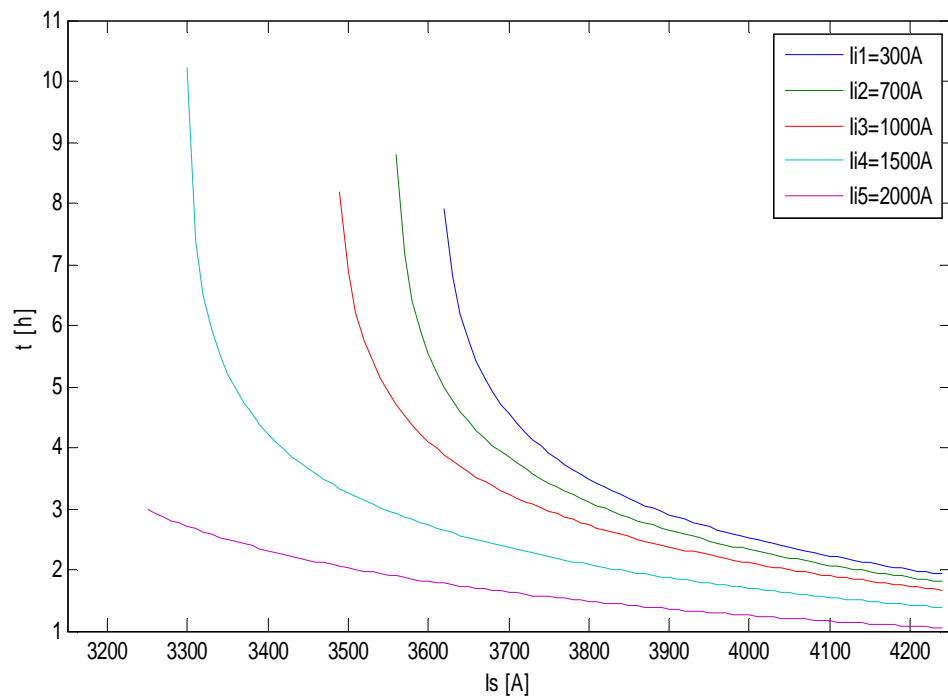
**Graf 1 – Doba přetěžování odpojovače ( $I_r = 1600\text{A}$ ,  $\vartheta_a = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\vartheta_{\max} = 105^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 1.5\text{ h}$ )**

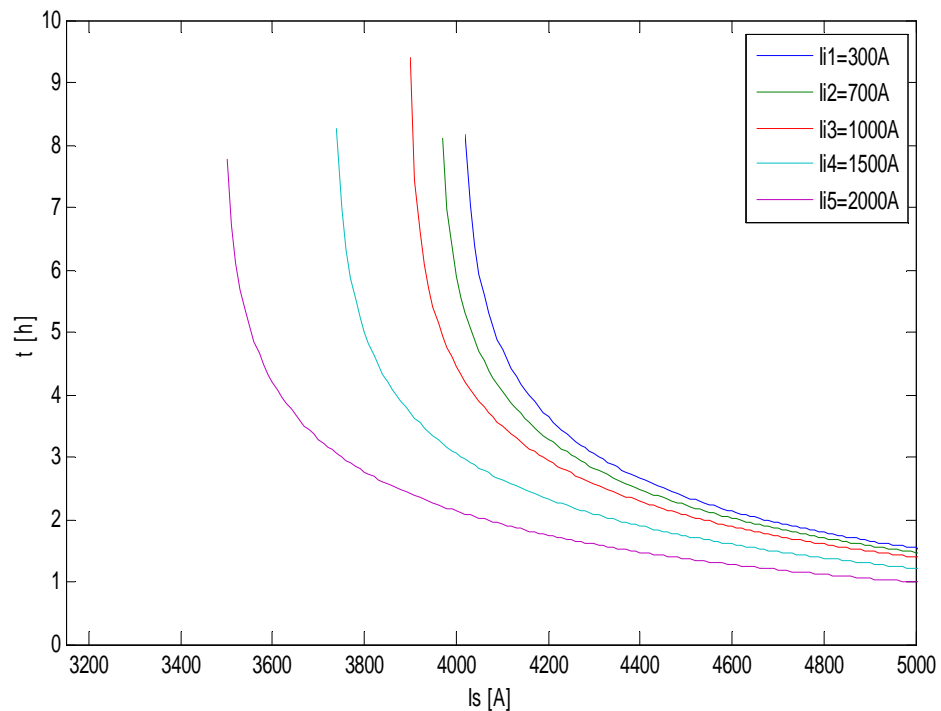


**Graf 2 – Doba přetěžování odpojovače ( $I_r = 1600A$ ,  $\vartheta_a = 0^\circ C$ ,  $\vartheta_{max} = 105^\circ C$ ,  $\tau = 1.5 h$ )**



**Graf 3 – Doba přetěžování odpojovače ( $I_r = 3150A$ ,  $\vartheta_a = 20^\circ C$ ,  $\vartheta_{max} = 105^\circ C$ ,  $\tau = 1.5 h$ )**



**Graf 4 – Doba přetěžování odpojovače ( $I_r = 3150A$ ,  $\vartheta_a = 0^\circ C$ ,  $\vartheta_{\max} = 105^\circ C$ ,  $\tau = 1.5 h$ )**

Při porovnání grafů 1 a 2 nebo 3 a 4 vidíme, že při nižší teplotě okolí je doba zatěžování delší. Znamená to, že maximálního oteplení dosáhne odpojovač za delší časový úsek. Dále je patrna závislost na předchozím protékajícím proudu. Čím vyšší byla hodnota prvotního proudu, tím kratší bude doba následního přetížení do maximálního oteplení.

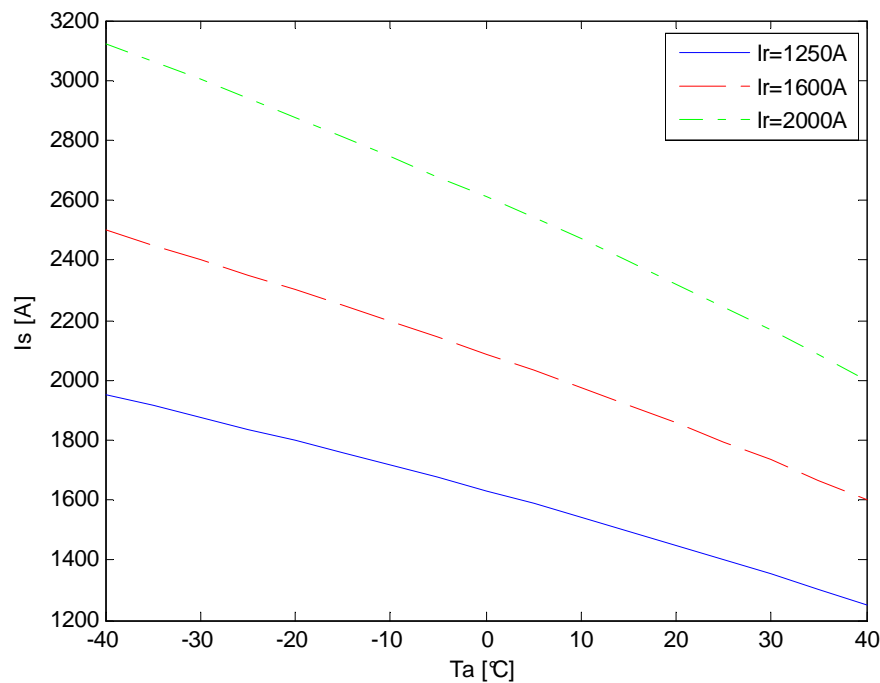
Pro příklad odpojovač s  $I_r = 1600A$  a proudem  $I_i = 800A$  může být při teplotě okolí  $20^\circ C$  zatížen proudem  $I_s = 2100A$  po dobu 1 h 26 min 58 s, při teplotě okolí  $0^\circ C$  se tato doba zvedne na 2 h 24 min 44s. To je skoro o hodinu delší doba, než odpojovač dosáhne oteplení  $65^\circ C$ .

Ze znalosti jmenovitého proudu odpojovače a teploty okolí dále můžeme vyjádřit vztah pro dovolený proud právě v závislosti na teplotě okolí:

$$I_s = I_r \left[ \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta_a}{\Delta \vartheta_r} \right]^{\frac{1}{n_d}} \quad (3.2.7)$$

$n_d$ ...koeficient charakterizující provedení proudové dráhy (1,6 – 2,0)

Graf 5 – Závislost dovoleného proudu na teplotě okolí



## 4 Sdílení tepla

Ztrátové teplo vzniklé ve vodiči je částečně odvedeno do okolí a částečně přispívá ke zvýšení oteplení vodiče. Obecně by se dala napsat bilanční rovnice takto:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2. \quad (4.3.2.1)$$

Zde pravá strana rovnice odpovídá zdroji oteplení  $Q_0$  a levá strana rovnice obsahuje teplo odvedené sáláním a radiací  $Q_1$  a rozdíl mezi teplem vzniklým a odvedeným je teplo akumulované  $Q_2$ . V ustálených stavech, kdy se po dlouhou dobu (nekonečně dlouhou) nemění podmínky, za kterých děj probíhá, se veškeré teplo, vniklé například průchodem proudu, odvede do okolí a  $Q_2 = 0$ . Tedy



nedochází již ke zvyšování teploty vodiče. V přechodovém stavu dochází k oteplení vlivem tepelné kapacity, která definuje množství tepla, které způsobí teplotní rozdíl:

$$C = \frac{Q_2}{\Delta T} \quad (4.2)$$

Tepelná kapacita je materiálovým parametrem nejčastěji udávaná jako poměrná hodnota vztahená na 1 kg hmoty. Je teplotně závislá a platí pro ni podobný vztah jako pro tepelnou závislost měrného elektrického odporu:

$$c = c_0 (1 + \beta_0 \Delta \vartheta) \quad (4.3)$$

Pro dovolené teploty při jmenovitých proudech lze tuto závislost zanedbat a součinitele  $\beta_0$  položit rovný nule. Podle [3] platí toto zjednodušení přibližně pro teploty do 100 °C. U materiálů s vyšší tepelnou kapacitou dojde k nižšímu oteplení, než u materiálů s nižší tepelnou kapacitou, neboť tepelná kapacita charakterizuje množství tepla, které je nutné dodat k zahřátí příslušného tělesa o jeden stupeň celsia.

