

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Numerická analýza oteplení proudové dráhy – metoda
tepelné sítě**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David POLÁČEK**

Osobní číslo: **E15N0111P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

Název tématu: **Numerická analýza oteplení proudové dráhy - metoda tepelné sítě**

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 teoretický úvod zaměřený na problematiku oteplení proudové dráhy elektrického zařízení a metod výpočtu oteplení.
2. Vytvořte model tepelné sítě pro zadanou proudovou dráhu, proveďte numerický výpočet.
3. Analyzujte a zhodnoťte realizovaný výpočet a vypočtené výsledky.
4. Navrhněte možná opatření vedoucí ke zlepšení chlazení elektrického zařízení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Rada, Josef. Elektrotepelná technika. 1. vyd. Praha : SNTL, 1985.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**


Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


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




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

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou oteplení proudové dráhy se zaměřením na numerickou analýzu metodou tepelné sítě. K modelování je využit program Simulink, nadstavba programu MATLAB, se zavedeným modulem PLECS pro elektrické obvody. Je zde z navrženého základního článku vytvořen model tepelné sítě odpojovače respektující teplotní závislost ztrát a přestupu tepla do okolí.

Klíčová slova

Metoda tepelné sítě, přestup tepla, oteplení, analýza oteplení, analýza chlazení odpojovač

Abstract

This thesis describes the issue of heating of current path with a focus on numerical analysis by the method of thermal network. The modeling program used Simulink, MATLAB extension, with PLECS installed for electrical circuits. In the thesis is a model of the thermal network of the disconnecter, which respects the temperature dependence of the losses and the transfer of heat to the surroundings.

Key words

Thermal network method, heat transfer, heating, analysis of heating, analysis of cooling, disconnecter

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 19.5.2017

Bc. David Poláček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Janu Sedláčkovi Ph.D. za cenné rady a připomínky, zapůjčení literatury a především za ochotu a čas, který strávil vedením mé práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 OTEPLENÍ PROUDOVÉ DRÁHY	12
1.1 TEPELNÉ ÚČINKY PROUDU.....	13
1.2 ODPOR VODIČE.....	13
1.3 VLIV POVRCHOVÉHO JEVU.....	14
1.4 VLIV BLÍZKOSTI VODIČŮ.....	16
1.5 OCHLAZOVÁNÍ PROUDOVÉ DRÁHY.....	16
1.6 OCHLAZOVÁNÍ VEDENÍM.....	17
1.7 OCHLAZOVÁNÍ PROUDĚNÍM.....	18
1.8 OCHLAZOVÁNÍ SÁLÁNÍM.....	22
1.9 MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA.....	24
1.10 OTEPLENÍ PROUDOVÉ DRÁHY VODIČE.....	25
1.11 PROBLEMATIKA ELEKTRICKÉHO KONTAKTU.....	27
1.12 OTEPLENÍ ELEKTRICKÉHO KONTAKTU.....	31
2 METODY VÝPOČTU OTEPLENÍ	34
2.1 TEPELNÉ POLE.....	34
2.2 METODA TEPELNÉ SÍTĚ.....	37
3 SIMULACE ODPOJOVAČE	43
3.1 MODEL TEPELNÉ SÍTĚ.....	45
3.2 VÝSLEDKY A ANALÝZA SIMULACE.....	52
3.3 POROVNÁNÍ S REÁLNÝM MĚŘENÍM.....	59
4 MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ CHLAZENÍ	62
4.1 MOŽNOSTI ZLEPŠENÍ CHLAZENÍ ODPOJOVAČE.....	63
ZÁVĚR	64
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	65
PŘÍLOHY	1

Úvod

Oteplení proudové dráhy elektrických zařízení je jedním z parametrů návrhu. Jeho znalost je důležitá pro jeho funkci, spolehlivost, bezpečnost a životnost zařízení. Analýza tepelného rozložení nejen u elektrických přístrojů je v mnoha případech stěžejní oblastí. Z toho důvodu je nezbytné ji věnovat dostatečnou pozornost.

V této práci se zabývám problematikou oteplení proudové dráhy se zaměřením na metodu tepelné sítě. V teoretické části je nejprve zpracován vznik tepla a faktory, které jej ovlivňují. Dále jsem uvedl způsoby sdílení tepla, jejich vliv a matematický popis. Na to jsem navázal popisem jednoduchého modelu oteplení vodiče. Pro kompletní představu o oteplení celé proudové dráhy jsem zpracoval problematiku elektrického kontaktu a jeho oteplení. V další části jsem se věnoval analogii mezi elektrickým a tepelným polem, čímž byla vytvořena návaznost pro představení metody tepelné sítě.

Praktická část je zaměřena na analýzu oteplení zařízení metodou tepelné sítě. Na začátku je popsán návrh základního článku, který by tvořil základní stavební prvek. Následuje tvorba dvou modelů distribučního odpojovače v provedení pro vnitřní prostory. Pro numerickou analýzu bylo potřeba vytvořit 3D model odpojovače, k čemuž jsem využil program SolidWorks. Dále byl vytvořen výpočetní skript v programu MATLAB. K modelování byla využita jeho nadstavba, program Simulink, se zavedeným modulem PLECS pro elektrické obvody. Byla provedena komparace obou modelů a druhý model byl podrobněji analyzován. Simulované výsledky byly srovnány s reálným měřením odpojovače. Na závěr jsou uvedeny možné způsoby zlepšení chlazení.

Seznam symbolů a zkratek

P_Z	Výkon ohřevu (W)
c	Měrná objemová tepelná kapacita ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)
V	Objem vodiče (m^3)
ϑ, T	Teplota (K)
ϑ_0, T_0	Teplota okolí (K)
P_o	Je výkon ochlazování (W)
Q_o	Jouleovo teplo (J)
I	Elektrický proud (A)
R	Elektrický odpor (Ω)
t	Čas (s)
ρ	Měrný elektrický odpor ($\Omega \cdot m$)
l	Délka (m)
S	Průřez proudové dráhy (m^2)
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Teplotní odporové součinitele pro referenční teplotu (K^{-1})
$\Delta\vartheta$	Teplotní rozdíl (K)
δ_{ef}	Efektivní hloubka vniku (m)
ω	Úhlová rychlost ($rad \cdot s^{-1}$)
μ	Magnetická permeabilita ($H \cdot m^{-1}$)
γ	Měrná elektrická vodivost ($S \cdot m^{-1}$)
\vec{q}	Hustota tepelného toku ($W \cdot m^{-2}$)
λ	Měrná tepelná vodivost ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
α_k	Součinitel přestupu tepla konvekcí ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
A	Plocha povrchu (m^2)
v_k	Rychlost pohybu částic ($m \cdot s^{-1}$)
h	Charakteristický rozměr tělesa (m)
ν	Kinematická viskozita ($m^2 \cdot s^{-1}$)
g	Tíhové zrychlení ($m \cdot s^{-1}$)
β	Objemový součinitel teplotní roztažnosti tekutiny (K^{-1})
c_j	Měrná tepelná kapacita ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
ϕ	Tepelný tok (W)
ε_s	Měrná emisivita povrchu tělesa (-)

λ_{max}	dominantní vlnová délka (μm)
α_s	Součinitel přestupu tepla sáláním ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
α_0	Souhrnný součinitel přestupu tepla ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
R_s	Celkový odpor kontaktu (Ω)
R_u	Odpor úžiny (Ω)
R_p	Odpor povrchových vrstev (Ω)
r_0	Poloměr dotykové plochy (m)
R_o	Poloměr ohraničující dotykovou plochu (m)
a	Poloměr elipsoidu kontaktu (m)
n	Počet stykových míst (-)
F_k	Přítlačná síla kontaktu (N)
r_k	Poloměr kuličky kontaktu (m)
E	Modul pružnosti (Pa)
k_{n1}, k_n	Konstanty kontaktu (Ω)
$m1, m2$	Konstanty kontaktu (-)
σ	Mez pevnosti v tlaku (Pa)
R_{θ}	tepelný odpor ($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
U_x	Napětí na vyšetřovaném úseku (V)
r_1	Poloměr bližší středu vodiče (m)
r_2	Poloměr dále od středu vodiče (m)
l	Délka úseku vodiče v podélném směru (m)
k_c	Činitel respektující přestup tepla kontaktu (-)
$R_{\theta l}$	Podélný odpor náhradního Π článku ($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
β	Výpočetní činitel (m^{-1})
δ	Výpočetní činitel ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$)
$R_{\theta t}$	Příčný odpor náhradního Π článku ($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
O	Obvod povrchu vodiče (m)
C_{θ}	Tepelná kapacita ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$)

1 Oteplení proudové dráhy

Oteplení proudové dráhy je jedním z důležitých parametrů, které je třeba u elektrických zařízení sledovat. Je úzce svázáno s provozním stavem, bezpečností, spolehlivostí a životností zařízení. U řady zařízení tvoří limitující faktor při jejich návrhu nebo provozu. Příliš vysoké hodnoty oteplení vedou k degradaci izolací, vodičů a vzniku poruchových stavů. Proto je nezbytné věnovat oteplení proudové dráhy dostatečnou pozornost.

Oteplení proudové dráhy závisí nejen na proudovém zatížení a odporu vodiče, ale ovlivňuje ho celá řada dalších faktorů. Významným parametrem je míra a způsob ochlazování vodiče, kde se uplatňuje několik způsobů přestupu tepla. Důležité jsou provozní podmínky, teplota okolního prostředí, kvalita kontaktů, stejně tak i další parametry jako, např. rychlost a směr větru, ohřev slunečními paprsky nebo tepelná vodivost vodiče a izolačních materiálů. Rovněž může dojít k situaci, kdy se uplatní některé fyzikální děje, např. skin efekt nebo vliv blízkosti vodičů, které mají vliv na celkový odpor vodiče.

Průchodem proudu vodičem dochází ke ztrátám, které se projevují oteplováním proudové dráhy. Část tohoto vzniklého tepla se uchovává v tělese v závislosti na teplotě materiálu, zbylá část je odváděna do okolí. V ustáleném stavu při konstantním ohřevu, kdy je teplota vodiče neměnná, je všechno vznikající teplo odváděno do okolí. U přechodových dějů, kdy je hodnota proudu časově proměnná, je třeba zohlednit tuto vlastní tepelnou kapacitu vodiče, případně i tepelné kapacity dalších částí v teplotní analýze. Pro vytvoření modelu oteplení proudové dráhy je nutné zvážit, jaké děje se v konkrétním případě uplatní, a které lze zanedbat. Jednotlivé děje je pak třeba popsat rovnicemi zohledňujícími jejich velikost a průběh působení. Pro obecný popis děje dostáváme:

$$P_z = c \cdot V \cdot \frac{d\Delta\vartheta}{dt} + P_o(\Delta\vartheta) \quad (1.1)$$

kde P_z (W) je výkon ohřevu,
 c ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$) je měrná objemová tepelná kapacita vodiče,
 V (m^3) je objem vodiče,
 ϑ (K) je okamžitá teplota vodiče,
 P_o (W) je výkon ochlazování.

1.1 Tepelné účinky proudu

Průchodem elektrického proudu vodičem vzniká teplo také označované jako Jouleovo teplo. Tento jev vzniká jako důsledek srážek elektronů způsobujících elektrický proud s částicemi, které se vedení proudu neúčastní. Srážkou je předána část kinetické energie elektronům, která způsobí tepelný pohyb těchto částic, a tedy ohřev vodiče. Při stacionárním stavu, tedy když se jedná o ustálený stejnosměrný proud nebo efektivní hodnotu ustáleného střídavého proudu, můžeme toto vytvářené teplo popsat vztahem:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1.2)$$

kde Q (J) je Jouleovo teplo,
 I (A) je elektrický proud,
 R (Ω) je elektrický odpor,
 t (s) je čas.

V případě, že průběh proudu je nestacionární, tedy v případě přechodných nebo poruchových dějů jako jsou spínací procesy nebo zkratky, vycházíme z obecné rovnice:

$$dQ = [i(t)]^2 \cdot R \cdot dt \quad (1.3)$$

kde $i(t)$ (A) je časově proměnný elektrický proud. [1], [2]

1.2 Odpor vodiče

Elektrický odpor udává schopnost vodiče vést elektrický proud. Odpor proudové dráhy závisí na rezistivitě, délce a průřezu použitého vodiče:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1.4)$$

kde ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) je měrný elektrický odpor,
 l (m) je délka proudové dráhy,
 S (m^2) je průřez vodiče.

V elektrickém obvodu za standardních podmínek, kde vodiče mají obvykle mnohem menší odpor než je impedance napájeného zařízení, se mění se odpor vodiče v počátku příliš neprojeví na proudu, ale tato změna může být významná pro oteplení vodiče. Pro vodiče je požadován materiál s co nejnižší hodnotou odporu a dobré mechanické vlastnosti - z toho důvodu jsou kovy nejpoužívanějším materiálem. U kovů se stoupající teplotou hodnota odporu nelineárně roste. Tento jev je v mnoha případech třeba zohlednit, a proto se závislost rezistivity na teplotě aproximuje vztahem:

$$\rho(\vartheta) = \rho_{ref}(1 + \alpha_1 \cdot \Delta\vartheta + \alpha_2 \cdot \Delta\vartheta^2 + \alpha_3 \cdot \Delta\vartheta^3 + \dots) \quad (1.5)$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{ref}$$

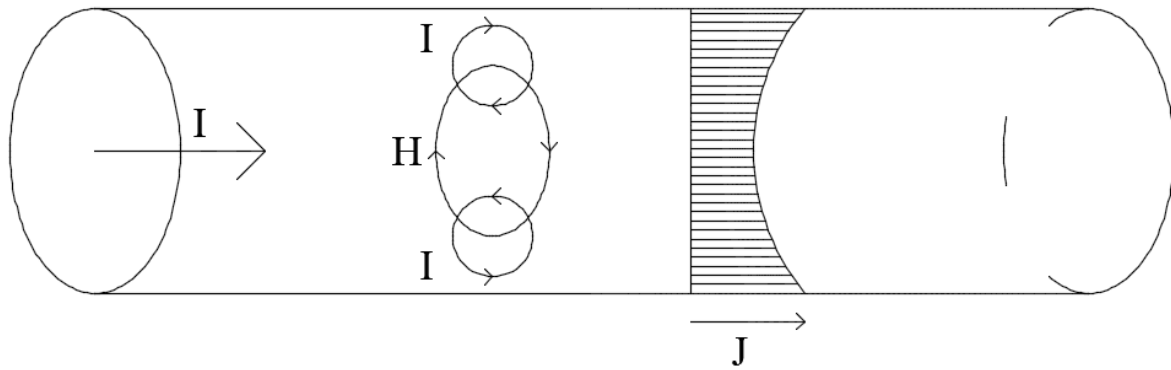
kde ρ_{ref} ($\Omega \cdot m$) je rezistivita při referenční teplotě (obvykle 20 °C),
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (K^{-1}) jsou teplotní odporové součinitele pro referenční teplotu,
 $\Delta\vartheta$ (K) je rozdíl okamžité teploty oproti referenční teplotě $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{ref}$.