Tepelná energie, která se nepodílí na oteplování vodiče, je odvedena do okolí prostřednictvím proudění a sálání. V teorii sdílení tepla jsou důležité zejména následující vztahy:

- Newtonův zákon

$$Q = \alpha_0 \cdot A \cdot (\vartheta_s - \vartheta_a) \quad (4.4)$$

- Stefan-Boltzmannův zákon

$$I_0 = \sigma_0 T^4 \quad (4.5)$$

- Fourierův zákon

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dA \quad (4.6)$$

## 4.1 Oteplování proudové dráhy

Pro tento případ budou chladící účinky zcela zanedbány. Pokud by odpojovačem vvn, vystaveným venkovnímu prostředí, neprocházel žádný proud, rovnala by se teplota proudové dráhy teplotě okolí. Při průchodu elektrického proudu vzroste vlivem ztrát na odporu vodiče teplota proudové dráhy o  $\frac{d\vartheta}{dt}$ . Vztah pro tepelné ztráty udává rovnice (4.1.1).

$$P_z = RI^2 = k_{pj} \cdot I^2 \cdot \frac{\rho_{\vartheta_1} l_v}{S_v} \cdot [1 + \alpha(\vartheta_2 - \vartheta_1)] \quad (4.1.1)$$

$k_{pj}$  ...faktor zohledňující elektrický povrchový jev [-]

$S_v$  ...průřez vodiče v [m<sup>2</sup>]

$l_v$  ...délka vodiče v [m]

$\rho_{\vartheta_1}$  ...měrný elektrický odpor (měrná rezistivita) [Ωm]

$\vartheta_1$  ...prvotní teplota vodiče [°C]

$\vartheta_2$  ...teplota vodiče po oteplení [°C]

$\alpha$  ...teplotní součinitel elektrického odporu [K<sup>-1</sup>]

Z výše uvedeného vztahu je patrné, že velikost elektrických ztrát, tedy ztrátového tepla, lze ovlivnit změnou průřezu vodiče a volbou materiálu vodiče. S přibývajícím délkou proudové cesty ztráty narůstají. Ve vztahu (4.1.1) je dále zavedena teplotní závislost elektrického odporu, kdy s přírůstkem teploty narůstá i měrný elektrický odpor. Teplotní součinitel elektrického odporu je volen podle materiálu vodiče, například pro hliník je  $\alpha = 0,00429 \text{ K}^{-1}$  a pro měď  $\alpha = 0,0068 \text{ K}^{-1}$  a jeho platnost je přibližně do 200 °C. Dále je zde zahrnut vliv elektrického povrchového jevu, kdy průchodem střídavého proudu o frekvenci  $f$  dochází k nerovnoměrnému rozložení proudové hustoty v průřezu vodiče. Směrem od středu k povrchu vodiče hustota stoupá, tím se snižuje velikost využitého průřezu a následně dochází k navýšení tepelných ztrát. Z tohoto důvodu se přidává součinitel  $k_{pj}$ , který je dán poměrem [1]:

$$k_{pj} = \frac{R_{stř}}{R_{ss}} \quad (4.1.2)$$

$R_{stř}$  ...činný odpor pro střídavý proud

$R_{ss}$  ...činný odpor pro stejnosměrný proud

Dalším zdrojem tepla je sluneční záření. Oteplení vodiče poté závisí na jeho schopnosti absorbovat toto záření. To je dáno kvalitou povrchu plochy vystavené účinkům sluneční energie. Například hladké povrchy budou daleko lépe odrážet sluneční paprsky, a proto se budou méně zahřívat. Naopak zoxidované a znečištěné povrchy budou vykazovat větší oteplení. V neposlední řadě závisí velikost sluneční energie na intenzitě záření. Maximální hodnota intenzity během dne dosahuje okolo 1000 W/m<sup>2</sup>.

$$P_S = \varepsilon_a \cdot A \cdot I \quad (4.1.1)$$

Kde:

$\varepsilon_a$  ...měrná pohltivost [-]

$A$  ...absorpční plocha [m<sup>2</sup>]

$I$  ...intenzita záření [W/m<sup>2</sup>]

## 4.2 Ochlazování povrchu proudové dráhy

K chlazení povrchu proudové dráhy dochází sdílením tepla s okolím. V principu se jedná o předávání tepla mezi dvěma soustavami s rozdílnou teplotou, kdy teplejší soustava předá teplo té chladnější. Zde je chladnější soustavou okolní vzduch.

V ustáleném stavu je soustava vzduch – proudová dráha v rovnováze, tedy teplota povrchu proudové dráhy je neměnná. Tento stav nastane, pokud tělem proudové dráhy prochází konstantní proud po dostatečně dlouhou dobu a podmínky okolního prostředí se také nemění. Pro takový případ lze upravit rovnici (3.2.1) do tvaru:

$$RI^2 = \alpha_0 A \Delta \vartheta + cV \frac{d\vartheta}{dt}, \text{ kde } \frac{d\vartheta}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow RI^2 = \alpha_0 A \Delta \vartheta \quad (4.2.1)$$

Z rovnice (4.2.1) poté můžeme vidět, že v ustáleném stavu se veškeré přijaté teplo odvádí chlazením do okolí. Změní-li se však některý z parametrů rovnice, například velikost procházejícího proudu, teplota okolí nebo dojde-li ke zvýšení odvodu tepla vlivem proudění vzduchu, bude časová změna oteplení opět nenulová a k řešení získáme znovu diferenciální rovnici.

Odvod tepla do okolí je charakterizován součinitelem přestupu tepla  $\alpha_0$ , který závisí na teplotním rozdílu mezi teplotou povrchu tělesa a teplotou chladicí látky. V našem případě se tedy jedná o teplotu povrchu proudové dráhy a teplotu vzduchu. Dalšími parametry, které mohou ovlivňovat míru chlazení, jsou vlhkost vzduchu, rychlost proudění vzduchu, geometrie chlazeného povrchu a obecně vlastnosti chlazeného povrchu (drsnost, znečištění).

K výměně tepla dochází třemi způsoby a to konvekcí, kondukcí a sáláním. Tato výměna probíhá v takzvané mezní vrstvě, což je prostor v těsné blízkosti teplosměnné plochy. V této mezní vrstvě je teplota tekutiny (vzduchu) a pevného tělesa stejná [6].

Proudění tekutiny v okolí tělesa můžeme popsat dvěma způsoby. Rozlišujeme proudění *laminární* a *turbulentní*. Laminární proudění působí v mezní vrstvě a jedná se o rovnoměrné proudění podél délky tělesa. Turbulentní proudění vzniká vlivem různých tlaků tekutiny. Pohyb částic je tak neuspořádaný a chaotický. [6]

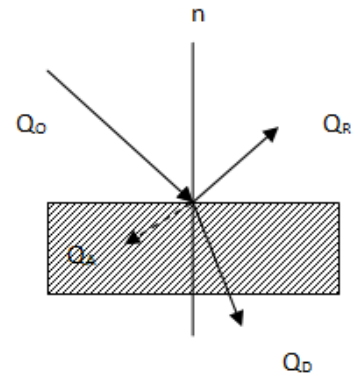
#### 4.2.1 Sálání

Sálání neboli radiace je šíření tepla prostřednictvím tzv. tepelných paprsků. K přenosu dochází elektromagnetickým vlněním o různých vlnových délkách. Zejména se jedná o infračervené záření, které vyzařují všechna tělesa s nenulovou teplotou. Pro tepelné paprsky platí stejné fyzikální zákony (odraz, lom) jako pro viditelné světlo, proto je mezi nimi často používána jistá analogie. Při vyzařování tepelné energie je tato energie pohlcována okolními tělesy. K ochlazování a oteplování sáláním tak dochází současně. Ovšem energie záření se nepohlčí tělesem úplně, ale část se odrazí a část tělesem projde (obr.3). [6]

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q_0 \quad (4.2.2)$$

$$\frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_D}{Q_0} = A + R + D = 1 \quad (4.2.3)$$

Výraz (4.2.2) udává součet složek tepla dopadajícího na těleso a (4.2.3) definuje poměrnou tepelnou pohltivost  $A$ , poměrnou odrazivost  $R$  a poměrnou průteplivost  $D$ . Dokonale černá tělesa mají  $A = 1$ , tedy veškeré dopadající teplo pohltí. Naproti tomu tělesa s  $R = 1$  jsou tzv. dokonale bílá nebo zrcadlová a veškeré teplo se odrazí. Pokud je  $D = 1$  jedná se o dokonale průteplivá tělesa a teplo tělesem pouze projde.[6]



Obr. 3

Ochlazování sáláním se uskutečňuje z povrchu tělesa do okolí. Ochlazovací efekt tak bude záviset na celkové ploše tělesa. Podle [6] platí pro výměnu tepla sáláním následující vztah:

$$Q = \varepsilon \cdot C_0 \cdot A \cdot \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \right]. \quad (4.2.4)$$

Ve vztahu (4.2.4) figuruje termodynamická teplota a konstanta  $C_0$ , která symbolizuje součinitel sálání dokonale černého tělesa a  $\varepsilon$  je emisivita nebo také sálavost plochy  $A$ . Pro součinitele sálání platí následující vztah, kde  $\sigma_0$  je Stefan-Boltzmannova konstanta:

$$C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,67 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}. \quad (4.2.5)$$

Nyní z Newtonova zákona můžeme vyjádřit součinitel přestupu tepla a dosadit (4.2.4) za teplo. Potom získáme vztah pro výpočet součinitele přestupu tepla sáláním:

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_s^4 - T_a^4)}{(T_s - T_a)} \quad (4.2.6)$$

## 4.2.2 Proudění a teorie podobnosti

Konvekce neboli proudění je druh sdílení tepla mezi tekutinou a tuhým tělesem. Na základě povahy pohybu tekutiny rozlišujeme konvekci volnou čili přirozenou a nucenou. Při volné konvekci je pohyb tekutiny způsoben pouze teplotním spádem, zatímco při nucené konvekci se uplatní vnější činitelé (např. vítr, ventilátor). [6]

Popsat sdílení tepla konvekcí je z matematického hlediska velice složitý proces, protože při něm záleží na mnoha faktorech. Pro teoretické výpočty tak slouží zobecněné vzorce, tzv. kritériální rovnice, vycházející z experimentálních měření skutečných teplosměnných ploch. Kritéria podobnosti nebo také podobnostní čísla jsou bezrozměrné výrazy, které byly shrnuty v tzv. Teorii podobnosti [10]. Proto, aby byly výsledky využitelné, musí být brán ohled na vzájemnou podobnost podmínek při zkušebním měření (teplota okolí, rychlost proudění, tvar tělesa, druh proudící tekutiny, atd.) a při vyšetřování konkrétního případu (tělesa).

Podle [6] vyšetřujeme-li podobnost dvou fyzikálních jevů, předpokládáme, že oba fyzikální jevy probíhají v podobně geometricky uspořádaných soustavách, že jsou stejnorodé (udávají se ve stejných jednotkách a mají stejný fyzikální význam) a jejich rovnice jsou tvarově i obsahově stejné. Pak můžeme tvrdit, že existuje vztah mezi fyzikálním jevem  $\varphi'$  a  $\varphi''$ :

$$\varphi'' = c_{\varphi} \cdot \varphi' \quad (4.2.7)$$

$c_{\varphi}$  ... konstanta podobnosti

Tato zjednodušená závislost platí tedy jen pro porovnávání dvou stejných veličin. V případě složitějších fyzikálních jevů musí být splněna další podmínka, která udává, že poměr určitých veličin je konstantní (kritéria podobnosti). Jako příklad uvádí [6] rychlost proudění tekutiny:

$$w = \frac{l}{\tau} \quad (4.2.8)$$

Pro první soustavu tedy píšeme  $w' = \frac{l'}{\tau'}$  a pro druhou  $w'' = \frac{l''}{\tau''}$ . Dále zapíšeme poměr rychlostí soustav:

$$\frac{w''}{w'} = \frac{l''}{l'} \cdot \frac{\tau'}{\tau''} \quad (4.2.9)$$

Podle (4.2.2) získáme:

$$c_w = \frac{c_l}{c_\tau} \rightarrow \frac{c_w c_\tau}{c_l} = 1.$$

Nebo přímo z rovnice (4.2.4) získáme jiný tvar kritéria podobnosti:

$$\frac{w'\tau'}{l'} = \frac{w''\tau''}{l''} \rightarrow \frac{w\tau}{l} = 1. \quad (4.2.10)$$

A právě tvar (4.2.8) je hledaný tvar kritériálního čísla. V následující tabulce jsou udána kritéria podobnosti, která postačí pro výpočet součinitele přestupu tepla při ochlazování proudícím vzduchem.