V praxi se pohybujeme obvykle v oblasti několika desítek stupňů Celsia, kde si většinou vystačíme s lineární aproximací, tedy s použitím prvního odporového součinitele. [1], [3]

Vztah (1.4) pro odpor vodiče platí pro konstantní průřez. V případě, že se tato hodnota v různých částech vodiče liší, je třeba odpor vodiče počítat po částech s konstantním průřezem nebo tuto skutečnost jinak zohlednit. Pro obvyklá zúžení proudové dráhy jako je kruhový otvor nebo zářezy na povrchu, je pro specifikovaný segment proudové dráhy možno využít činitele zvětšení odporu zúžením udávaného tabulkami.

1.3 Vliv povrchového jevu

Povrchový jev neboli skinefekt je další faktor, který může nepříznivě ovlivnit odpor vodiče. Projevuje se u vodičů, kterými protéká střídavý proud. Tento procházející střídavý proud uzavírá kolem sebe siločáry magnetického toku. Část tohoto toku prochází vlastním vodičem, tedy v něm indukuje i vířivé proudy. Tyto proudy působí blíže ke středu vodiče opačným směrem než původní proud, naopak směrem k povrchu se tyto proudy vzájemně sčítají. Proudová hustota je tedy ve vodiči nerovnoměrně rozložena tak, že s vzrůstajícím vlivem skinefektu je proud vytlačován k povrchu vodiče. Navíc dochází k fázovému posuvu mezi proudovou hustotou v jednotlivých místech průřezu. [1], [4], [5]



Obr. 1.1 Vliv skin efektu podle [1], [5]

Vlivem tohoto jevu dochází k horšímu využití vodiče, a tedy k nárůstu odporu. Pro zohlednění se zavádí činitel povrchového jevu. Tento činitel zohledňuje zvýšení odporu vodiče při přenosu střídavého proudu oproti přenosu stejnosměrného proudu. Pro konkrétní výpočty se vychází ze vzorců zohledňujících profil vodiče, případně z tabulkových hodnot pro daný profil. Činitel povrchového jevu může nabývat hodnot v rozmezí 1 a více. [1], [4]

$$k_p = \frac{R_{\sim}}{R_{=}} \quad (1.6)$$

Pro posouzení vlivu skin efektu je zavedena efektivní hloubka vniku, která nám udává vzdálenost od povrchu na rozhraní ve vodiči, kde je pokles amplitudy proudové hustoty na úroveň e^{-1} (37 %). Vliv skin efektu se bude více uplatňovat s klesající efektivní hloubkou vniku. Z toho vyplývá, že tento jev se bude projevovat nejvíce u vodičů většího průřezu.

$$\delta_{ef} = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (1.7)$$

kde δ_{ef} (m) je efektivní hloubka vniku,
 ω (rad·s⁻¹) je úhlová rychlost,
 μ (H·m⁻¹) je absolutní magnetická permeabilita,
 γ (S·m⁻¹) je měrná elektrická vodivost.

Z tohoto vztahu vyplývá, že skin efekt bude narůstat tím více, čím bude větší frekvence proudu, vodivost materiálu a relativní permeabilita vodiče. Pro nejpoužívanější technické materiály vodičů Cu, Al je při frekvenci 50 Hz hloubka vniku cca 10 mm. Skin efekt se tedy uplatní u vodičů s poloměrem výrazně větším. [1], [5]

1.4 Vliv blízkosti vodičů

U paralelně položených vodičů při průchodu střídavého proudu může docházet k vzájemnému ovlivňování proudové hustoty ve vodičích. Mechanismus je podobný jako u skin efektu. Siločáry magnetického toku se uzavírají nejen vlastním, ale i blízkým vodičem, do kterého jsou tím pádem také indukovány vířivé proudy. Pokud jsou paralelní vodiče protékány shodným směrem proudu, pak tyto vířivé proudy způsobují vytlačování proudu do odlehlejších částí vodičů. Při opačném směru proudu jsou naopak proudy vytlačovány do přilehlých částí. Proudová hustota ve vodičích je dána jak vlivem skin efektu, tak vlivem blízkosti vodičů. Stejně jako u povrchového jevu, je i zde zaveden činitel vlivu blízkosti vodičů. Tento činitel může nabývat hodnot i menších než 1, může tedy v některých případech i zlepšovat nerovnoměrnost rozdělení proudů způsobenou skin efektem.

$$k_b = \frac{R_{pb}}{R_p} \quad (1.8)$$

kde $R_{pb} (\Omega)$ je odpor vodiče včetně vlivu povrchového jevu a vlivu blízkosti vodičů,
 $R_p (\Omega)$ je odpor respektující pouze vliv povrchového jevu. [1], [4]

1.5 Ochlazování proudové dráhy

Teplo se na základě II. věty termodynamické nevratně šíří vždy z místa o vyšší teplotě do míst s nižší teplotou. Rozlišujeme stacionární a nestacionární přenos tepla. Při startu zařízení nebo při změnách proudového zatížení od konstantní hodnoty stoupá teplota vodičů, a tedy i dalších částí zařízení - zde mluvíme o nestacionárním přenosu tepla. Potom je teplota funkcí souřadnic a času.

$$\vartheta = f(x, y, z, t) \quad (1.9)$$

Pokud se tento děj ustálí na konstantních hodnotách, mluvíme o stacionárním přenosu tepla, kde teplota v různých bodech je sice různá, ale nezávislá na čase, tedy tepelný tok a akumulované teplo se nemění.

$$\vartheta = f(x, y, z), \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0 \quad (1.10)$$

Rozeznáváme tři základní způsoby sdílení tepla. Jsou jimi:

- vedením (kondukcí)
- prouděním (konvekci)
- sáláním (radiací)

Všechny tyto způsoby sdílení tepla se podílí různou měrou na ochlazování proudové dráhy, jejich vliv je dále přiblížen v dalších podkapitolách. [8]

1.6 Ochlazování vedením

Sdílením tepla vedením se uskutečňuje přenos tepelné energie bezprostředně z jedné částice tělesa na druhou. Dochází zde k předávání pohybové energie částic s vyšší energií sousedním částicím s nižší energií na atomární úrovni. Vedením se teplo šíří především v tuhých tělesech, nicméně za určitých okolností se může projevit i v kapalném nebo plynném prostředí. Zde ale převládá přenos tepla prouděním. V porovnání s ostatními způsoby je vedení nejpomalejší způsob šíření tepla, ale v pevných látkách jediný možný. [8]

Rychlost šíření je dána prostředím, v kapalinách a obzvláště v plynech je tato rychlost nízká, protože jednotlivé molekuly jsou jen málo vzájemně vázané a udržují od sebe větší vzdálenost. Definuje se měrná tepelná vodivost, která charakterizuje schopnost materiálu vést teplo. Měrná tepelná vodivost vyjadřuje množství tepla, které za jednotku času projde jednotkou plochy homogenní jednotkové desky s jednotkovým teplotním spádem. V homogenním prostředí platí Fourierův zákon, který určuje hustotu tepelného toku jako:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta \quad (1.11)$$

kde \vec{q} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) je hustota tepelného toku,
 λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) je měrná tepelná vodivost. [4], [8], [9]

Ochlazování proudové dráhy vedením má dvě významné části. Jedna část pohlíží na ochlazování samotné proudové dráhy přes stykové plochy, které jsou například z mechanických důvodů spojeny s vodičem, jako jsou izolátory, šrouby a další součásti. Těmito částmi dochází k odvodu tepla v místech dotyku do dalších částí zařízení, kde je toto teplo dále odváděno pomocí proudění nebo sálání. Druhá část zkoumá rozložení teplot uvnitř vodiče a případné izolace. V případě nekonečně dlouhého rovného vodiče kruhového tvaru protékaného proudem, který není ovlivňován jevem blízkosti, bude teplotní rozložení v řezu rotačně symetrické, klesající od středu vodiče a v celé délce stejné. Nejvyšší teploty bude dosaženo ve středu vodiče, v případě vlivu jevu blízkosti se tato maximální teplota posune ze středu vodiče. Nicméně tepelná vodivost je tak významná, že tato změna teplot ve většině případů je zanedbatelná. Nedochází zde k přímému odběru tepla z celého vodiče, ale jen k tepelnému toku ke kraji vodiče, kde je odvod tepla uskutečňován jiným způsobem. U proudových drah, kde části vodiče mění svůj odpor s délkou, jako například v místech změny průřezu nebo kontaktu, dojde ke zvýšení ohřevu a tepelný tok bude šířit i podélným směrem. To může být významné pro analýzu oteplení kritických částí zařízení.

Je patrné, že vedení tepla nejvíce přispívá k rozložení teplot uvnitř proudové dráhy a přilehlých pevných částí, ale teplo ve větší míře přímo do okolí neodvádí. Pokud zkoumáme průběh oteplení proudové dráhy jako celku, většinou vedení tepla uvnitř materiálů neuvažujeme. Potřebujeme-li provést analýzu teplotního stavu uvnitř materiálu můžeme ji za některých zjednodušujících předpokladů provést pomocí vhodné analogie elektrického pole s polem teplotním.

1.7 Ochlazování prouděním

Při tepelném toku z pevného materiálu do plynu nebo kapaliny je vedením předávána tepelná energie částicím na povrchu materiálu. Tyto částice vlivem jejich ohřátí mění svou hustotu a tím dochází k přirozenému unášení těchto částic. Sdílení tepla prouděním je tedy míšení částic s různou tepelnou energií. Může tedy probíhat pouze v plynných a kapalných látkách, kde nejsou částice pevně vázány. Mezi teplotou ochlazovaného povrchu pevné látky a teplotou prostředí je vždy určitý teplotní rozdíl daný tím, že na povrchu zůstává různě tenká vrstva částic, které se neúčastní proudění. Tato vrstva je způsobena přilnavostí molekul k povrchu. V této vrstvě dochází ke sdílení tepla vedením. Protože tepelná vodivost plynů a kapalin je obvykle nízká, vzniká zde velký teplotní rozdíl.

Pro výpočty se používá Newtonův zákon:

$$Q = \alpha_k \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_p) \quad (1.12)$$

kde α_k ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) je součinitel přestupu tepla prouděním (konvekci),
 ϑ_1 (K) je teplota povrchu,
 ϑ_p (K) je teplota prostředí,
 A (m^2) je plocha povrchu. [1], [8]

Klíčové je správné určení nebo znalost součinitele přenosu tepla prouděním, který je ovšem závislý na mnoha činitelích jako jsou rozměry, tvar, drsnost povrchu, rozdíl teplot, tepelná vodivost, viskozita, rychlost proudění a další. Z toho důvodu je správné určení tohoto součinitele velmi obtížné. Proto byly vytvořeny empirické vztahy založené na teorii podobnosti popisující tento děj.

Přirozené proudění může být za účelem většího průtoku chladící kapaliny, tím i chlazení podpořeno ventilátorem, mluvíme pak o nuceném proudění. Rychlost proudění tekutiny okolo tělesa se vzrůstající rychlostí může způsobovat tvoření vírů, které ovlivňují míru ochlazování. Proto rozlišujeme laminární proudění, kdy se tekutina pohybuje podél tělesa a turbulentní proudění, kde vznikají víry. Ty vedou k lepšímu promísení případných vrstev, a tím je způsobeno i lepší sdílení tepla. Vznik těchto vírů značně závisí na Reynoldsově čísle:

$$Re = \frac{v_k \cdot h}{\nu} \quad (1.13)$$

kde v_k ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) je rychlost pohybu částic,
 h (m) je charakteristický rozměr tělesa (průměr otvoru, výška tělesa a podobně),
 ν ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) je kinematická viskozita.

Reynoldsovo číslo nám při znalosti kritického čísla, které závisí na tvaru a povrchu tělesa, určuje, o jaký typ proudění se jedná. A stejně tak na něm značně závisí i výpočet součinitele šíření tepla nuceným prouděním.

Pro výpočet oteplení je třeba znát součinitel přestupu tepla, který nám udává Nusseltovo číslo:

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot h}{\lambda} \quad (1.14)$$

Dále je třeba pro výpočet tohoto součinitele zjistit Grasshoffovo a Prandtlovo číslo:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta \cdot h^3}{\nu^2} \quad (1.15)$$

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_j}{\lambda} \quad (1.16)$$

kde g ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) je tíhové zrychlení,
 β (K^{-1}) je objemový součinitel teplotní roztažnosti tekutiny,
 η ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) je dynamická viskozita,
 c_j ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) je měrná tepelná kapacita (jímavost).