**Tab. 4.1 – Kritéria podobnosti**

Kritérium	Vzorec
Nusseltovo číslo	$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (4.2.11)$
Reynoldsovo číslo	$Re = \frac{qw l}{\mu} \quad (4.2.12)$
Grasshoffovo číslo	$Gr = \beta \frac{g l^3}{\nu^2} \Delta t \quad (4.2.13)$
Prandtlovo číslo	$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu g c_p}{\lambda} \quad (4.2.14)$

Nusseltovo číslo, jako kritérium podobnosti popisující sdílení tepla konvekcí a kondukcí, je využíváno pro výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . Zjednodušeně můžeme psát pro nucené a volné proudění závislost Nusseltova čísla na jiných kritériích. Pro nucené proudění je kritériální rovnice ve tvaru:

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (4.2.15)$$

Pro volnou konvekci platí tvar rovnice:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (4.2.16)$$

Pro stanovení hodnoty součinitele  $\alpha$  v kritériálních rovnicích figurují veličiny charakterizující proudící tekutinu, které jsou závislé na teplotě. Určující teplotou pro tyto veličiny je střední teplota mezní vrstvy[10]:

$$T_m = \frac{T_s - T_a}{2} \quad (4.2.17)$$

Kde:

$T_s$  ...je teplota povrchu ochlazovaného tělesa

$T_a$  ...je teplota okolí (vzduchu)

Další postup výpočtu se poté odvíjí od typu chlazeného povrchu. Záleží totiž na tvaru obtékaného tělesa. Dále se liší vzorce pro výpočet při nuceném nebo volném proudění a záleží také na povaze proudění, tedy zda se jedná o turbulentní či laminární proudění. Tvar tělesa určuje charakteristickou délku přítomnou například v Nusseltově kritériu či Grasshofově kritériu. Pro kruhové profily při kolmém obtékání trubky je charakteristická délka [14]:

$$L = \frac{\pi d}{2} \quad (4.2.18)$$

Pro volnou konvekci je pak charakteristická délka rovna obvodu trubky. Charakteristická délka pro obdélníkový profil je [14]:

$$L = \frac{a \cdot b}{2(a + b)} \quad (4.2.19)$$

V literatuře [14] je podrobněji rozepsána celá teorie na výpočet součinitele přestupu tepla pro různé případy. Způsoby výpočtu se dělí na svislé a horizontální roviny, na tělesa obtékaná v omezeném i neomezeném prostoru, na případy různých uspořádání těles, na vnější a vnitřní obtékání. Jsou zde uvedeny také korelační vzorce, pomocí nichž je možné sjednotit případy nuceného a nenuceného proudění.



## 5 Návrh proudové dráhy odpojovače

Proudová dráha venkovního odpojovače je vystavena různým vlivům, které způsobují tepelná a mechanická namáhání konstrukčních částí. Při návrhu je proto nutné k těmto vlivům přihlížet a nadimenzovat jednotlivé části proudové dráhy pro případy, se kterými se může odpojovač za dobu své funkce setkat. Návrh se provádí pro podmínky za běžného provozního stavu a pro podmínky při poruchových stavech. Vzhledem k tomu, že v dnešní době dochází k přetěžování elektrické soustavy vyššími výkony, musí být odpojovač schopen po určitou dobu toto přetížení přenášet, aniž by došlo k jeho poškození. V tomto případě hovoříme o tepelných účincích. Oteplování proudové dráhy je hlavním, ne však jediným, kritériem pro stanovení základních rozměrů proudové dráhy.

### 5.1 Izolační vzdálenost v odpojovací dráze

Aby nedocházelo k přeskokům v odpojovací dráze a nesnižovala se tak životnost kontaktů odpojovače, stanoví se potřebná izolační vzdálenost podle hodnot krátkodobého a atmosférického přepětí. Podle normy ČSN EN 62271-1 zjistíme izolační hladinu pro odpojovač určený jmenovitým napětím 123 kV.

**Tabulka 1 – Jmenovité izolační hladiny pro jmenovité napětí řadí I, rozsahu I**

Jmenovité napětí $U_r$ [kV]	Jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí $U_d$ [kV] (ef. hodnota)		Jmenovité výdržné napětí při atm. pulsu $U_p$ [kV] (vrcholná hodnota)	
	společná hodnota	v odpojovací dráze	společná hodnota	v odpojovací dráze
<b>123</b>	230	265	550	630

Hodnoty výdržných napětí uvedené v tabulce platí při normálních klimatických podmínkách.

### 5.1.1 Dočasné přepětí

Dočasná nebo krátkodobá přepětí vznikají vlivem poruchových jevů na síti (např. zkraty). Z tabulky pro jmenovité izolační hladiny je známo výdržné napětí  $U_d$ . Pro výpočet bude tato hodnota ještě navýšena o 15%.

$$U_d = 265 \text{ kV}$$

Navýšení výdržného napětí o 15%:

$$U_d = 265 \cdot 1,15 = 304,75 \text{ kV}$$

Empiricky stanovené vzorce pro izolační dráhu  $c$ :

$$U_d = 14 + 0,316 \cdot c_1 \Rightarrow c_1 = \frac{U_d - 14}{0,316} = \frac{304,75 - 14}{0,316} = 920,095 \text{ mm}$$

$$U_d = 10,6 + 0,36 \cdot c_2 \Rightarrow c_2 = \frac{U_d - 10,6}{0,36} = \frac{304,75 - 10,6}{0,36} = 817,08 \text{ mm}$$

### 5.1.2 Atmosférická přepětí

Atmosférická přepětí vznikají při bouřkách. Důsledkem je přepět'ová vlna šířící se po vedení, která se v laboratorních podmínkách simuluje napět'ovým impulzem o parametrech 1,2/50  $\mu\text{s}$  nebo proudovým impulzem 8/20  $\mu\text{s}$ . Výdržné napětí bude navýšeno o 20 %.

$$U_p = 630 \cdot 1,2 = 756 \text{ kV}$$

Z uvedených vztahů opět určíme nejvyšší z hodnot  $c$ .

$$U_p = 45 + 0,57 \cdot c_3 \Rightarrow c_3 = \frac{U_p - 45}{0,57} = \frac{756 - 45}{0,57} = 1247,37 \text{ mm}$$

$$U_p = 0,505 \cdot c_4 \Rightarrow c_4 = \frac{U_p}{0,505} = \frac{756}{0,505} = 1497,03 \text{ mm}$$

$$U_p = 148 + 0,545 \cdot c_5 \Rightarrow c_5 = \frac{U_p - 148}{0,545} = \frac{756 - 148}{0,545} = 1115,60 \text{ mm}$$

Pro výsledný rozměr izolační vzdálenosti v odpojovací dráze bude platit hodnota s maximálním rozměrem. Konečná vzdálenost je tak:

$$c = \{c_1; c_2; c_3; c_4; c_5\}_{\max} = c_4 = 1497,03 \text{ mm}.$$

Tuto hodnotu jsem zaokrouhlila na 1500 mm.

## 5.2 Ramena odpojovače

V tabulce níže jsou uvedeny některé rozměry odpojovače včetně délek levého a pravého ramene odpojovače tvořených trubkovým vodičem.

Izolační vzdálenost v odpojovací dráze	$c = 1500 \text{ mm}$
Délka objímky	$l_o = 140 \text{ mm}$
Délka kontaktní hlavice	$l_{kh} = 240 \text{ mm}$
Délka levého ramene	$l_{r1} = 450 \text{ mm}$
Délka pravého ramene	$l_{r2} = 510 \text{ mm}$

S ohledem na skin efekt je volena tloušťka stěny trubky na základě hloubky vniku při frekvenci 50 Hz. Hloubka vniku je vzdálenost mezi povrchem vodiče a místem, kam proudová hustota klesá až na hodnotu  $1/e$ .

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu}} \quad (5.2.1)$$

$$a = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 37,7 \cdot 10^6}} = 11,59 = 12 \text{ mm}$$

$$a = 10 \text{ mm}$$

Nejprve se stanoví předběžný průřez ramene z dovolené proudové hustoty a jmenovitého proudu odpojovače. Proudovou hustotu volím 1,5 A/mm<sup>2</sup>.

$$S_r = \frac{I_n}{\sigma_{dov}} \quad (5.2.2)$$

$$S_r = \frac{1600}{1,5} = 1067 \text{ mm}^2$$

Vnitřní a vnější průměr trubky se spočítá ze vztahu pro obsah mezikruží:

$$S = S_1 - S_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_2^2) \quad (5.2.3)$$

Dále známe vztah mezi tloušťkou stěny a vnitřním a vnějším průměrem. Z něj si vyjádříme vnější rozměr  $d_2$  a dosadíme do rovnice pro obsah mezikruží.

$$a = \frac{d_1 - d_2}{2} \Rightarrow d_2 = d_1 - 2a$$

Na obrázku níže jsou uvedené rozměry znázorněny. Po dosazení ze vzorce (výše) získáváme vztah pro průřez trubkového vodiče:

$$S = \pi a (d_1 - a) \quad (5.2.4)$$

Nyní si je možno vyjádřit vnější průměr trubky, kde  $S$  je předběžný průřez a  $a$  je tloušťka stěny:

$$d_1 = \frac{S + \pi a^2}{\pi a} \quad (5.2.5)$$

Po dosažení a vypočtení hodnot, získáváme přibližné rozměry ramena odpojovače:

$$d_1 = \frac{1067 + \pi \cdot 10^2}{\pi \cdot 10} \doteq 44 \text{ mm} ,$$

$$d_2 = 44 - 2 \cdot 10 = 24 \text{ mm} .$$

Tyto rozměry jsou však orientační, skutečné rozměry volím podle vyráběných hliníkových trubek [18].

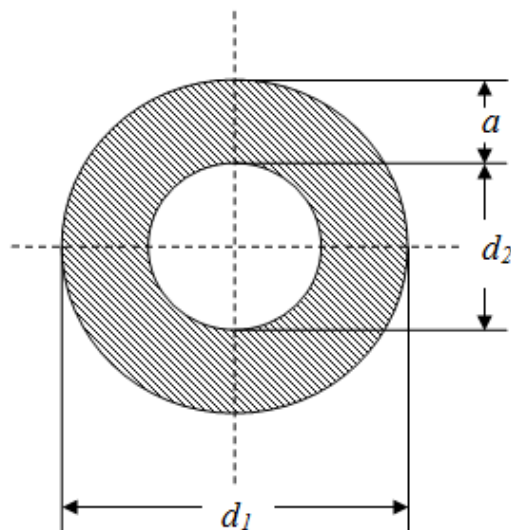
$$d_1 = 50 \text{ mm}$$

$$d_2 = 30 \text{ mm}$$

$$a = 10 \text{ mm}$$

Skutečný průřez ramene je potom:

$$S_r = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_2^2) = 1256,64 \text{ mm}^2 .$$



Obrázek 1 – Průřez trubkového vodiče

### **5.3 Kontaktní hlavice**

Kontaktní hlavice se skládá z kontaktních palců, kontaktní pružiny a základového tělesa, na němž jsou palce i pružina připevněny. Základové těleso je tvořeno ze stejného materiálu jako rameno odpojovače. Materiál kontaktních palců je měď galvanicky postříbřená a kontaktní pružina je z nerezové oceli.

Návrh se provádí s ohledem na možná oteplení způsobená jak provozními proudy, tak proudy krátkodobě přesahujícími jmenovitou hodnotu. Předpokladem výpočtů je předchozí ustálená teplota proudové dráhy, resp. kontaktního ústrojí. Maximální dovolené oteplení postříbřených měděných kontaktů na vzduchu je podle normy **ČSN EN 62271-1**  $65^{\circ}\text{C}$  a pro šroubová nebo ekvivalentní spojení  $75^{\circ}\text{C}$ . V téže normě je také uvedeno kritérium pro kontaktní pružinu tj. že „teplota nesmí dosáhnout hodnoty, při níž se snižuje pružnost materiálu“.

Pro uvažovanou nejvyšší teplotu ovzduší  $40^{\circ}\text{C}$  je pak stanovena nejvyšší hodnota teplot pro tyto části kontaktní hlavice a to  $105^{\circ}\text{C}$  pro kontakty a  $115^{\circ}\text{C}$  pro šroubová nebo ekvivalentní spojení.

#### **5.3.1 Návrh kontaktních palců**

Počet kontaktních palců se pohybuje v rozmezí 4 – 16, tedy vždy sudý počet. Volím  $n = 8$  tj. 4 kontaktní páry, tedy čtyři palce na každé straně kontaktní hlavice.

Nejdříve je třeba stanovit potřebnou přitlačnou sílu, která připadne na jeden kontakt. Velikost přitlačné síly poté ovlivní přechodový stykový odpor, který vzniká na rozhraní dvou vodičů, díky nerovnostem povrchu (drslosti). K určení potřebné přitlačné síly tedy využijeme nejmenší stykový odpor, který je zároveň charakterizován úbytkem napětí a proudem kontakty protékajícím. Výpočet stykového odporu se provádí podle tří základních kritérií [5]. Stykový odpor je vztažen vždy na jeden palec.

- **Kritérium pro jmenovitý proud**

$$R_{s1} = \frac{\Delta U_s}{I_{ni}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{\frac{1600}{8}} = 100 \mu\Omega \quad (5.3.1)$$

Kde  $\Delta U_s$  je uvažovaný minimální úbytek napětí na kontaktu a je roven 20 mV .

- **Kritérium pro krátkodobý dynamický proud**

$$R_{s2} = \frac{U_{ss} \cdot 10}{I_{di}} = \frac{0,35 \cdot 10}{\frac{80000}{8}} = 350 \mu\Omega \quad (5.3.2)$$

Kde  $U_{ss}$  je napětí svaření elektrického styku a 10 je experimentálně zjištěná konstanta.

- **Kritérium pro krátkodobý zkratový proud**

$$R_{s3} = \frac{E \cdot 10}{I_{ki}^2 \cdot t_k} = \frac{200 \cdot 10}{\left(\frac{31500}{8}\right)^2 \cdot 1} = 129 \mu\Omega \quad (5.3.3)$$

Kde  $E$  je maximální ztracená energie na úžinovém odporu, 10 je experimentálně zjištěná konstanta a  $t_k$  je doba trvání zkratu.

Protože požadujeme co nejmenší stykový odpor, volíme výslednou hodnotu:

$$R_s = \{R_{s1}; R_{s2}; R_{s3}\}_{\min} = R_{s1} = 100 \mu\Omega .$$

Pro výpočet přítlačné síly jednoho kontaktu byl využit vzorec podle [11], kde  $k$  je konstanta zohledňující vlastnosti materiálu vodiče a koeficient  $m$  zohledňuje druh kontaktního styku.

$$F_k = \left(\frac{k}{R_s}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (5.3.4)$$

Pro přímkový styk je  $m = 0,5 - 0,7$ , já volím  $m = 0,6$ . A po dosazení vychází kontaktní síla na

jeden palec přibližně:

$$F_k = \left( \frac{10 \cdot 10^{-4}}{100 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{0,6}} = 46,42 \text{ N}$$

Nyní stanovíme rozměry kontaktních palců. Ze známého průřezu ramene, určíme potřebný průřez pro jeden kontaktní palec. Celkový průřez palců by měl být roven nebo vyšší než průřez trubkového vodiče. Předběžný průřez jednoho palce se tak stanoví jako:

$$S_p' = \frac{S_r}{n} = \frac{1256,64}{8} = 157,08 \text{ mm}^2$$

Pro stanovení tloušťky a šířky palce vycházíme ze známého přibližného průřezu palce a poměru stran palce. Tento poměr nebude nakonec dodržen vzhledem k tomu, že by poté šířka palce vycházela příliš velká.

$$S_p = x \cdot y$$

$$y \approx 2 \cdot x$$

V prostředí Excelu byly vyzkoušeny různé možnosti a nakonec jsem zvolila tloušťku palce  $x = 8 \text{ mm}$  a šířku  $y = 20 \text{ mm}$ . A nový průřez palce nyní bude:

$$S_p = 8 \cdot 20 = 160 \text{ mm}^2$$

Podmínka většího průřezu byla splněna, a tedy nebyla překročena povolená proudová hustota vodičem.

### 5.3.2 Návrh kontaktní pružiny

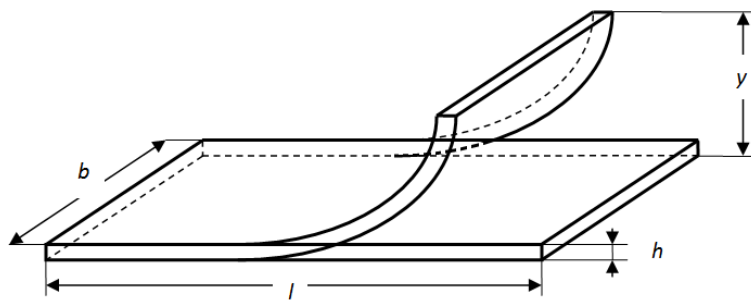
Uvažována je plochá listová pružina o obdélníkovém průřezu. Materiál pružiny je nerezová ocel. Základní rozměry pružiny jsou uvedeny v tabulce. Jedná se o mechanický návrh pružinového tělesa za pomoci zákonů mechaniky [11].



**Tab. 1 1 – Rozměry kontaktní pružiny**

Výška pružiny (=výška palce)	$b = 20 \text{ mm}$
Délka pružiny	$l_{pr} = 120 \text{ mm}$
Přítlačná síla	$F = 46,42 \text{ N}$

Hledaná hodnota je tloušťka pružiny  $h$ . Na obrázku jsou vyznačeny ostatní rozměry z tabulky. Tloušťka pružiny musí být dostatečně široká, aby při působení kontaktní síly nebyla překročena mez pružnosti pro daný materiál. Pro vypočítané rozměry poté spočítáme průhyb pružiny, který závisí na velikosti a směru působení síly  $F$ , modulu pružnosti v tahu  $E$ , momentu setrvačnosti  $J_s$  a délce pružinového tělesa  $l_{pr}$  [11].

**Obrázek 1 – Listová pružina**

Průřezový modul v ohybu lze podle [11] spočítat jako:

$$W_0 = \frac{F \cdot l}{k} = \frac{46,42 \cdot 120}{50} = 111,936 \text{ mm}^3$$

Kde:

$k$  ...mez pružnosti pro ocel 50 N/mm<sup>2</sup>

Tloušťka pružiny:

$$h = \sqrt{\frac{6 \cdot W_0}{b}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 111,936}{20}} = 5,79 \text{ mm} \doteq 6 \text{ mm}$$

Průhyb:

$$Y = \frac{2 \cdot \left(\frac{1}{2} l_{kh}\right)^3 \cdot F_k}{3 \cdot h \cdot W_0 \cdot E} = \frac{2(0,5 \cdot 0,24)^3 \cdot 46,42}{3 \cdot 0,006 \cdot 111,936 \cdot 10^{-9} \cdot 22 \cdot 10^{10}} = 3,39 \text{ mm}$$

## 5.4 Kontrola oteplení

### 5.4.1 Rameno odpojovače

Pro výpočet odporu ramene, na kterém se ztratí část přivedené energie ve formě tepla, platí vzorec pro klasické Jouleovy ztráty. Při kontrole oteplení není uvažována tepelná závislost odporu (měrné rezistivity), předpokládá se tedy oteplení v ustáleném stavu.

$$R_{ss} = \rho_{Al} \cdot \frac{l_r}{S_r} \quad (5.4.1)$$

$$R_{ss1} = 2,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{450 \cdot 10^{-3}}{1256,64 \cdot 10^{-6}} = 10,03 \mu\Omega$$

Pro druhé rameno vyjde hodnota odporu  $R_{ss2} = 11,36 \mu\Omega$ . Jelikož oteplování bude způsobeno střídavým proudem, je dobré uvažovat, pro přesnější výpočet, také změnu rozložení proudové hustoty vlivem skin efektu. Zavede se takzvaný koeficient zhuštění  $k_{zh}$ , který se pro vodič kruhového profilu (trubka) určí pomocí nomogramu (viz příloha).

$$k_{zh} = 1,04$$

Určující hodnoty koeficientu zhuštění:

$$\frac{t}{\alpha} = \frac{a}{d_1} = \frac{10}{50} = 0,2$$

$$\sqrt{\frac{S_r \cdot f}{\rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{1256,64 \cdot 10^{-6} \cdot 50}{2,8 \cdot 10^{-8}}} = 1498$$

Korekci původně vypočítaného elektrického odporu získáváme přesnější hodnotu odporu.

$$R_{st1} = k_{zh} \cdot R_{ss} = 1,04 \cdot 10,03 = 10,43 \mu\Omega$$

Pro druhé rameno je  $R_{st2} = 11,82 \mu\Omega$ .