Teorií podobnosti je dokázáno, že Nusseltovo číslo závisí pro přirozené proudění na Grasshoffově a Prandtlově čísle:

$$Nu = f(Gr \cdot Pr) \quad (1.17)$$

Pro nucené proudění závisí na Reynoldsově a Prandtlově čísle:

$$Nu = f(Pr \cdot Re) \quad (1.18)$$

Analytické určování příslušných funkcí se kvůli své obtížnosti neprovádí, ale vztahy jsou založené na experimentech respektujících různé uspořádání jako volné nebo ohraničené proudění, geometrické uspořádání atd. [6] Funkce popisující přirozené proudění může vypadat takto:

$$Nu = C_k \cdot (Gr \cdot Pr)^\alpha \quad (1.19)$$

kde C_k a α je konstanta pro dané uspořádání.

Pro $(Gr \cdot Pr) \in \langle 5 \cdot 10^2; 2 \cdot 10^7 \rangle$ obecně platí $C_k = 0,54$ a $\alpha = 0,25$. [10] V případě, kdy se omezíme pouze na přestup tepla do vzduchu, je výhodnější použít vzorec s explicitně vyjádřeným součinitelem přestupu tepla v upraveném tvaru pro $h < 0,3$ m, který má tvar:

$$\alpha_k = C_k \sqrt[4]{\frac{\Delta\vartheta}{h}} \quad (1.20)$$

A pro $h > 0,3$ vzorec nadále zjednodušuje na:

$$\alpha_k = C_k \sqrt[4]{\Delta\vartheta} \quad (1.21)$$

Při výpočtech je nutné respektovat měnící se fyzikální parametry tekutin v závislosti na teplotě – obzvláště pak v místech přestupu tepla do kapaliny. Proto je třeba při výběru vlastností vycházet ze střední hodnoty teploty:

$$\vartheta_{stř} = \frac{(\vartheta_1 + \vartheta_0)}{2} \quad (1.22)$$

kde ϑ_1 (K) je teplota vodiče,

ϑ_0 (K) je teplota okolí v dostatečné vzdálenosti. [10]

Činitel přestupu tepla prouděním popisovaný pomocí empirických vztahů a tabulek vede spíše k přibližným výpočtům, protože skutečné poměry mohou být odlišné od podmínek, při kterých tyto vztahy a měření vznikaly. Z toho důvodu je mnohdy třeba určit součinitele přestupu tepla prouděním pomocí měření na modelu ilustrující konkrétní případ. [8], [11]

1.8 Ochlazování sáláním

K sdílení tepla sáláním dochází u každého tělesa, jehož teplota je vyšší než absolutní nula, a je obklopeno průzračným prostředím. Těleso uvolňuje svou tepelnou energii prostřednictvím elektromagnetického vlnění, které se šíří všemi směry podle zákonů geometrie optiky. Toto emitované záření předává svou energii prostředí, kterým prochází, a ploše, na kterou dopadá. Tím těleso předává teplo prostředí, které ho obklopuje, ale zároveň přijímá i teplo vyzařované svým okolím. Zda se bude těleso sáláním ochlazovat nebo oteplovat rozhoduje poměr vyzařené a přijaté energie. Záření, které dopadá na povrch, není celé absorbováno, ale část je ho odražena do okolí. V případně průzračného tělesa část projde tělesem. Pro záření platí rovnost podle Kirchhoffova zákona:

$$\text{pohlčené} + \text{odražené} + \text{propuštěné} = \text{celkové. [8]}$$

Absolutně prázdný prostor (vakuum) je dokonale propustný, tedy nedochází k pohlcení nebo odrazům. Jiné prostředí není dokonale propustné, část energie se tedy vždy absorbuje. Absolutně černé těleso je takové, které všechnu dopadající energii absorbuje, stejně tak je to nejlepší možný zářič. V praxi se vyskytují pouze šedá tělesa, kde je kombinace pohlcení, odrazu a případně propustnosti.[8] Elektromagnetické záření je vyzařované v různých vlnových délkách od 0,4 až 40 μm s různou měrou zastoupení, které jsou popsány křivkami spektrální zářivosti. Vlastnosti reálných těles jsou závislé i na vlnových délkách, tělesa se tedy budou chovat jinak pro různá spektra záření. [10]

Tepelný tok z povrchu tělesa popisuje Stefan-Boltzmannův zákon:

$$\phi = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_s \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (1.23)$$

kde ϕ (W) je tepelný tok z povrchu tělesa,
 $5,67 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) je součinitel sálání absolutně černého tělesa,
 ε_s (-) je měrná emisivita povrchu tělesa,
 A (m^2) je efektivní velikost sálajícího povrchu tělesa,
 T (K) je teplota povrchu tělesa,
 T_0 (K) je teplota volného prostoru. [1]

Z toho je zřejmé, že intenzita sálání je závislá na čtvrté mocnině teploty. Tento způsob odvodu tepla tedy bude oproti odvodu tepla prouděním narůstat na významu s rostoucí teplotou a u vysokých teplot bude dominantní. Pro výpočet je třeba znát emisivitu tělesa, která udává schopnost vyzařovat teplo. Je udávána jako poměr intenzity vyzařování zkoumaného tělesa ku intenzitě absolutně černého tělesa. Emisivita je tedy pro absolutně černý povrch 1 a pro reálné materiály <1.[8] Tyto hodnoty jsou pro většinu povrchů definovány a k dispozici v tabulkách. Vyzařovací vlastnosti těles tedy i emisivita závisí na jakosti a barvě povrchu, která má vliv do teplot zhruba 150 °C [4]. Nicméně, jak bylo již uvedeno, vliv má také vlnová délka a teplota. S rostoucí teplotou se vyzařovaná energie posouvá od delších vlnových délek k nižším, toto popisuje Wienův posunovací zákon.

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (1.24)$$

kde λ_{max} (μm) je dominantní vlnová délka. [8]

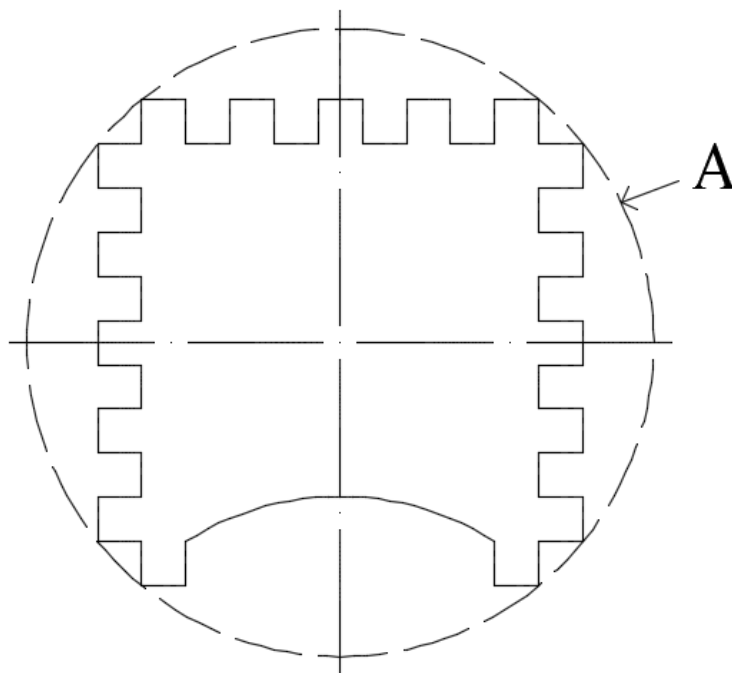
Konstantní emisivita tuto závislost nezohledňuje, při jejím použití se tedy dopouštíme určité chyby, která ovšem pro výpočet oteplení může být většinou zanedbána.

Pro výpočet oteplení je výhodné znát součinitel přestupu sáláním. Ten získáme porovnáním Stefan-Boltzmannova zákona s Newtonovým zákonem. Potom dostaneme vztah:

$$\alpha_s = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_s \cdot \frac{(T^4 - T_0^4)}{(T - T_0)} \quad (1.25)$$

kde α_s ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) je součinitel přestupu tepla sáláním (radiací).

V případě členitého povrchu, kde se vyskytují konkávní plochy, dochází ke sdílení tepla s protilehlou stěnou, tedy všechno vyzářené teplo těleso neopouští. Z toho důvodů je třeba za plochu povrchu tělesa brát obalovou plochu povrchu tělesa, jak je znázorněno na Obr. 1.2.[1] V takovém případě počítáme zjednodušeně obalovou plochu jako rovinnou nebo konvexní.[8]



Obr. 1.2. Příklad efektivní vyzářovací plochy podle [1]

Všechny výše zmíněné vztahy pro sálání platí za předpokladu, že je zkoumané těleso obklopeno zcela volným prostorem. V případě, že se v blízkosti nacházejí další sálavá tělesa, nebo je prostor okolo omezen sálajícími stěnami, je třeba vzorce (1.23) a (1.25) doplnit činitelem zmenšení tepelného toku. Ten respektuje vliv okolních těles, která brání volnému šíření tepelného toku, a část záření vracející se odrazem zpět na těleso, případně tepelný tok okolních těles dopadající na zkoumanou plochu tělesa. [10]

1.9 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita udává, kolik je třeba tepla k ohřátí jednoho kilogramu látky o jeden teplotní stupeň. Tepelná kapacita látky je obecně závislá na teplotě. V případě velkého rozdílu teplot může být tato změna znatelná. V případě plynů je tepelná kapacita závislá nejen na teplotě, ale i na tlaku a způsobu předávání tepla. Proto se u plynů rozeznává měrná tepelná kapacita za stálého tlaku a za stálého objemu. V technické praxi se také měrná tepelná kapacita udává již vztažená na objemové množství.

1.10 Oteplení proudové dráhy vodiče

Jak je patrné, oteplení proudové dráhy závisí na mnoha faktorech. Rovnici (1.1) můžeme doplnit tak, aby respektovala výše zmíněné vlivy, obecná rovnice potom bude vypadat následovně:

$$[i(t)]^2 \cdot R(\vartheta) \cdot k_p k_b dt = c(\vartheta) \cdot V \cdot d\vartheta + (\alpha_k + \alpha_s) \cdot A \cdot \Delta\vartheta dt \quad (1.26)$$

Pro analytické řešení ukazující průběh ohřevu tuto rovnici zjednodušíme a budeme uvažovat konstantní průběh proudu, kde ochlazování je respektováno celkovým součinitelem přestupu tepla. Rovnice potom bude vypadat:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = c \cdot V \cdot d\vartheta + \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta dt \quad (1.27)$$

kde α_0 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) je souhrnný součinitel přestupu tepla.

Pomocí separace proměnných dostaneme:

$$dt = \frac{c \cdot V}{R \cdot I^2 - \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta} \cdot d\vartheta \quad (1.28)$$

$$t = -\frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \cdot \ln(R \cdot I^2 - \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta) + K \quad (1.29)$$

Při počáteční podmínce $t = 0$ je $\Delta\vartheta = 0$ určíme konstantu:

$$K = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \cdot \ln(R \cdot I^2) \quad (1.30)$$

Dosazením konstanty do rovnice (1.29) a vyjádřením teploty dostáváme výsledný vztah:

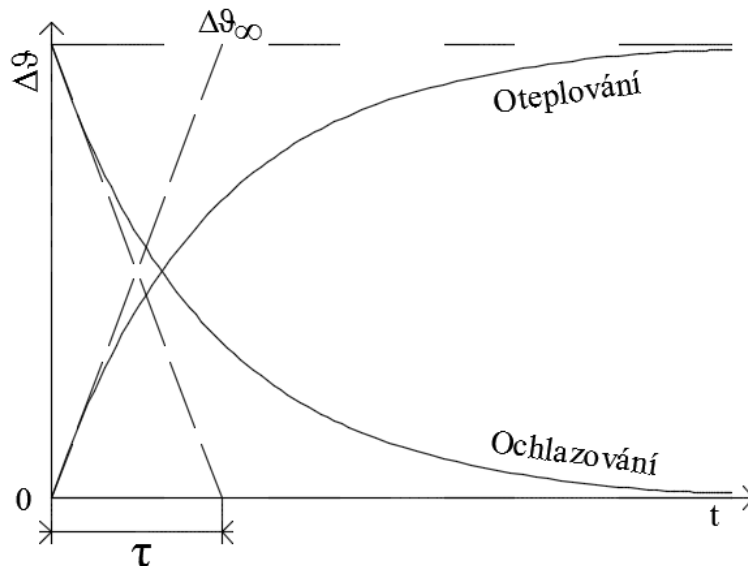
$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (1.31)$$

Kde časová konstanta a hodnota maximálního oteplení je:

$$\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \quad (1.32)$$

$$\Delta\vartheta_{max} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \quad (1.33)$$

Z této rovnice je patrné, že průběh oteplení bude mít exponenciální charakter, jehož maximální velikost v ustáleném stavu je dána hodnotou před logaritmem. Časová konstanta nám ukazuje počáteční strmost a dobu ohřevu a také přímo udává dobu, za jakou by se těleso v případě nulového chlazení ohřálo na maximální teplotu. [10]



Obr. 1.3. Oteplovací a ochlazovací charakteristika podle [1]

Při výpočtu ochlazování z maximální hodnoty teploty je levá strana rovnice respektující ohřev nulová. Potom dostaneme výsledný vztah pro ochlazování:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.34)$$

Oba tyto průběhy jsou znázorněny na Obr. 1.3. Jak již bylo zmíněno, tento výpočet nerespektuje teplotní závislost odporu, součinitele přestupu tepla, ani tepelné kapacity. Pro výpočet s respektováním složitějších modelů s potřebou znalosti rozložení teplot v různých místech je třeba použít numerických metod. [10], [4]