Ze vztahu pro oteplení proudové dráhy vyplývá, že v čase  $t \rightarrow \infty$  je  $\frac{d\vartheta}{dt} = 0$  a proto můžeme oteplení jmenovitým proudem vyjádřit jednoduše jako:

$$\Delta\vartheta = \frac{R_{st1} \cdot I_n^2}{\alpha_o \cdot A} = \frac{10,03 \cdot 10^{-6} \cdot 1600^2}{12 \cdot 70685,835 \cdot 10^{-6}} = 30,27 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Kde:

$A$  ... je ochlazovací povrch tělesa

$$A = \pi d_1 \cdot l_{r1} = \pi \cdot 50 \cdot 450 = 70685,835 \text{ mm}^2$$

$\alpha_o$  ... je součinitel přestupu tepla ( $12 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )

Pro druhé rameno vychází oteplení  $\Delta\vartheta = 31,51 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Pro tepelné účinky krátkodobého zkratového proudu zanedbáváme odvod tepla do okolí vzhledem k době trvání zkratového děje. Oteplení proudové dráhy bude stanoveno pro dobu průchodu zkratového proudu 1 s a 3 s. Oteplení vyjádříme z rovnice (5.4.2):

$$R \cdot I_k^2 \cdot t_k = c_v \cdot V_r \cdot \Delta\vartheta \quad (5.4.2)$$

Pro první rameno vyjde tedy oteplení:

$$t_k = 1 \text{ s} : \Delta\vartheta = \frac{R_{st1} \cdot I_k^2 \cdot t_k}{c_{vAl} \cdot V_{r1}} = \frac{10,43 \cdot 10^{-6} \cdot 31500^2 \cdot 1}{2,4 \cdot 10^6 \cdot 565488 \cdot 10^{-9}} = 7,63 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t_k = 3 \text{ s} : \Delta\vartheta = 22,88 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Kde:

$V_{r1}$  ... je objem prvního ramene

$$V_{r1} = S_r \cdot l_{r1} = 1256,64 \cdot 450 = 565488 \text{ mm}^3$$

$c_v$  ..je měrná tepelná kapacita (pro hliník  $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ Jm}^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

Pro druhé rameno jsou oteplení:

$$t_k = 1 \text{ s} : \Delta \vartheta = 7,63 \text{ }^\circ\text{C} ,$$

$$t_k = 3 \text{ s} : \Delta \vartheta = 22,88 \text{ }^\circ\text{C} .$$

### 5.4.2 Kontaktní palce

Podobně jako pro ramena odpojovače stanovíme oteplení pro kontaktní palce. Maximální dovolené oteplení postříbřených kontaktů na vzduchu je  $65^\circ\text{C}$ . Zde bude opět nutné respektovat rozdělení proudu do jednotlivých palců. Ztrátové teplo se nyní skládá ze dvou částí. Jedna část tepla vzniká průchodem proudu vodičem kontaktního palce a druhá část se vyvine v místě styku mezi palcem a kontaktním roubíkem. Velikost stykového odporu byla stanovena při výpočtu kontaktní přitlačné síly.

Pro odpor proudové dráhy palce platí:

$$R_p = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_p}{S_p} = 1,786 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{180 \cdot 10^{-3}}{160 \cdot 10^{-6}} = 20,09 \text{ } \mu\Omega$$

Kde:

$l_p$  ...je délka palce

$$l_p = \frac{3}{4} l_{kh} = 0,75 \cdot 240 = 180 \text{ mm}$$

Pro výpočet oteplení máme vztah:

$$\frac{R_s \cdot I_{ni}^2}{2} + R_p \cdot I_{ni}^2 = \alpha_o \cdot A_p \cdot \Delta \vartheta \quad (5.4.3)$$

Kde:

$A_p$  ...chladící povrch palce (uvažuje se jen polovina celkové plochy)

$$A_p = (x + y)l_p = (8 + 20) \cdot 180 = 5040 \text{ mm}^2$$

Vyjádřením oteplení z rovnice (5.4.3) poté dostáváme oteplení pro kontaktní palec jmenovitým proudem:

$$\Delta \vartheta = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1600}{8}\right)^2}{2 \cdot 12 \cdot 5040 \cdot 10^{-6}} + \frac{20,09 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{1600}{8}\right)^2}{12 \cdot 5040 \cdot 10^{-6}} = 33,07 + 13,29 = 46,36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$V_p$  ...objem palce

$$V_p = x \cdot y \cdot l_p = 8 \cdot 20 \cdot 180 = 28800 \text{ mm}^3$$

Oteplení:

$$t_k = 1 \text{ s} : \Delta \vartheta = \frac{R_p \cdot I_{ki}^2 \cdot t_k}{c_{vCu} \cdot V_p} = \frac{20,09 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{31500}{8}\right)^2 \cdot 1}{3,4 \cdot 10^6 \cdot 28800 \cdot 10^{-9}} = 3,18 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

$$t_k = 3 \text{ s} : \Delta \vartheta = 9,54 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

### 5.4.3 Shrnutí

Oteplení $\Delta \vartheta [^\circ\text{C}]$	Rameno odpojovače		Kontaktní hlavice	
	Jmenovitý proud $I_{ni}$	Krátkodobý zkratový proud $I_{ki}$	Jmenovitý proud $I_{ni}$	Krátkodobý zkratový proud $I_{ki}$
<b>Levé rameno</b>	30,27	7,63 (1s)	46,36	3,18 (1s)
		22,88 (3s)		
<b>Pravé rameno</b>	31,51	7,63 (1s)		9,54 (3s)
		22,88 (3s)		

Maximální oteplení:

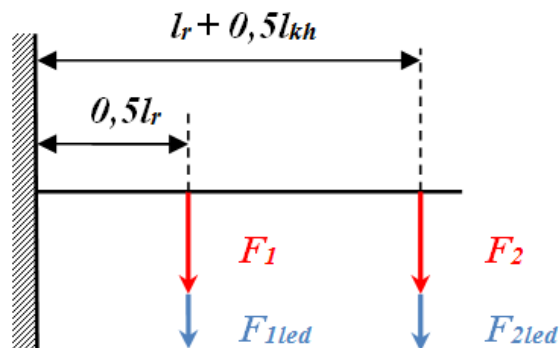
$$\Delta \vartheta_{r1\_max} = 30,27 + 22,88 = 53,15 \text{ } ^\circ\text{C} , \Delta \vartheta_{r2\_max} = 31,51 + 22,88 = 54,31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta \vartheta_{p\_max} = 46,36 + 9,54 = 55,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Maximální oteplení nepřekročila  $65^\circ\text{C}$  a proto takto navržený odpojovač vyhovuje pro kontrolu oteplení.

## 5.5 Mechanické namáhání ramene

Pro kontrolu navržené proudové dráhy poslouží dále zkouška na mechanické namáhání. Rameno musí vydržet zátěž vlastní vahou, ale i mechanické zatížení při námraze, která je normou definovaná na 20 mm. Dalším faktorem je tlak větru, který je rovněž stanoven v normě a to na 700 Pa. Vlivem průchodu zkratových proudů musí odpojovač také odolat namáhání dynamickými silami. Řešená úloha se dá popsat jako ohyb vetknutého nosníku.



Obr. 3 – mechanické namáhání ve vertikálním směru

Nejprve stanovíme hmotnosti jednotlivých částí podle známého vzorce:  $m = V \cdot \rho$ .

Tab. 5.1 – Hmotnosti proudové dráhy

Hmotnost levého ramene $m_{r,1}$	1,53 kg
Hmotnost pravého ramene $m_{r,2}$	1,73 kg
Hmotnost kontaktní hlavice $m_{kh}$	3,09 kg

Mechanický moment potom stanovíme jako součin síly a délky ramene, na kterém síla působí.

Působíště sil je ve středu příslušných délek:

$$M = F \cdot r \text{ [Nm]} \quad (5.5.1)$$

Velikost síly získáme z Newtonova zákona. Já již rovnou dosazuji do vztahu (5.5.1):

$$M_1 = m_{r1} \cdot g \cdot \frac{l_{r1}}{2} = 1,53 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,45}{2} = 3,38 \text{ Nm}$$

$$M_{r2} = m_{r2} \cdot g \cdot \frac{l_{r2}}{2} = 1,73 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,51}{2} = 4,33 \text{ Nm}$$

$$M_2 = m_{kh} \cdot g \cdot \left( l_{r1} + \frac{l_{kh}}{2} \right) = 3,09 \cdot 9,81 \cdot \left( 0,45 + \frac{0,24}{2} \right) = 17,28 \text{ Nm}$$

Nyní zohledníme přírůstek váhy díky vrstvě ledu na povrchu ramene odpojovače:

$$m_{led} = V_{led} \cdot \rho_{led}$$

$$V_{r1\_led} = \pi \cdot \left( \left( \frac{d_1}{2} + 0,01 \right)^2 - \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 \right) \cdot l_{r1} = 8,48 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$V_{kh\_led} = l_{kh} \cdot \left( 2v_{kh} + 3 \frac{d_1}{2} \right) \cdot 0,01 = 0,24 \cdot \left( 2 \cdot 0,12 + 3 \cdot \frac{0,05}{2} \right) \cdot 0,01 = 7,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

**Tab. 5.2 – Hmotnosti ledu**

Hmotnost ledu levého ramene $m_{r1\_led}$	0,81 kg
Hmotnost ledu pravého ramene $m_{r2\_led}$	0,91 kg
Hmotnost ledu na kontaktní hlavici $m_{kh\_led}$	0,72 kg

Mechanické momenty získáme stejným vztahem jako u předchozího výpočtu a délky ramen jsou zobrazeny na (Obr.4):

$$M_{1\_led} = m_{r1\_led} \cdot g \cdot \frac{l_{r1}}{2} = 0,81 \cdot 8,91 \cdot \frac{0,45}{2} = 1,79 \text{ Nm}$$

$$M_{2\_led} = m_{kh\_led} \cdot g \cdot \left( l_{r1} + \frac{l_{kh}}{2} \right) = 0,72 \cdot 8,91 \cdot \left( 0,45 + \frac{0,24}{2} \right) = 4,03 \text{ Nm}$$

Tlak větru je tedy stanoven jako  $p_w = 700 \text{ Pa}$ . Plocha, na kterou působí, je předpokládána jako rovná plocha o rozměrech délky a šířky odpojovače:

$$M_w = p_w \cdot (S_r + S_{kh}) \cdot r = 700 \cdot (0,05 \cdot 0,45 + 0,12 \cdot 0,24) \cdot \frac{1}{2} \cdot (0,45 + 0,24) = 12,39 \text{ Nm}$$

Pro elektrodynamickou sílu uvažuji podle [11] sílu na střední vodič, protože tam se namáhání projeví největší silou:

$$F_d = \frac{2l}{a} \cdot \sqrt{3} I_d^2 \cdot 10^{-7} \quad (5.5.2)$$

Výsledná síla je:

$$F_d = \frac{2(0,45 + 0,75 \cdot 0,24)}{2,137} \sqrt{3} \cdot 80000^2 \cdot 10^{-7} = 653,59 \text{ N}$$

Moment elektrodynamické síly:

$$M_d = F_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( l_{r1} + \frac{3}{4} l_{kh} \right) = 653,59 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( 0,45 + \frac{3}{4} \cdot 0,24 \right) = 205,88 \text{ Nm}$$

Pro výpočet celkového mechanického momentu je nutné provést součet zvlášť na jednotlivých rovinách působení sil. Konečný moment se stanoví jako vektorový součet.