1.11 Problematika elektrického kontaktu

Části proudové dráhy jsou spojovány pomocí kontaktních míst, která slouží k trvalému propojení nebo k přerušování proudové dráhy. Příkladem trvalého propojení může být šroubový spoj. K přerušování proudové dráhy slouží typicky vypínače nebo odpojovače. Všechny části proudové dráhy vykazují v místech kontaktu oproti jiným úsekům některé rozdílné vlastnosti. Děje se tak v důsledku dvou příčin. První důvod je nedokonalý styk kontaktních plošek. V případě, kdy realizujeme kontakt dvou technicky rovných ploch tak na atomární úrovni bude styková plocha tvořena několika menšími ploškami o nahodilém množství. Tím dochází ke zmenšení průřezu a ke zhuštění proudu směrem do těchto kontaktních úžin. Velikost a v určité míře počet těchto ploch závisí na mechanických vlastnostech materiálů, které jsou závislé na teplotě a na přítlačné síle. Druhý důvod jsou cizí vrstvy na povrchu kontaktů. Jedná se většinou o oxidy kovů nebo nečistoty z prostředí, které mají vždy větší odpor než čisté kovy. [10], [12] Celkový stykový odpor je tedy potom:

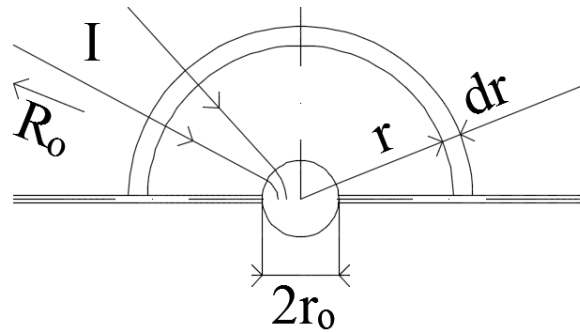
$$R_s = R_u + R_p \quad (1.35)$$

kde R_s (Ω) je celkový odpor kontaktu,
 R_u (Ω) je odpor úžiny,
 R_p (Ω) je odpor povrchových vrstev. [10]

Pro určení úžinového odporu předpokládáme, že plochy kontaktů jsou rovinné a stýkají se v kruhové plošce. Počítáme odpor jednoho kontaktního místa, dostatečně vzdáleného od dalších případných kontaktních míst, takže neuvažujeme jejich vzájemný vliv. Idealizovaný příklad popisuje toto proudové pole kulovým tvarem, tedy jeho ekvipotenciální plochy jsou půlkružnice. Tento případ je znázorněn na Obr. 1.4. Odpor polokulové skořepiny je popsán vztahem:

$$dR_u = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r^2} dr \quad (1.36)$$

kde r (m) je poloměr polokulové skořepiny. [10]



Obr. 1.4. Proudová úžina s kulovým polem podle [10]

Odpor jedné polokulové skořepiny mezi poloměrem určeným poloměrem kontaktu a libovolně vzdáleným poloměrem je:

$$R_{u1} = \frac{\rho}{2\pi} \int_{r_0}^{R_0} \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (1.37)$$

kde r_0 (m) je poloměr dotykové plochy,

R_0 (m) je poloměr ohraničující dotykovou plochu v libovolné vzdálenosti. [10]

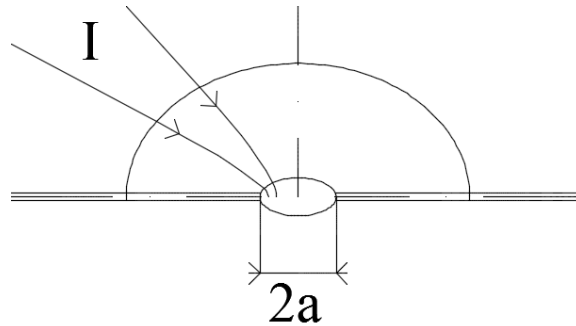
V případě, že libovolný ohraničující poloměr R_0 , zvolíme dostatečně vzdálený tak, že v něm ještě nedochází k ovlivňování proudu místem dotyku, můžeme výraz pro odpor jedné úžiny zjednodušit na:

$$R_{u1} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r_0} \quad (1.38)$$

Takto vypočítaný úžinový odpor je menší než skutečný. To je způsobeno tím, že skutečné pole se více přibližuje eliptickému poli, jehož ekvipotenciální plochy jsou půlelipsoidy, jak je znázorněno na Obr. 1.5. Zde vychází odpor jedné úžiny:

$$R_{u1} = \frac{\rho}{4 \cdot a} \quad (1.39)$$

kde a (m) je poloměr elipsoidu nad kruhovou ploškou. [10]



Obr. 1.5. Proudová úžina s eliptickým polem podle [10]

Celkový úžinový odpor je tvořen dvěma úžinami - v případě, kdy jsou úžiny navzájem symetrické, bude tedy odpor dvojnásobný. Dále v případě více navzájem se neovlivňujících stykových ploch se odpor kontaktu zmenšuje. Takže výsledná rovnice bude vypadat:

$$R_{un} = \frac{\rho}{2 \cdot n \cdot a} \quad (1.40)$$

kde n (-) je počet stykových míst. [10]

Velikost stykových plošek ovlivňuje řada faktorů. Tvar kontaktních částí se projevuje určitou konstantou, která je zjištěna pro konkrétní tvar dotýkajících se částí. Pro deformaci kontaktů platí určitá mez, do které se jedná o pružnou deformaci. Tato mez závisí na konkrétním materiálu, na přitlačné síle, ale také na teplotě, neboť vlastnosti materiálů se s teplotou významně mění. V případě pružné deformace se ve výpočetních vztazích vyskytuje modul pružnosti materiálu. Pro uspořádání kulové a ploché kontaktní části, kde přitlačná síla je rozložena do několika plošek, platí vztah:

$$a = 1,11 \sqrt[3]{\frac{F_k \cdot r_k}{n \cdot E}} \quad (1.41)$$

kde 1,11 (-) je konstanta pro dané uspořádání (0,9 platí pro dva kulové kontakty),

F_k (N) je přitlačná síla,

r_k (m) je poloměr kuličky kontaktu,

E (Pa) je modul pružnosti. [4], [10]

Po dosazení vzorce (1.41) můžeme vztah pro úžinový odpor přepsat na tvar:

$$R_{un} = \frac{\rho \cdot E^{1/3}}{2,22 \cdot r_k^{1/3} \cdot n^{2/3} \cdot F_k^{1/3}} = \frac{k_{n1}}{F_k^{m1}} \quad (1.42)$$

kde k_{n1} (Ω) je konstanta,
 $m1$ (-) je konstanta. [10]

Poznámka: V některých zdrojích je přítlačná síla F_k ve vztazích vycházejících z experimentálních hodnot dělena výrazem $F_k = 1N$ z důvodu souhlasu jednotek pravé a levé strany rovnice. [1]

Při překročení meze pružnosti dochází k trvalým deformacím a poloměr stykové plošky je udáván pomocí meze pevnosti v tlaku daného materiálu.

$$a = \sqrt{\frac{F_k}{\pi \cdot \sigma}} \quad (1.43)$$

kde σ (Pa) je mez pevnosti v tlaku. [10]

Po opětovném dosazení do vzorce (1.43) můžeme vztah pro úžinový odpor přepsat na tvar:

$$R_{un} = \frac{\rho \cdot (\pi \cdot \sigma)^{1/2}}{2n^{1/2} \cdot F_k^{1/2}} = \frac{k_{n2}}{F_k^{m2}} \quad (1.44)$$

Můžeme tedy říci, že překročení meze pružnosti se projeví změnou konstant. [10]

Povrchový odpor určuje řada parametrů, které jsou obtížně definovatelné. Jednak jde o složení povrchové vrstvy, o její tloušťku a působící přítlačnou sílu, ale také o teplotu. Velmi tenké vrstvy se příliš neprojevují na zvýšení odporu, byť jde i o látky považované za izolanty. U silnějších vrstev se vytváří kovové můstky, kde se významně uplatňuje například třecí pohyb kontaktů, čímž dochází k samočištění nebo rozklad povrchových vrstev s nárůstem teploty. I při trvale sepnutém stavu není odpor stálý a mění se s časem, může tedy docházet k nárůstu oteplení a k dalším změnám vlastností. Jde tedy o děj těžko specifikovatelný, závislý na mnoha faktorech. Proto bývá nejlépe stanovit

odpor měření. [10], [11] Z toho vyplývá vztah pro celkový odpor kontaktu aproximovaný rovnicí (1.44) pro úžinový odpor a využívající experimentálně získané výsledky, a to:

$$R_s = \frac{k_n}{F_k^m} \quad (1.45)$$

kde k_n (Ω) je konstanta,
 m (-) je konstanta.

Konstanta k_n zahrnuje vlastnosti materiálu včetně povrchových vrstev a poměry v místě styku. Konstanta m zohledňuje druh styku, pro bodový styk je 0,5 pro přímkový 0,5 – 0,7 a pro plošný 0,6 – 1. [10]

1.12 Oteplení elektrického kontaktu

Významnou částí analýzy oteplení jsou místa kontaktů, kde vznikají další tepelné ztráty, které jednak ovlivňují teplotu přilehlých částí proudové dráhy, ale také jsou u rozepínacích kontaktů jedním z velmi důležitých hledisek. K analýze oteplení kontaktních míst je využita teorie kulové úžiny. Při výpočtu budeme uvažovat souměrné úžiny se stejnými tepelnými a proudovými poli. Pak můžeme určit napětí mezi ekvipotenciálními plochami z obou stran dostatečně vzdálenými od místa styku jako:

$$U_s = \frac{\rho \cdot i}{\pi \cdot r_o} \quad (1.46)$$

Při analýze využíváme s výhodou analogie mezi elektrickým a tepelným polem, ze které plyne vztah mezi elektrickým a tepelným odporem:

$$R_{\vartheta} = \frac{R}{\lambda \cdot \rho} \quad (1.47)$$

kde R_{ϑ} ($K \cdot W^{-1}$) je tepelný odpor. [10]

Tuto rovnici přepíšeme do diferenciálního tvaru a upravíme na:

$$dR_{\vartheta} = \frac{1}{\lambda \cdot \rho} dR = \frac{1}{\lambda \cdot \rho} \frac{du}{i} \quad (1.48)$$

Odvod tepla do okolí v takto malém úseku zanedbáváme, tím je elektrického pole s tepelným totožné. Potom můžeme psát rovnici, kde tepelný spád na elementárním tepelném odporu je úměrný toku, tedy:

$$d\vartheta_x = \phi_x \cdot dR_g \quad (1.49)$$

kde ϕ_x (W) je tepelný tok přes elementární tepelný odpor.

Dosažením z rovnice (1.48) a vyjádřením tepelného toku jako součinu proudu a napětí dostaneme z rovnice (1.49) vztah ve tvaru:

$$d\vartheta_x = \frac{u_x \cdot i}{\lambda \cdot \rho \cdot i} du_x = \frac{u_x}{\lambda \cdot \rho} du_x \quad (1.50)$$

Potom můžeme oteplení místa styku oproti části proudové úžiny s napěťovým úbytkem k místu styku určit jako:

$$\int_{\vartheta_x}^{\vartheta_s} d\vartheta_x = \frac{1}{\lambda \cdot \rho} \int_0^{U_x} u_x du_x = \frac{U_x^2}{2 \cdot \lambda \cdot \rho} \quad (1.51)$$

kde U_x (V) je napětí na vyšetřovaném úseku. [10]

Z tohoto vztahu dostáváme oteplení místa styku oproti vzdálenému místu s ustálenou teplotou vztah:

$$\vartheta_k - \vartheta_p = \frac{U_s^2}{8 \cdot \lambda \cdot \rho} \quad (1.52)$$

kde ϑ_k (K) je teplota v místě kontaktu,

ϑ_p (K) je teplota ve vzdáleném místě kontaktního vodiče s ustálenou teplotou.

Tento vztah však nerespektuje zvýšení odporu vlivem nárůstu teploty, tím se dopoušíme mnohdy významné chyby. Při respektování teplotního součinitele je vztah upraven na:

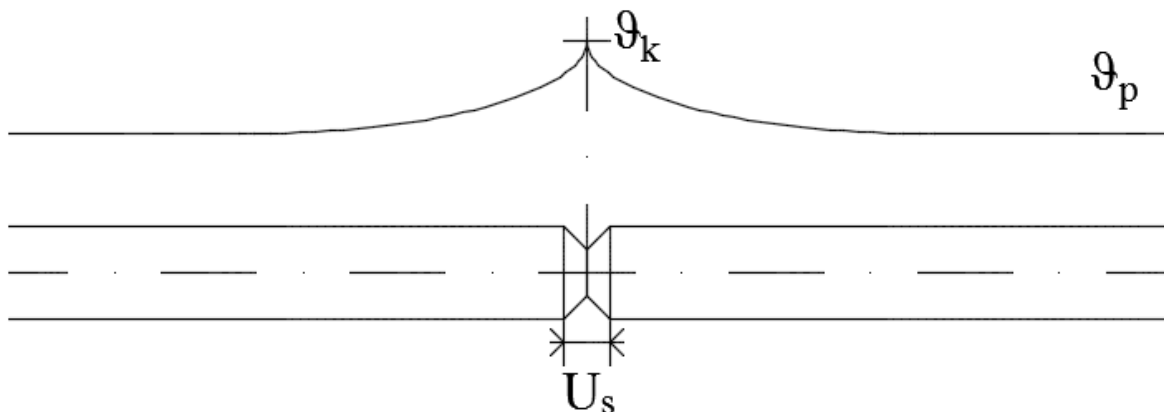
$$\vartheta_k - \vartheta_p + \frac{\alpha_1}{2} (\vartheta_k - \vartheta_p)^2 = \frac{U_s^2}{8\lambda \cdot \rho} \quad (1.53)$$

Využitím znalosti maximální ustálené teploty vodiče z rovnice (1.33) můžeme teplotu kontaktu dále vyjádřit oproti teplotě okolí jako:

$$\vartheta_k + \frac{\alpha_1}{2} \left(\vartheta_k - \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \right)^2 = \frac{U_s^2}{8\lambda \cdot \rho} + \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} + \vartheta_0 \quad (1.54)$$

kde ϑ_0 (K) je teplota okolí. [1], [10]

Jak již bylo uvedeno, teplota kontaktu ovlivňuje celou řadu parametrů. Při nárůstu teploty dochází nejen k nárůstu elektrického odporu, ale také k měknutí materiálu, což způsobuje rozšiřování plochy kontaktu a následný pokles odporu. V případě následného snížení teploty takto rozšířená plocha zůstává a celkový odpor je nižší než předtím. Naopak při další nárůstu teploty dochází k tavení materiálu a následkem toho prakticky stykové plochy přestávají existovat a odpor klesne. Po snížení teploty materiál ztuhne a dojde ke svaření kontaktu.