Moment ve vertikální rovině:

$$M_{vv} = M_1 + M_2 + M_{1\_led} + M_{2\_led}$$

$$M_{vv} = 3,38 + 17,28 + 1,79 + 4,03 = 26,48 \text{ Nm}$$

Moment v horizontální rovině:

$$M_{vh} = M_w + M_d$$

$$M_{vh} = 12,39 + 205,88 = 218,27 \text{ Nm}$$

Výsledný moment:

$$M_v = \sqrt{M_{vv}^2 + M_{vh}^2} = \sqrt{26,48^2 + 218,27^2} = 219,88 \text{ Nm}$$

Průřezový modul v ohybu pro mezikruží:

$$W_0 = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_1^4 - d_2^4}{d_2} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{0,05^4 - 0,03^4}{0,03} = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$



Mechanické namáhání:

$$\sigma = \frac{M_v}{W_0} \leq \sigma_{dov}$$

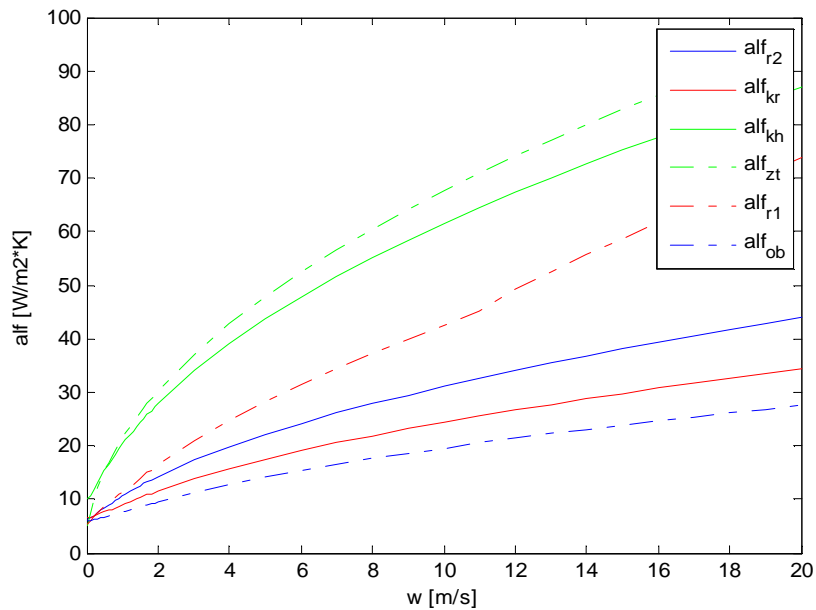
$$\sigma = \frac{219,88}{1,78 \cdot 10^{-5}} = 12,35 \text{ MPa}$$

Dovolené mechanické namáhání pro hliník je  $\sigma_{dov} = 130 \text{ MPa}$ . Navržený odpojovač vyhovuje podmínce mechanického namáhání.

## 6 Simulace oteplování proudové dráhy

Simulace byla provedena v prostředí programu MATLAB v nástavbě Simulink, kde byl sestaven model proudové dráhy odpojovače obsahující prvky respektující kondukcii, sálání a ochlazování prouděním. Z tohoto důvodu, byly stanoveny součinitelé přestupu tepla pro různé části proudové dráhy odpojovače. Tyto hodnoty byly poté zaneseny do modelu v Simulinku. Použita byla teorie podobnosti, podle které bylo možné součinitele spočítat.

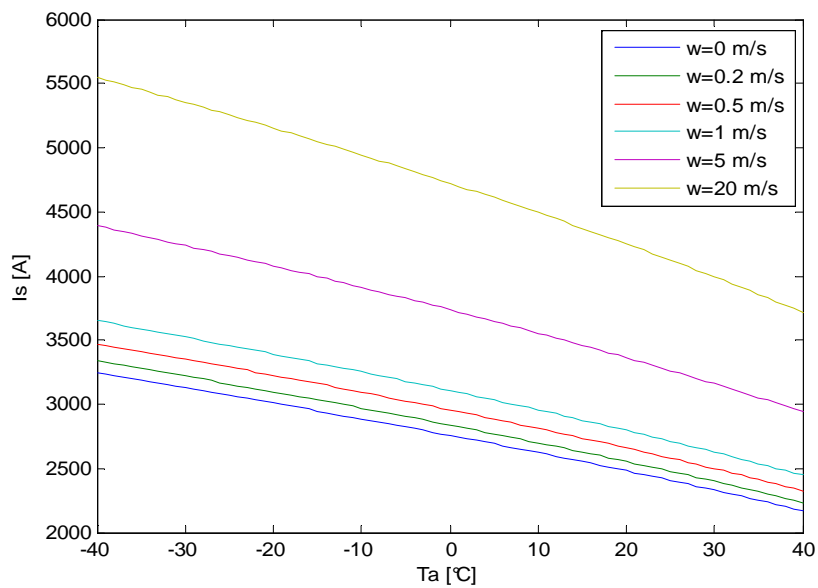
Graf 6 – Závislost velikosti součinitele přestupu tepla na teplotě okolí



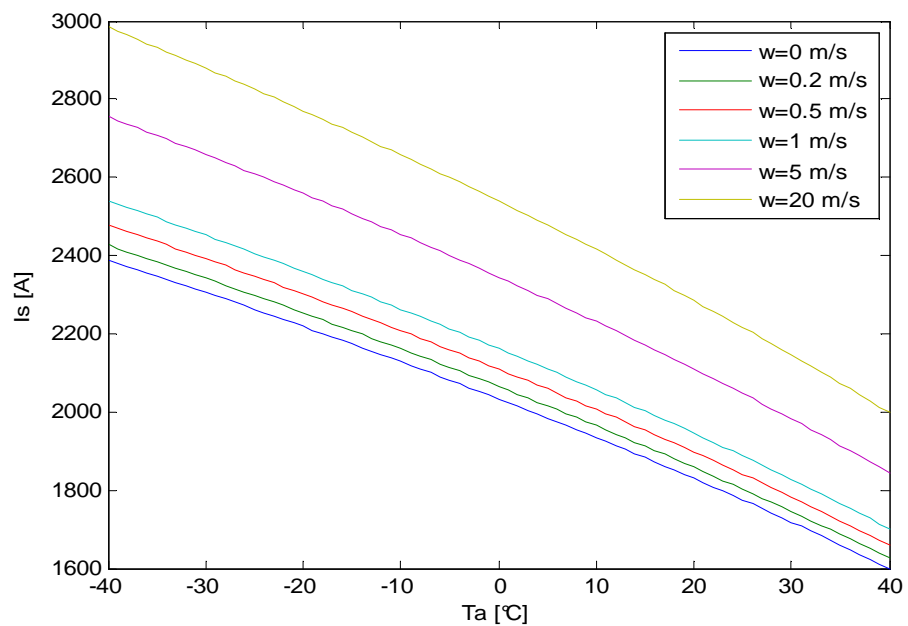
$r1$ ...levé rameno,  $r2$ ...pravé rameno,  $kr$ ...kontaktní roubík,  $zt$ ...základové těleso,  $ob$ ...objímka,  $kh$ ...kontaktní hlavice

Na základě zavedení závislosti na rychlosti větru, bylo potom možné sledovat dovolený proud odpojovačem při teplotách okolí od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+40^{\circ}\text{C}$ .

**Graf 7 – Závislost dovoleného proudu na teplotě okolí při proměnné rychlosti větru**



**Graf 8 – Závislost dovoleného proudu na teplotě okolí při proměnné rychlosti větru**

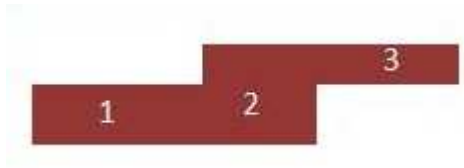


## 6.1 Metoda tepelné sítě

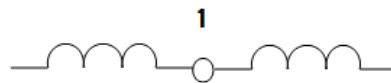
Tato metoda se ve své podstatě zakládá na analogii mezi elektrickým a tepelným obvodem. Tepelný tok odpovídá elektrickému proudu, tepelný odpor je podobný elektrickému odporu a rozdíl elektrických potenciálů odpovídá rozdílu teplot (oteplení). První krok k vytvoření tepelné sítě, je rozdělení dané části proudové dráhy na tzv. uzly. Každý uzel symbolizuje tepelné vlastnosti daného úseku, jako jsou tepelná kapacita, tepelný odpor, tepelná vodivost atd. Uzly jsou vzájemně propojeny a tato spojení zahrnují odvod tepla vedením, prouděním a sáláním.

Volba samostatného uzlu se provádí všude tam, kde dochází ke změně průřezu vodiče, na místech spojení dvou a více vodičů, na kontaktech spínacích přístrojů nebo při velkých délkách vodiče se tato část rozdělí na více uzlů pro větší přesnost výpočtu.

Do uzlu, ve kterém se vyvíjí teplo, například ztráty na odporu průchodem proudu, se injektuje tepelný tok. Mezi uzly se nacházejí tepelné odpory, které představují vedení tepla. Část tepla do uzlu vchází z předchozího uzlu a část odchází do uzlu následujícího.



(Obr.4)



(Obr.5)

Na (Obr. 4) je znázorněno rozdělení uzlů ve vodiči proměnného průřezu a na (Obr. 5) jsou tepelné odpory uzlu 1 charakterizující vedení tepla. Pro každý uzel se stanoví uzlové rovnice, které zahrnují teplo přiváděné a teplo odváděné. Zde se opět jedná o ekvivalent s I. Kirchhoffovým zákonem, že součet proudů vstupujících do uzlu a vystupujících z uzlu se rovná nule. Příklad rovnice pro  $n$ -tý uzel je:

$$Q_{R1^2} + Q_{n-1} = Q_{n+1} + Q_{\alpha} \quad (6.1.1)$$

Kde:

$Q_{RI^2}$  ...jsou tepelné ztráty

$Q_{n-1}$  ...je teplo přivedené z předcházejícího uzlu

$Q_{n+1}$  ...je teplo odvedené do následujícího uzlu

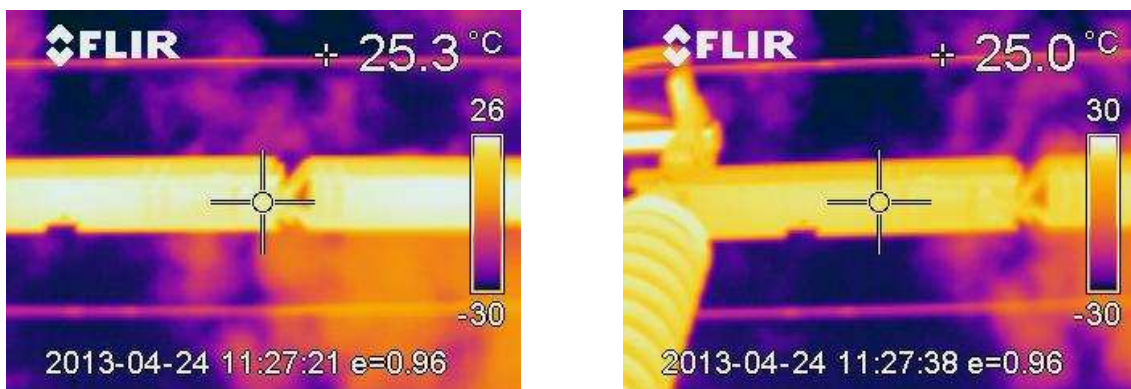
$Q_{\alpha}$  ...teplo odvedené do okolí

Speciální případ tvoří uzly pro spoje a kontaktní místa. Zde se zanedbává chlazení prouděním, protože vnitřní strany spojů nejsou vystaveny okolí. Dále se zde započítávají přídatné ztráty na stykovém odporu, což vede ke zvýšenému oteplení.[13]

## 6.2 Měření termovizí

Pro měření povrchové teploty proudové dráhy odpojovače může dobře posloužit termovizní kamera, která proměřuje teploty v různých bodech povrchu vodiče. Snímá také hodnoty okolního teplotního pole a umožňuje nastavení parametrů dle referenční teploty, což bývá teplota okolí, a podle kvality a druhu snímaného povrchu.

Na (Obr. 4) je možno vidět proměřování oteplení odpojovače vvn 123 kV se jmenovitým proudem 2000 A. Měření probíhalo v poledne za rychlosti proudění vzduchu 0,9 m/s a při teplotě okolí 24 °C. Oteplení bylo velmi nízké z důvodu velmi malého zatížení. V době měření tekla odpojovačem proud 127,74 A, což je pouhých 6% jmenovitého proudu.



Obr. 6

## **7 Závěr**

Vliv okolního prostředí na proudovou kapacitu odpojovačů nelze při návrhu jeho proudové dráhy zanedbávat. Má-li být návrh odpojovače vyhovující nejen z konstrukčního hlediska, ale také z ekonomického, je dobré tento vliv zahrnout. V opačném případě by mohlo dojít k předimenzování proudové dráhy, což by mohlo vést na zbytečně velké náklady při výrobě odpojovače. Orientace tímto směrem, tedy ke snižování nákladů na výrobu, je v dnešní době silnější, než tomu bylo dříve, a proto by stanovení předběžné proudové zatížitelnosti pro danou lokalitu bylo výhodou.

Dále je možné určit dobu, po kterou je daný odpojovač schopen snášet proud vyšší, než je jeho jmenovitá hodnota. Tato doba narůstá s klesající teplotou okolí. To je uvedeno v kapitole 3.2 této práce, kde možnost zatížení proudem vyšším, než jmenovitý proud, pro odpojovač 123 kV a 1600A stoupla po poklesu teploty okolí na 0°C o téměř 1h. Proto je v zimních měsících, kdy teplota klesá pod bod mrazu, možné odpojovač krátkodobě přetížít i hodnotami daleko vyššími, než je jmenovitý proud přístroje. Také při dobrých povětrnostních podmínkách, kdy se zvyšuje odvod tepla z povrchu proudové dráhy, klesá rychlost nárůstu oteplení. Z tohoto hlediska jsou teoretické předpoklady užitečné pro navrhování odpojovače pro konkrétní umístění, kde víme, jaké průměrné podmínky okolí očekávat. Je ovšem nutné, výpočty zpřesňovat měřeními na reálných odpojovačích, protože velice záleží na typu proudové dráhy, na přístupu proudění vzduchu k jednotlivým částem a na stavu rozrušení povrchu proudové cesty konkrétního přístroje.

## 8 Literatura

- [1] HAVELKA, O.: *Elektrické přístroje*. SNTL, Praha, 1985.
- [2] RUSŇÁK, Š., ŘEZÁČEK, P.: *Elektrické přístroje 1*. ZČU, Plzeň, 2001. ISBN 80-7082-825-0.
- [3] BÁRTA, K., VOSTRACKÝ, Z.: *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*. SNTL, Praha, 1983
- [4] KADERA, M.: *Optimalizace proudové dráhy odpojovače vvn a inovace konstrukčního řešení*.
- [5] BRUTHANS, K.: *Návrh a teoretický model proudové dráhy odpojovače*. Plzeň, 2007. Diplomová práce. ZČU, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky.
- [6] MICHEJEV, M., A.: *Základy sdílení tepla*. Průmyslové vydavatelství, Praha, 1952.
- [7] ČERNOCH, S.: *Strojně technická příručka 1*. SNTL, Praha, 1977.
- [8] ŠNAJDR, J.: *Ohřev vodičů přenosových linek v dynamickém režimu*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie.
- [9] SAZIMA, M.: *Tabulky sdílení tepla*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1980.
- [10] SAZIMA, M.: *Sdílení tepla*. Vydavatelství ČVUZ, Praha, 1977.
- [11] CIGÁNEK, L.: *Elektrické přístroje spínací, ochranné a řídicí*. SNTL, Praha, 1956.
- [12] MERTLOVÁ, J., NOHÁČOVÁ, L.: *Elektrické stanice a vedení*. ZČU, Plzeň, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7
- [13] KRISHNA S., CH.: *Thermal network theory for switchgear under continuous current*. National Institute of Technology. Rourkela, 2007
- [14] Ingenieure, Verein Deutscher. *VDI Heat Atlas*. 2. edice. Berlin : Heidelberg Springer, 2010.

### Internetové odkazy:

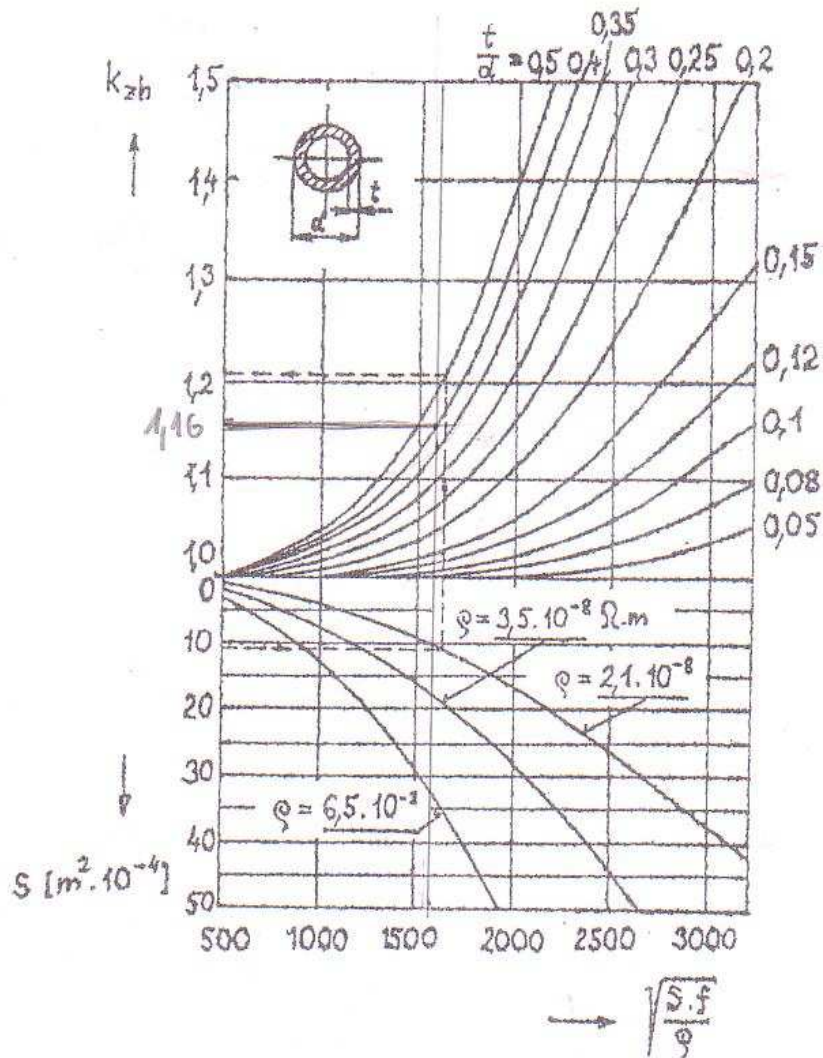
- [15] POPELKA, A., BÖHM, V., JURÍK, D., MARVAN, P.: *Ampacita vedení a možnosti jejího on-line vyhodnocování* [online]. Poděbrady, 2010. [cit. 12-12-2012]. Dostupný z WWW: <<http://www.ais-brno.cz/clanky/Ampacita.pdf?lang=cz>>
- [16] SERW [online]. [cit. 10-02-2013]. Dostupný z WWW: <<http://www.serw.cz/>>
- [17] ALFUN [online]. [cit. 11-12-2012]. Dostupný z WWW: <<http://www.alfun.cz/sortiment/hlinik/tyce-a-profilu/kruhove-trubky>>

**Seznam použitých norem:**

- ČSN EN 62271-1. *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 1: Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- ČSN EN 62271-102. *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu na napětí 1 000 V*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- ČSN EN 62271-104. *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 104: Spínače střídavého proudu pro jmenovitá napětí 52 kV a vyšší*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

## 9 Přílohy

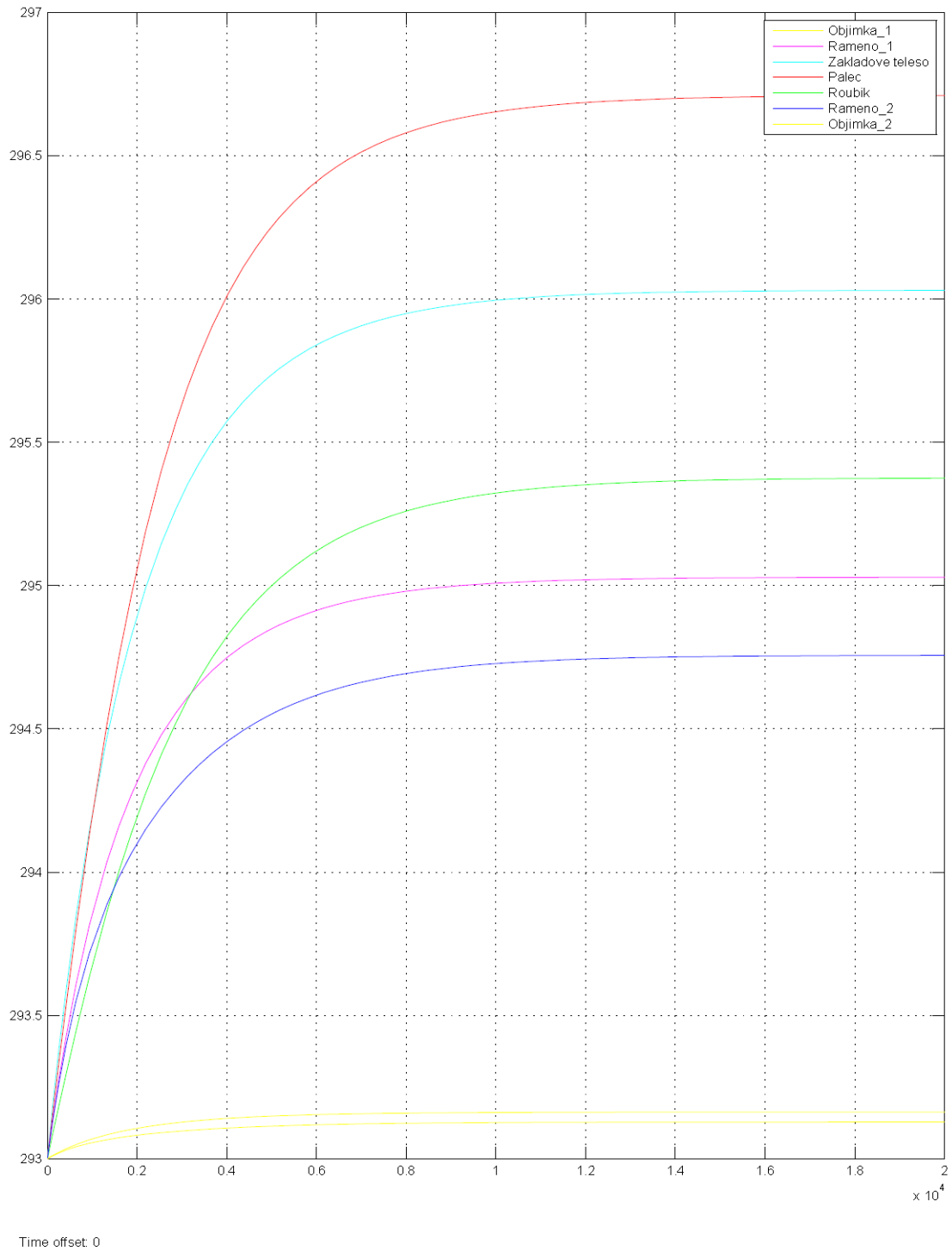
### Příloha A – Nomogram pro určení koeficientu zhuštění