Obr. 1.6. Průběh teploty na části proudové dráhy s kontaktem podle [10]

2 Metody výpočtu oteplení

Znalost rozložení teplot nejen u elektrických přístrojů je v mnoha případech stěžejní oblastí. Je třeba mít vhodný matematický popis a aparát pro řešení těchto tepelných procesů, stejně tak je důležité, abychom byly schopni tento popis ať už analyticky, nebo numericky řešit. Musíme být schopni správně uvážit, jakou měrou se jednotlivé děje v konkrétním modelu uplatní, a podle toho přistoupit ke zjednodušování, neboť příliš složitý model může být i za pomoci numerických metod těžko simulovatelný. Toto vyžaduje dobrou znalost fyzikálních principů a jevů s tím souvisejících, stejně tak mnohdy vhodnou kombinaci výpočtů s empirickými vztahy a experimentálním měřením.

Komplexní matematický popis tepelného pole vede obvykle na soustavu parciálních diferenciálních rovnic. V určitých případech můžeme přijmout vhodné zjednodušující předpoklady, poté lze soustavu popsat obyčejnými diferenciálními rovnicemi, které jsou mnohdy dobře analyticky řešitelné. Vyjma elementárních případů je třeba diferenciální rovnice řešit numericky. Pro řešení se využívají metody jako je metoda konečných diferencí, metoda konečných prvků nebo metoda konečných objemů. Zadaná oblast se zde diskretizuje a jednotlivé elementy jsou popsány příslušnými algebraickými rovnicemi a k hraničním prvkům jsou přiřazeny odpovídající okrajové podmínky. Vzniklý maticový systém je poté řešen danou výpočetní metodou. Pro numerickou analýzu teplotního pole je celá řada výpočetních programů jako je ANSYS APDL nebo ANSYS FLUENT, pro dvourozměrné nebo prostorově symetrické pole se jedná například o Agros2D. Pro řešení tepelných úloh se s výhodami využívá podobnosti s elektrickým polem, tato práce se dále převážně věnuje této analogii.

2.1 Tepelné pole

Pro popis tepelného pole, jak již byl zmíněno, je využívána analogie s elektrickým polem. To umožňuje přiblížit tepelné výpočty elektrickým a využít tak známého aparátu. Díky tomu jsme schopni analyticky řešit jednoduché případy tepelného pole, které jsou jistou obdobou elektrických úloh. Toto přiblížení je založeno na podmínce stejnorodého prostředí jako je vedení tepla látkou nebo jeho šíření v plynech a ve vakuu. Tepelné pole je také polem skalárním, nevírovým a zřídlovým, jehož potencionální jednotkou je teplota nebo oteplení. Rozložení teplot v prostoru se zdroji analogicky popisuje Poissonova rovnice a v případě prostoru bez zdrojů Laplacova rovnice [10]. Ovšem na rozdíl od elektrického pole, kde je

elektrická vodivost izolantů zanedbatelná, u tepelného pole je tepelná vodivost izolantů o několik řádů větší, tudíž skrze izolanty odchází do okolí ne vždy zanedbatelná část tepla, přesto však můžeme analogii uplatnit. [10]

Pro napětí, které je dáno potenciálním rozdílem dvou míst, analogicky odpovídá teplotní rozdíl. Obdobou elektrickému proudu je tepelný tok, potom můžeme napsat Ohmův zákon pro tepelné pole jako:

$$\phi = \frac{\Delta\vartheta}{R_{\vartheta}} \quad (2.1)$$

Stejně tak bude tepelný odpor analogický elektrickému odporu, tedy v podélném směru pro tyč konstantního průřezu bude popsána vztahem:

$$R_{\vartheta} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} \quad (2.2)$$

K odporu válcové vrstvy kruhového vodiče v radiálním směru dospějeme integrací ve vyšetřovaných mezích:

$$R_{\vartheta r} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l} \quad (2.3)$$

kde r_1 (m) je poloměr bližší středu vodiče udávající počáteční mez,
 r_2 (m) je poloměr dále od středu vodiče udávající konečnou mez,
 l (m) je délka úseku vodiče v podélném směru. [6], [10]

Práce s tepelnými odpory je stejná jako s elektrickými, slučují se tedy do úseků řazených za sebou nebo paralelně. Tedy sériové tepelné odpory sčítáme a u paralelně řazených tepelných odporů sčítáme jejich tepelné vodivosti, které jsou převrácenou hodnotou elektrického odporu. [10]

Jak již bylo nastíněno výše, část tepelného toku je odváděna do okolí přes tepelný odpor, který získáme porovnáním rovnice pro maximální ustálené oteplení (1.33) se vztahem (2.1), potom:

$$R_{\vartheta} = \frac{1}{\alpha_0 \cdot A} \quad (2.4)$$

Tento odpor představuje odpor přestupu tepla z povrchu vodiče. Z rovnic pro elektrický odpor (1.4) a tepelný odpor (2.2) můžeme vhodným dosazením získat převodní vztah mezi elektrickým a tepelným odporem, který můžeme výhodně použít pro výpočet tepelného odporu kontaktu.[10] Vztah mezi těmito odpory je:

$$R_{\vartheta} = \frac{R}{\rho \cdot \lambda} \quad (2.5)$$

A potom tedy tepelný odporu kontaktu vycházející z tohoto převodního vztahu a rovnice (1.45), doplněný o činitel respektující přenos tepla tenkou vzduchovou vrstvou v okolí úžiny, bude:

$$R_{\vartheta s} = \frac{k_c \cdot k_n}{\rho \cdot \lambda \cdot F_k^m} \quad (2.6)$$

kde k_c (-) je činitel respektující případný další přestup tepla, nabývající hodnot ≤ 1 . [10]

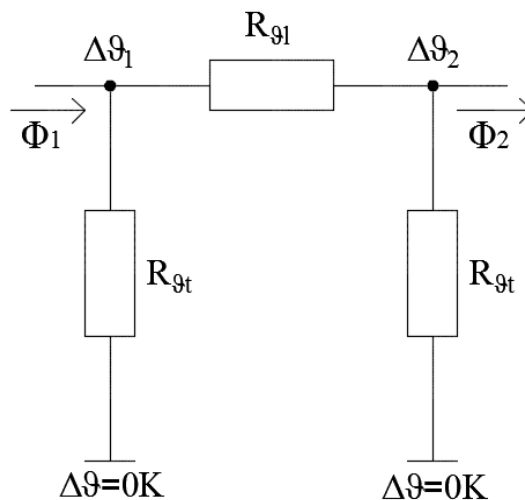
Stejně jako intenzitu elektrického pole, zavádíme rovněž intenzitu tepelného pole, která je dána záporným gradientem teploty a udává nám velikost teplotního spádu, tedy teplotní rozdíl na jednotku délky. Hustota tepelného toku je popsána rovnicí (1.11) v kapitole zabývající se sdílením tepla vedením a je analogická hustotě proudu. [6]

V rámci analogie s elektrickým polem můžeme zavést také tepelnou kapacitu. Ovšem na rozdíl od elektrické je tepelná kapacita s teplotou jako stavovou veličinou závislá na objemu tělesa a jeho měrné tepelné kapacitě. Při uvažování tepelné kapacity můžeme analyzovat i teplotní přechodové děje. Pro elektrickou indukčnost neexistuje v teplotním poli ekvivalent, neboť teplota či oteplení se vždy na rozdíl od napětí mění spojitě.

2.2 Metoda tepelné sítě

Princip tepelné sítě spočívá v rozdělení celku na soubor těles, která jsou popsána daným náhradním článkem respektujícím jeho fyzikální vlastnosti. Vzniklá soustava tvořená těmito články může mít podobu jednořadé nebo mřížové sítě. V případě jednořadé sítě jde o popis, kde proudová dráha má charakter podlouhlého vodiče, kde se teplo šíří převážně v jednom směru. Typicky jde o spínací přístroje, kde jednotlivé póly jsou odděleny silnou vrstvou vzduchu a nejsou tak mezi sebou příliš ovlivňovány. Vždy navrhujeme tepelnou síť pro část nebo pól, kde jsou chladicí podmínky nejhorší. U mřížového pole je situace složitější, jde o soustavu, kde se tepelný tok nešíří v jednom směru, jedná se například o elektromotory nebo transformátory. U vícepólových zařízení v kompaktním provedení, kde se jedná také o mřížovou síť, jsme za určitých zjednodušení a splněných podmínek schopni zařízení modelovat pomocí jednořadé sítě. [10], [13]

Metoda vychází z analogie s elektrickým polem. Vzniklá soustava spojená z dílčích schémat je obdobně řazena a řešena jako celek. Výsledkem řešení jsou oteplení v uzlech sítě, tedy bodech spojení jednotlivých náhradních článků představující daný úsek proudové dráhy. Vzhledem k tomu, že část tepla, které proudí ve směru teplotního spádu, je odváděno povrchem do okolí, matematický popis základního článku tuto skutečnost musí respektovat. Základní článek pro homogenní těleso konstantního průřezu, v němž nevzniká žádné teplo, tedy jím neprotéká žádný elektrický proud, a jehož část tepla je odváděna povrchem, je popsán Π článkem, který je zobrazen na Obr. 2.1.



Obr. 2.1. Náhradní schéma tyče beze ztrát podle [10]

Odpor podélné větve je dán rovnicí:

$$R_{\vartheta l} = \frac{\sinh(\beta \cdot l)}{\delta} \quad (2.7)$$

kde $R_{\vartheta l}$ ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) je podélný odpor náhradního Π článku,

β (m^{-1}) a δ ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$) jsou výpočetní činitele. [10]

A příčné odpory větví s nulovým oteplením na konci jsou dány vztahem:

$$R_{\vartheta t} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta \cdot l}{2}\right)} \quad (2.8)$$

kde $R_{\vartheta t}$ ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) je příčný odpor náhradního Π článku.

Činitele vyskytující se v těchto rovnicích jsou popsány výrazy:

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_0 \cdot O}{\lambda \cdot S}} \quad (2.9)$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_0 \cdot O \cdot \lambda \cdot S} \quad (2.10)$$

kde O (m) je obvod povrchu vodiče. [10], [13]

Jestliže se průřez podél délky mírně mění tak, že je stále dodrženo rovnoměrné rozložení tepelného toku, rozdělíme vhodně proudovou dráhu na více článků a počítáme s odpovídajícím středním průřezem. V případě, kdy vyšetřovaný segment má takové rozměry, že je splněna podmínka $\beta l \leq 0,1$, jedná se o tepelně krátkou tyč a můžeme psát rovnost $\sinh \beta l \approx \tanh \beta l \approx \beta l$. V tom případě se nám vzorce částečně vykrátí a dostaneme vztahy popsané v kapitole zabývající se teplotním polem, tedy:

$$R_{\vartheta l} \approx \frac{\beta \cdot l}{\delta} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} \quad (2.11)$$

$$R_{\vartheta t} = \frac{2}{\delta \cdot \beta \cdot l} = \frac{2}{\alpha_0 \cdot O \cdot l} = \frac{2}{\alpha_0 \cdot A} \quad (2.12)$$

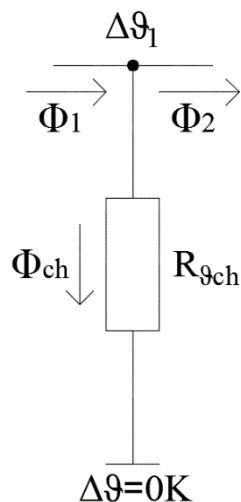
Pak je tedy náhradní podélný odpor stejný jako skutečný tepelný odpor v podélném směru, jak udává rovnice (2.2). A příčné náhradní odpory odpovídají dvojnásobku odporu pro přestup tepla do okolí daného rovnicí (2.4). Dvojnásobek je daný paralelním uspořádáním v Π článku. Dalším případem, který může nastat, je tepelně dlouhá tyč. Pro tu musí být splněna podmínka $\beta l \geq 10$. Tento případ si lze představit tak, že článek má v podélném směru rapidně větší odpor než je odpor paralelní, potom tepelný tok vstupující z jedné strany článku bude celý odveden do okolí. Rovnice pro tepelně dlouhou tyč zní:

$$R_{\theta l} \rightarrow \infty \quad (2.13)$$

$$R_{\theta t} \approx \frac{1}{\sqrt{\alpha_0 \cdot O \cdot \lambda \cdot S}} \quad (2.14)$$

Náhradní článek se tedy zjednoduší na jeden příčný odpor bez dalšího pokračování. Tímto článkem se nahrazují přívodní části náhradního schématu, neboť musíme respektovat teplo sdílené s přívodními vodiči, které často značně ovlivňuje teplotu zařízení. [10], [13]

Pro zohlednění částí, které nejsou součástí proudové dráhy, ale uplatňují se při odvodu tepla do okolí, jako jsou chladící žebra, zavádíme ekvivalentní chladící článek, který je ilustrován na Obr. 2.2. Tepelný tok vstupující do takové části je celý odváděn do okolí. Pro chladící žebra proměnného průřezu je třeba opět úsek vhodně rozdělit a počítat se střední hodnotou jejich průřezu.