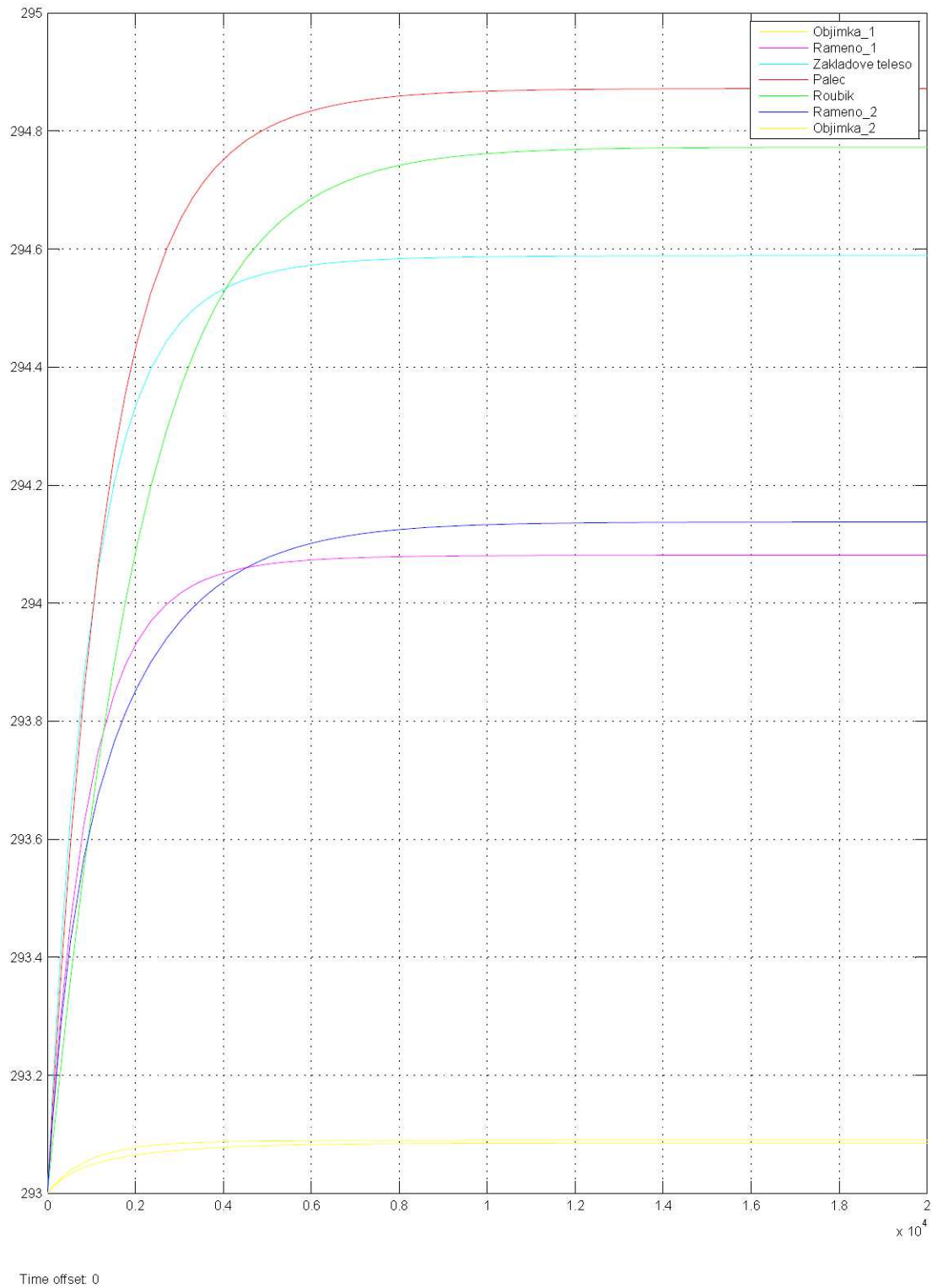
Nomogram pro výpočet činitele povrchového zhuštění střídavého proudu  $k_{zh} = fce \left( \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho}} \right)$



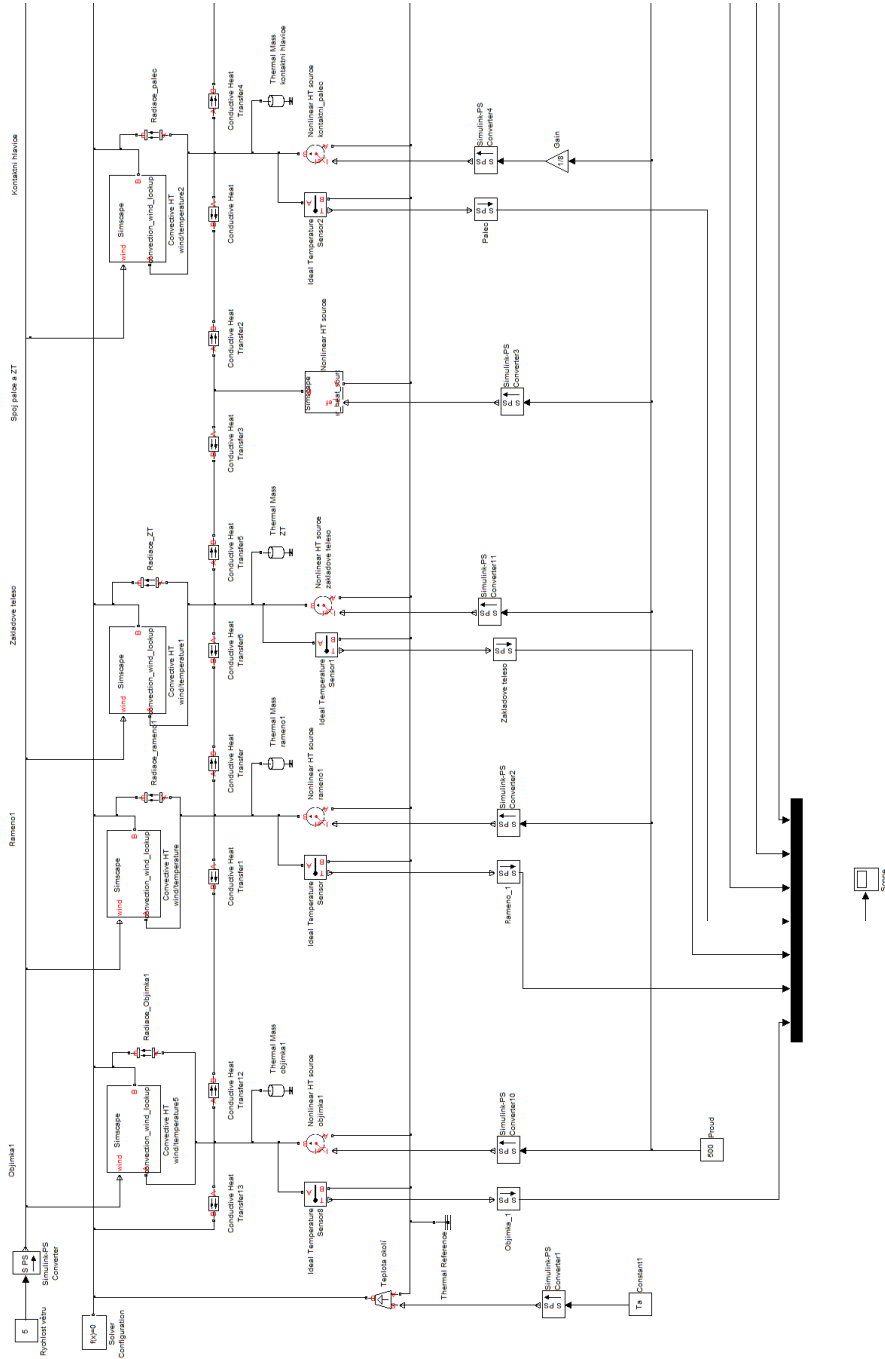
**Příloha B – Průběh oteplení proudové dráhy odpojovače pro teplotu okolí  $\vartheta_a = 20^\circ\text{C}$  a rychlosti větru  $w = 0\text{ m/s}$ .**



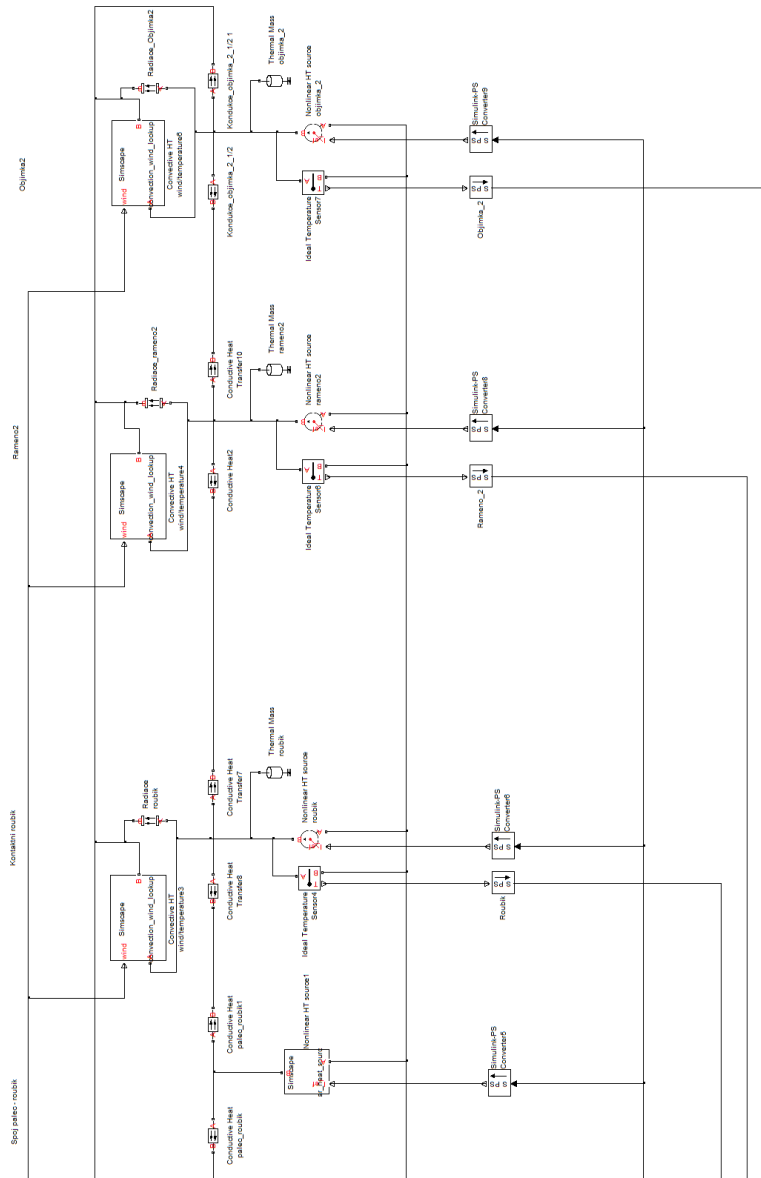
**Příloha C - Průběh oteplení proudové dráhy odpojovače pro teplotu okolí  $\vartheta_a = 20^\circ\text{C}$  a rychlosti větru  $w = 5\text{ m/s}$ .**



Příloha D - Model odpojovače v Simulinku 1. část



Příloha E – Model odpojovače v Simulinku 2. část



Příloha F – Model odpojovače v Simulinku celé