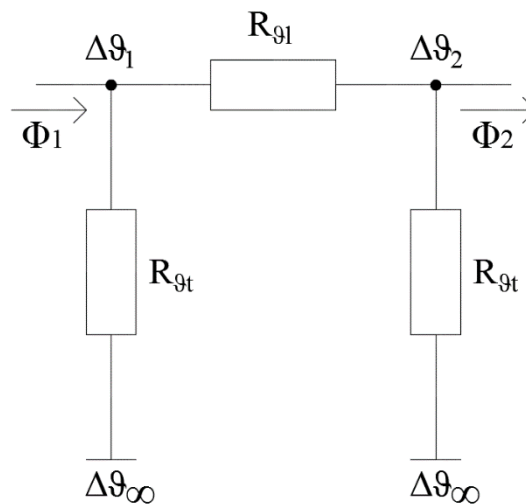
Obr. 2.2. Náhradní schéma chladícího článku podle [10]

Jako výpočetní vztah pro chladicí odpor se používá zjednodušeného výrazu:

$$R_{\vartheta ch} \approx \frac{1}{\delta \cdot \tanh \beta \cdot l} \quad (2.15)$$

kde $R_{\vartheta ch}$ ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) je příčný odpor náhradního chladicího článku. [10]

V případě, kdy článek nahrazuje část obvodu, přes kterou protéká elektrický proud, je nutné zahrnout do náhradního článku vznikající tepelný příspěvek. Ten je možné zohlednit dvěma způsoby. První způsob je oteplením koncových bodů příčných větví, jak je znázorněno na Obr. 2.3.



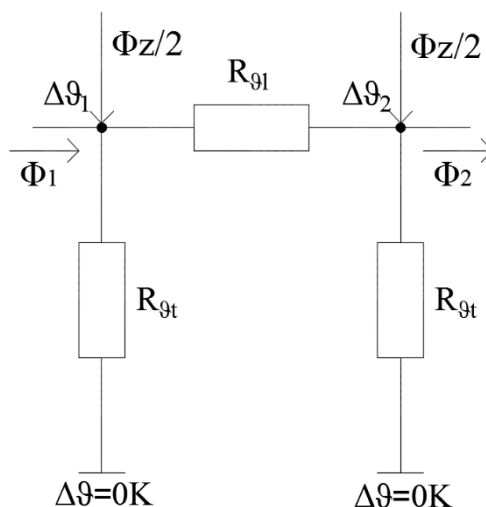
Obr. 2.3. Náhradní schéma tyče se ztrátami s oteplením koncových bodů podle [10]

Hodnota oteplení koncového bodu je dáno vztahem, prakticky totožným s rovnicí (1.33), tedy:

$$\Delta\vartheta_{\infty} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot O \cdot l} = \frac{\rho \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot O \cdot S} \quad (2.16)$$

Prakticky je tak udáván teplotní úbytek na příčném odporu, a tím i míra ochlazování nebo také oteplování pro případ, kdy je teplota v koncovém bodě vyšší než v uzlech. Potom je teplo naopak přiváděné do obvodu a pokračuje do dalších článků, kde je teprve odvedeno do okolí. U dalších článků, kde vznikají tepelné ztráty jako je tepelně krátká a dlouhá tyč, je tato teplota obdobně připisována ke koncovému bodu. [10], [13]

Druhý způsob zavedení tepelných ztrát do náhradního článku je formou tepelného toku do uzlů článku, jak je znázorněno na Obr. 2.4.



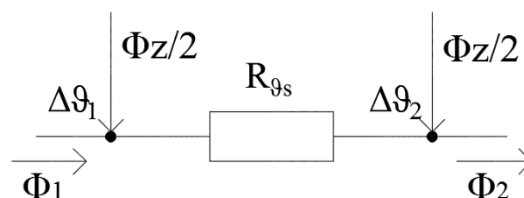
Obr. 2.4. Náhradní schéma tyče se ztrátami s tepelným tokem podle [13]

Tepelný tok představující přiváděné tepelné ztráty se spočítá podle rovnice:

$$\phi_z = R \cdot I^2 \quad (2.17)$$

Tento tepelný tok se v případě odporu v podélném směru rozdělí na dva stejně velké toky, v případě tepelně dlouhé tyče se ztrátami je celý přiveden do jediného uzlu článku. [10]

Náhradní článek pro elektrický kontakt se vyznačuje tím, že nemá prakticky žádný chladičový povrch, proto je zastoupen pouze odporem v podélném směru. Článek kontaktu s tepelnými ztrátami je zobrazen na Obr. 2.5.



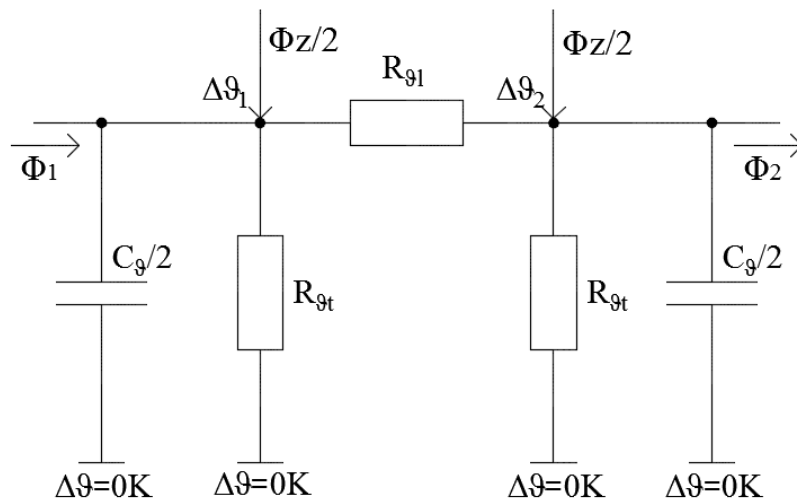
Obr. 2.5. Náhradní schéma elektrického kontaktu podle [10]

Vztah popisující tepelný odpor kontaktu byl popsán v kapitole 2.1 rovnicí (2.6). Tepelný tok respektující ztráty je počítán ze vztahu (1.27), který je uveden výše s dosazením elektrického odporu pro kontakt, který byl popsán v kapitole 1.11 rovnicí (1.45). [10], [13]

Řešením soustavy popsané pomocí odporů získáme pouze ustálené teploty v uzlech. Pro analýzu přechodových dějů musíme soustavu doplnit o tepelnou kapacitu jednotlivých částí, viz Obr. 2.6. Tuto kapacitu připojujeme do uzlů náhradního schématu a v případě podélného odporu dělíme na dvě stejné poloviny. Je definována vztahem:

$$C_{\vartheta} = c \cdot V \quad (2.18)$$

kde C_{ϑ} ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$) je tepelná kapacita. [11]



Obr. 2.6. Náhradní schéma tyče se ztrátami s uvažovanou kapacitou

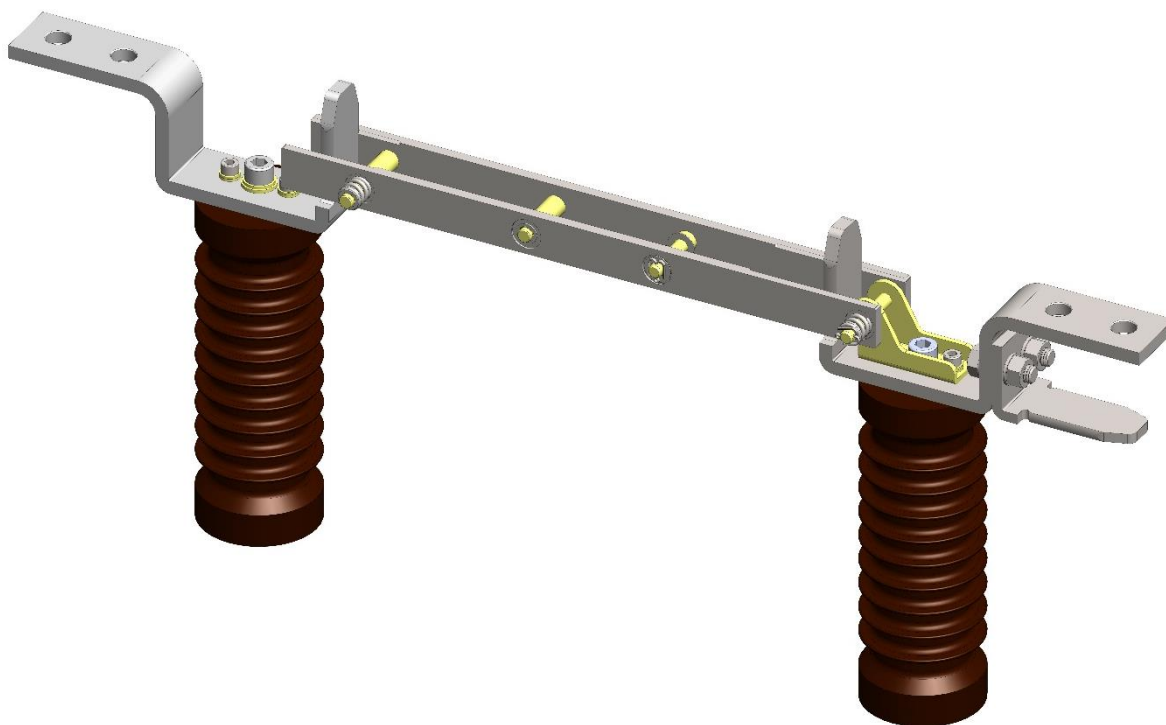
3 Simulace odpojovače

Pro model tepelné sítě byl vybrán třípólový vnitřní odpojovač pro distribuční síť, fyzicky dostupný v laboratoři elektrických přístrojů katedry elektroenergetiky a ekologie na ZČU. Vybrané štítkové hodnoty tohoto odpojovače jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Tab. 3.1. Vybrané štítkové hodnoty odpojovače

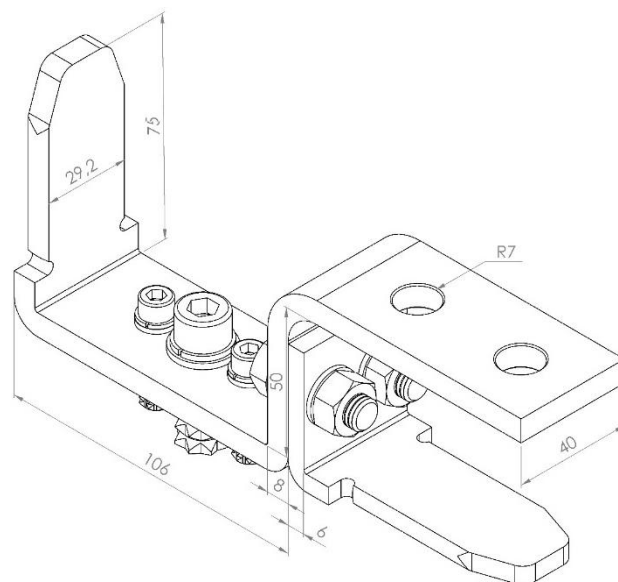
$U_n = 25 \text{ kV}$	$I_n = 630 \text{ A}$
$U_p = 125 \text{ kV}$	$I_k = 16 \text{ kA}, t_k = 1 \text{ s}$

Pro výpočet tepelné sítě byla vybrána platforma MATLAB, která slouží jako základní prostředí. Program Simulink byl zaveden jako nadstavba MATLABu a tvoří grafické a matematické rozhraní, principiálně se jedná o singal processing. Do programu Simulink byl implementován program PLECS jako doplňkový modul. Tento program byl vytvořen primárně pro tvorbu elektrických obvodů a jejich simulaci. Tepelná síť spolu s výpočetními funkcemi byla podle analogie s elektrickými obvody vytvořena v programu PLECS. Prostoru MATLABu bylo využito k zadávání konstantních hodnot a pro základní výpočty.

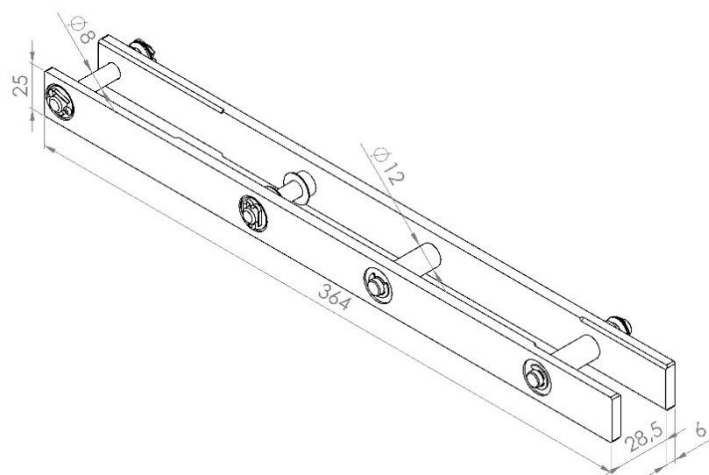


Obr. 3.1. Vytvořený 3D model odpojovače

Pro co nejlepší přesnost řešení a podrobnou analýzu teplot bylo přistoupeno na rozdělení odpojovače na krátké úseky. Vzniklo tak 45 částí pro popis vlastní proudové dráhy odpojovače. Vzhledem k velkému množství hodnot byl vytvořen odpovídající 3D model v programu SolidWorks, kde bylo využito nástroje pro analýzu objektu. Program umožňuje přesně odečíst objem tělesa, plochu zadaných povrchů a zvolené vzdálenosti. Z jednotlivých součástí modelu byla vyříznuta odpovídající část a ta byla analyzována. Některé části 3D modelu nebylo možné přesně modelovat jako například mosazné závitové vložky zalité v izolátorech nebo deformace vzniklé vlivem výrobních ohybů. Praporec bez možnosti uzemnění byl označen jako první praporec a praporec se zemněním jako druhý praporec. Na Obr. 3.2 jsou zakresleny základní rozměry druhého praporce, který je až na zemnicí část identický s prvním praporcem. Na Obr. 3.3 je ilustrována soustava zemnicího nože.



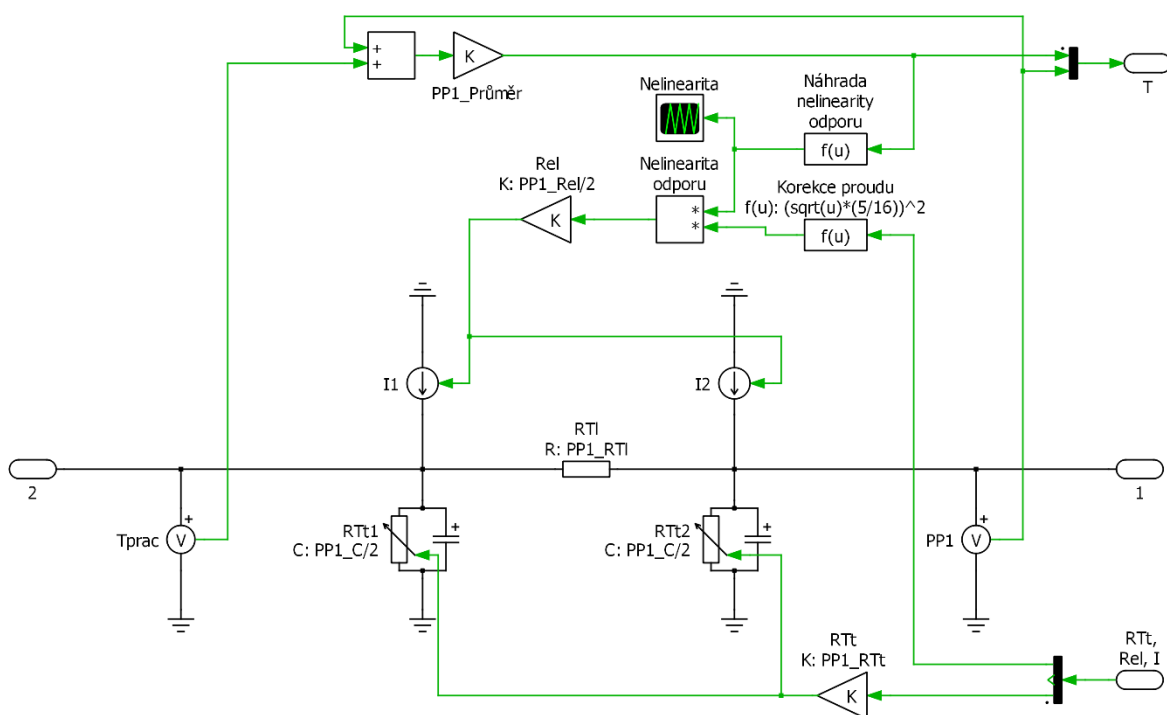
Obr. 3.2. Sestava druhého praporce se zemněním



Obr. 3.3. Sestava nože

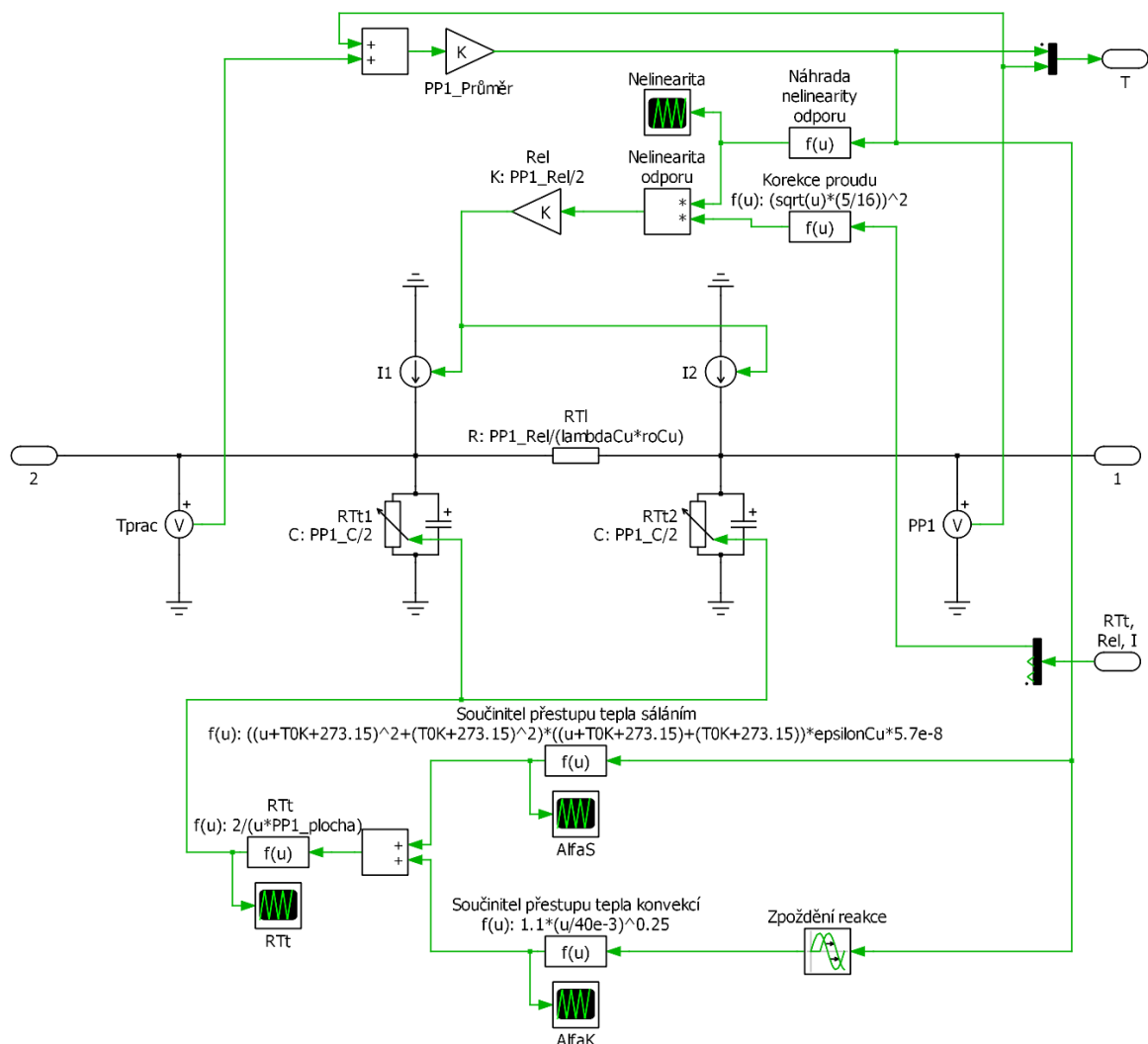
3.1 Model tepelné sítě

Schéma tepelné sítě odpojovače je vytvořeno ze subsystémů, které představují vždy jeden konkrétní úsek. Na začátku byl vytvořen výchozí II-článek, ze kterého vychází jednotlivé subsystémy, tento článek je zobrazen na Obr. 3.4. Konstanty použité ve schématu jsou definované skriptem v prostředí MATLABu. V rozhraní PLECSu nelze vytvořit funkcí řízený odpor, pokud není spjat s kapacitou [14]. Z toho důvodu je řízený odpor použit jen u paralelních větví, kde je také tepelná kapacita. Vzhledem k tomu, že součinitel přestupu tepla je výpočetně spjat i s podélným odporem, v prvním přiblížení byl uvažován konstantní. Pro případnou hromadnou korekci a přivedení proměnného proudu byl vytvořen kanál pro skupinové řízení. Vnesení ztrát bylo realizováno proudovými zdroji ilustrujícími tepelný tok. Přivedený umocněný elektrický proud je v každém článku pro výpočet tepelného toku vynásoben odpovídajícím elektrickým odporem. Byla zde zavedena funkce pro případnou korekci proudu a funkce respektující teplotní závislost odporu. V článku bylo zavedeno měření teploty a výpočet průměrné teploty. K výstupu byla přivedena odpovídající teplota podle zvoleného umístění. Průměrná teplota je použita pro výpočet nelinearity odporu a je také přivedena na výstup článku. Další potřebné články byly vytvořeny s tímto výchozím konceptem. S tímto článkem byl vytvořen základní model odpojovače bez uvažování kontaktu v otočném rameni a konstantním součinitelem přestupu tepla.



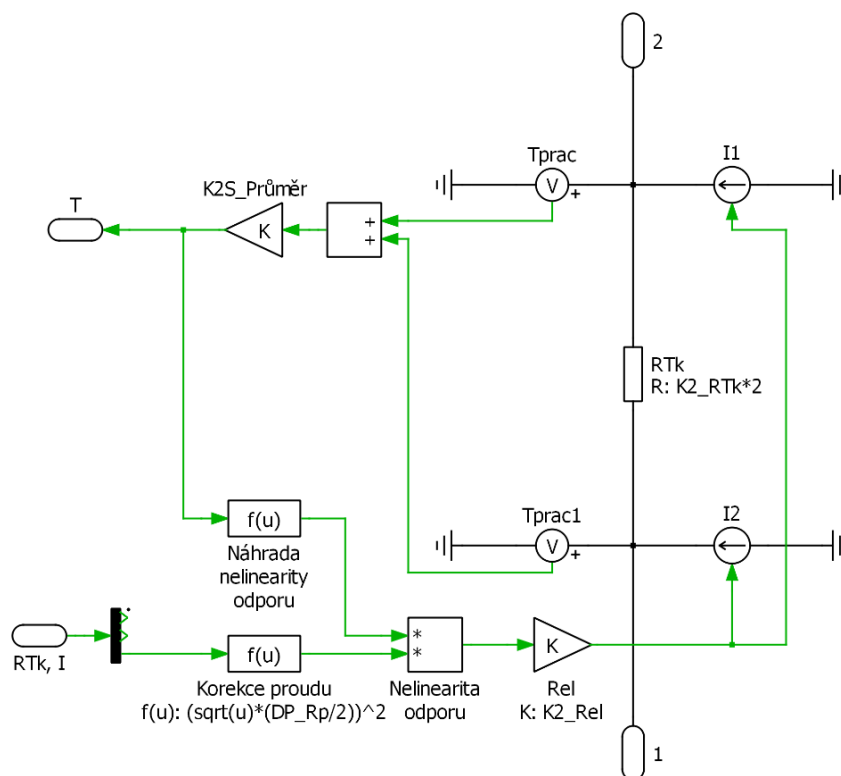
Obr. 3.4. Výchozí II-článek

Pro zpřesnění a určitou univerzálnost pro další aplikace byl vytvořen základní článek zohledňující teplotní závislost přestupu tepla. To je možné pouze za předpokladu, že je splněna podmínka $\beta l \leq 0,1$ pro tepelně krátkou tyč, potom podélný odpor není vázaný s koeficientem přestupu tepla a nemusí být pro toto zohlednění funkčně řízený. Vzhledem k rozdělení odpojovače na větší počet částí je tato podmínka splněna, kromě článku přívodních vodičů. Na Obr. 3.5 je schéma tohoto článku. Proudová část je zde stejná jako u předchozího článku. Pomocí funkcí jsou počítány zvlášť koeficienty pro sálání a konvekci. Pro součinitel přestupu tepla sáláním byla použita rovnice (1.25). U součinitele přestupu tepla konvekci bylo vycházeno z empirických vztahů, převzatých z [13]. Vzhledem k tomu, že změna rychlosti toku částic vlivem jejich ohřátí není skoková, velikosti sdílení tepla konvekci se mění se zpožděním. Toto zpoždění je simulováno posunem vstupní teploty o jednu sekundu. Neuvažování této skutečnosti by mohlo zkreslovat rychlé přechodové děje. Na základě tohoto článku bylo vytvořeno finální schéma s uvažováním otočného kontaktu.



Obr. 3.5. Upravený II-článek pro tepelně krátkou tyč

Finální schéma je uvedeno pod přílohou B. Označení bylo zavedeno tak, že: PP je první praporec, N je soustava nože, DP je druhý praporec, DPO je část druhého praporce včetně otočného kontaktu, K je článek kontaktu nože, Kab je článek kabelu, KabK je kontakt kabelu a přípona ch označuje část zohledňující chlazení. Příslušné články svým označením odpovídají umístění podle Obr. 3.7 a Obr. 3.8 přičemž druhý praporec je rozdělen stejným způsobem. V místě připojení kabelů je zavedeno proudové rozdělení úměrné podle průřezů přírodních vodičů, použitých během praktického měření. Pro zohlednění předávání proudu celou plochou kontaktu je například na článku PP1, který znázorňuje oblast připojovacího otvoru, nastavena polovina proudu K_{ab1} . Proudová dráha byla v místě hlavního kontaktu rozdělena na dvě poloviny, čímž byla získána hodnota oteplení ve středu kontaktu. Proud je v článcích odpovídajícím způsobem rozdělen, tedy v článku PP10 je nastaven $3/4$ proud a v článku PP11 $1/4$ proud. Kontakt bylo třeba rozdělit na tři části. Každá krajní část kontaktu představuje $1/4$ stykové plochy a prostřední představuje $1/2$ plochy. Proud je zde rozdělen obdobně a odpor každé části je odpovídajícím způsobem upraven. Obě paralelní části nože a kontaktu jsou přepočítány do jedné proudové dráhy. Chladicí části nože představující čepy jsou vzhledem ke zvolenému rozložení rozděleny v článku na dvě stejné části. Pro zohlednění otočného styku je zaveden výpočet poměrných proudů a hodnoty jsou implementovány obou paralelních drah.



Obr. 3.6. Článek kontaktu

V rozhraní MATLABu byl vytvořen skript, který je použitelný pro oba modely. Každý jednotlivý úsek proudové dráhy a chladicí části je popsán pomocí hodnot získaných v programu SolidWorks a výpočtů dle vztahů uvedených v teoretickém úvodu. Při analýze povrchu modelu nebyly uvažovány zakryté plochy a v případě spodních ploch byla započítána jen polovina jejich celkové plochy. Tím je zohledněno jejich horší chlazení a dále lze uvažovat celou plochu částí jako plochy stejného charakteru. Zavedením koeficientu k při výpočtu elektrického odporu je v některých částech zohledněna změna průřezu vniklá zúžením nebo technologickým otvorem. Jedná se o část na praporci, kde je ubrán materiál před kontaktním místem ($k_{el} = 1,3$) a části otvorů na noži ($k_{el} = 1,1$). Hodnoty byly čerpány z tabulek uvedených v [13]. V případě otvorů pro připojení přívodních vodičů bylo počítáno v daném úseku s poměrným zmenšením průřezu. U druhého praporce v části, kde je připojena zemnicí část, nebylo počítáno se zvětšením odporu vlivem děr, neboť vzhledem k paralelnímu spojení částí dochází také k opačné změně celkového odporu těchto spojených částí. V oblasti nože není počítáno s teoretickou nesymetrií kontaktů, tudíž čepy spojující oba nože dohromady jsou brány pouze jako chladicí části. Vliv skinefektu pro použité pasové vodiče a vliv blízkosti vodičů paralelních nožů je podle tabulek uvedených v [13] zanedbatelný. Odvod tepla izolátorem je vzhledem k jeho malé tepelné vodivosti také zanedbán. Skript vytvořený v MATLABu je uveden v přílohách je pro přehlednost popsán. Dále je uveden příklad výpočtu části proudové dráhy označené jako PP1.

Výpočet chladicího obvodu:

$$O_{PP1} = \frac{S_{PP1}}{l_{PP1}} = \frac{875 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 10^{-3}} = 58,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Výpočet koeficientů β a δ podle rovnic (2.9) a (2.10):

$$\beta_{PP1} = \sqrt{\frac{\alpha_{0PP1} \cdot O_{PP1}}{\lambda_{Cu} \cdot S_{PP1}}} = \sqrt{\frac{7,4 \cdot 58,3 \cdot 10^{-3}}{386 \cdot 240 \cdot 10^{-6}}} = 2,1586 \text{ m}^{-1}$$

$$\delta_{PP1} = \sqrt{\alpha_{0PP1} \cdot O_{PP1} \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{PP1}} = \sqrt{7,4 \cdot 58,3 \cdot 10^{-3} \cdot 386 \cdot 240 \cdot 10^{-6}} = 7,4 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet podélného a příčného tepelného odporu podle rovnic (2.7) a (2.8):

$$R_{\vartheta lPP1} = \frac{\sinh(\beta_{PP1} \cdot l_{PP1})}{\delta_{PP1}} = \frac{\sinh(2,1586 \cdot 58,3 \cdot 10^{-3})}{2,1586} = 0,1619 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{\vartheta tPP1} = \frac{1}{\delta_{PP1} \cdot \tanh \frac{\beta_{PP1} \cdot l_{PP1}}{2}} = \frac{1}{7,4 \cdot \tanh \frac{2,1586 \cdot 58,3 \cdot 10^{-3}}{2}} = 308,9073 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Výpočet elektrického odporu podle rovnice (1.4):

$$R_{elPP1} = k_{elPP1} \cdot \rho_{Cu} \cdot \frac{l_{PP1}}{S_{PP1}} = 1 \cdot 1,77 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{15 \cdot 10^{-3}}{875 \cdot 10^{-6}} = 1,106210^{-6} \Omega$$

Výpočet tepelné kapacity podle rovnice (2.18):

$$C_{\vartheta PP1} = c_{Cu} \cdot V_{PP1} = 345 \cdot 10^4 \cdot 3557,24 \cdot 10^{-9} = 12,2725 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

Tyto výše uvedené výpočty jsou realizovány v prostředí MATLABu. Další část výpočtů, které jsou použity v článku pro tepelně krátkou tyč respektující proměnný koeficient přestupu tepla, je počítána v prostředí PLECSu. Dále je uveden příklad výpočtu těchto vztahů pro hodnotu oteplení 30 °K, teplotu okolí 293,15 °K a emisivitu měděného povrchu 0,3.

Výpočet podélného odporu pro tepelně krátkou tyč podle rovnice (2.11):

$$R_{\vartheta lPP1} = \frac{R_{elPP1}}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu}} = \frac{1,106210^{-6}}{386 \cdot 1,77 \cdot 10^{-8}} = 0,1619 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Výpočet součinitele přestupu tepla sáláním podle rovnice (1.23):

$$\begin{aligned} \alpha_{sPP1} &= \varepsilon_{Cu} \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot ((\Delta\vartheta + \vartheta_0)^2 + \vartheta_0^2) \cdot ((\Delta\vartheta + \vartheta_0) + \vartheta_0) = \\ &= 0,3 \cdot 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot ((30 + 293,15)^2 + 293,15^2) \cdot \\ &\cdot ((30 + 293,15) + 293,15) = 2,0062 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí je počítán podle empirických vztahů pro přirozené proudění vzduchu a danou chladicí plochu, tyto vztahy byly čerpány z [13]. Konstanta před závorkou byla vhodně zvolena podle geometrie útvaru. Hodnota h představuje charakteristický rozměr ochlazované části, pro praporec je to šířka profilu a pro nůž je to jeho výška.

Výpočet součinitele přestupu tepla konvekcí:

$$\alpha_{kPP1} = 1,1 \cdot \left(\frac{\Delta\vartheta}{h}\right)^{0,25} = 1,1 \cdot \left(\frac{30}{40 \cdot 10^{-3}}\right)^{0,25} = 5,7565 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet příčného odporu pro tepelně krátkou tyč podle rovnice (2.12):

$$R_{\vartheta tPP1} = \frac{2}{(\alpha_{sPP1} + \alpha_{kPP1}) \cdot A_{PP1}} = \frac{2}{(2,0062 + 5,7565) \cdot 875 \cdot 10^{-6}} = 294,4484 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

U výpočtů chladících částí je vycházeno ze vztahu (2.12), který je vhodný pro části, kde se teplota s délkou chladícího žebra příliš nemění. Tuto podmínku části modelu splňují. V případě, kdy by do modelu byl zahrnut podpěrný izolátor vlivem jeho malé tepelné vodivosti a délky, by se počítal podle vztahu (2.15). Níže je uveden příklad výpočtu chladícího odporu části označené PPch1 nacházející se na začátku praporce. Odpor vypočtený u tohoto článku je poloviční oproti výchozímu vztahu z důvodu náhrady jen jedním odporem. U chladících článků, které jsou připojeny v schématu paralelně, je náhrada provedena dvěma odpory a vztah je pro ně nezměněný. Ve finálním modelu je výpočet chladícího odporu zaveden v programu PLECS a uvažuje proměnnou hodnotu součinitele přestupu tepla stejným způsobem, jak je uvedeno výše.

Výpočet chladícího odporu:

$$R_{\vartheta tPPch1} = \frac{1}{\alpha_0 \cdot A_{PPch1}} = \frac{1}{7,8 \cdot 1270 \cdot 10^{-6}} = 106,4056 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

V prvním vytvořeném modelu bez uvažování otočného kontaktu se nachází čtyři teoreticky stejná kontaktní místa pro styk nože s praporcem a kontakty přípojovacích vodičů. Pro výpočty je třeba znát především přitlačnou sílu kontaktů, koeficienty pro dané uspořádání byly čerpány ze zdrojů [10] a [13]. Přitlačnou sílu pro pohyblivý kontakt praporce udávají parametry pružiny. Její síla byla určena ze změřených rozměrů a míry stlačení srovnáním s nabídkou produktů ze zdroje [15] na 140 N. Přitlačná síla kontaktů přívodních kabelů byla odhadnuta s ohledem na míru utažení při fyzickém měření a doporučených hodnot pro danou velikost šroubu. Ve finálním modelu jsou navíc kontakty otočného kloubu a styku kovového držáku s praporcem. Hodnota síly styku kovového držáku byla odhadnuta podobným způsobem jako pro kontakty přívodních kabelů. Hodnota přitlačné síly v otočném kontaktu není definovatelná, vzhledem k tolerancím se jedná o náhodný styk neznámé síly, z toho důvodu byla síla odhadnuta na 5 N. Při výpočtu elektrického a tepelného kontaktu je vycházeno z rovnice (1.45). Dále je uveden příklad výpočtu jednoho kontaktu nože s praporcem označeného jako K1. Koeficienty pro tento styk jsou $k_n = 0,0012$, $m = 0,7$ a $k_c = 0,8$.

Výpočet jednoho kontaktního elektrického odporu:

$$R_{K1} = \frac{k_n}{F_k^m} = \frac{0,0012}{140^{0,7}} = 3,77 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Výpočet jednoho kontaktního tepelného odporu podle rovnice (2.6):

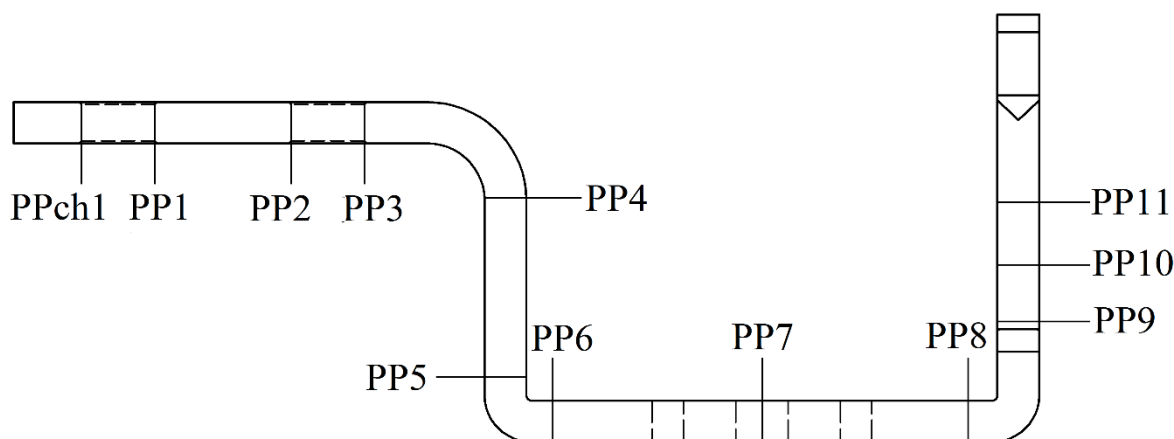
$$R_{\theta K1} = \frac{k_c \cdot k_n}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu} \cdot F_k^m} = \frac{0,8 \cdot 0,0012}{386 \cdot 1,77 \cdot 10^{-8} \cdot 140^{0,7}} = 4,4200 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tyto kontakty jsou k sobě paralelně, proto jsou v náhradním schématu nahrazeny polovinou své hodnoty. Kontakty otočného spoje jsou dva na každé straně a zároveň paralelně, tudíž jejich hodnota v náhradním schématu je stejná jako pro jeden styk.

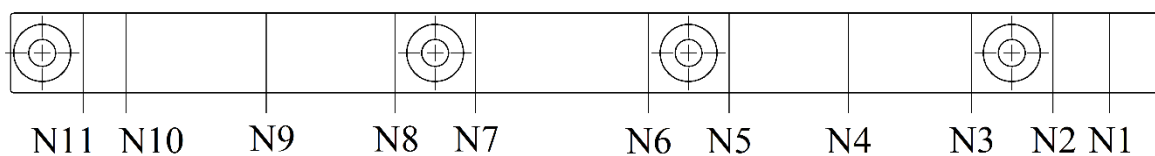
Pro zohlednění přívodních vodičů je použit Π -článek s uvažovaným průřezem použitým při měření. Délka vodičů je pro dostatečný odstup nastavena na hodnota 0,5 metru.

3.2 Výsledky a analýza simulace

Umístění teplot je pro lepší orientaci znázorněno na Obr. 3.7. a Obr. 3.8. Pro druhý praporec je číselné označení totožné, je pouze zaměněné první písmeno. Teplota označená jako DPO1 se nachází před otočným kontaktem na ocelovém držáku.



Obr. 3.7. Umístění výstupních teplot na prvním praporci

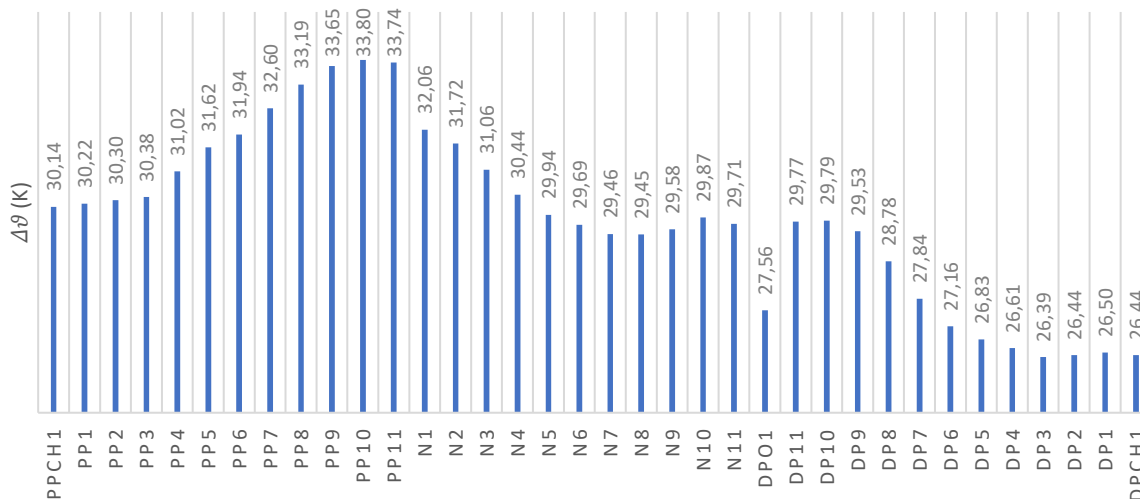


Obr. 3.8. Umístění výstupních teplot na noži

Elektrický proud použitý pro simulaci tepelných ztrát byl nastaven na jmenovitou hodnotu odpojovače 630 A a doba simulace na 6 hodin. Po 4 simulovaných hodinách, kdy obvod dosahoval ustálené teploty, byl simulován jmenovitý maximální krátkodobý proud, a to 16 kA po dobu 1 s. Nicméně rozhraní programu PLECS umožňuje simulovat prakticky jakékoliv provozní proudy. Následující analýzy jsou provedeny na druhém, finálním vytvořeném modelu.

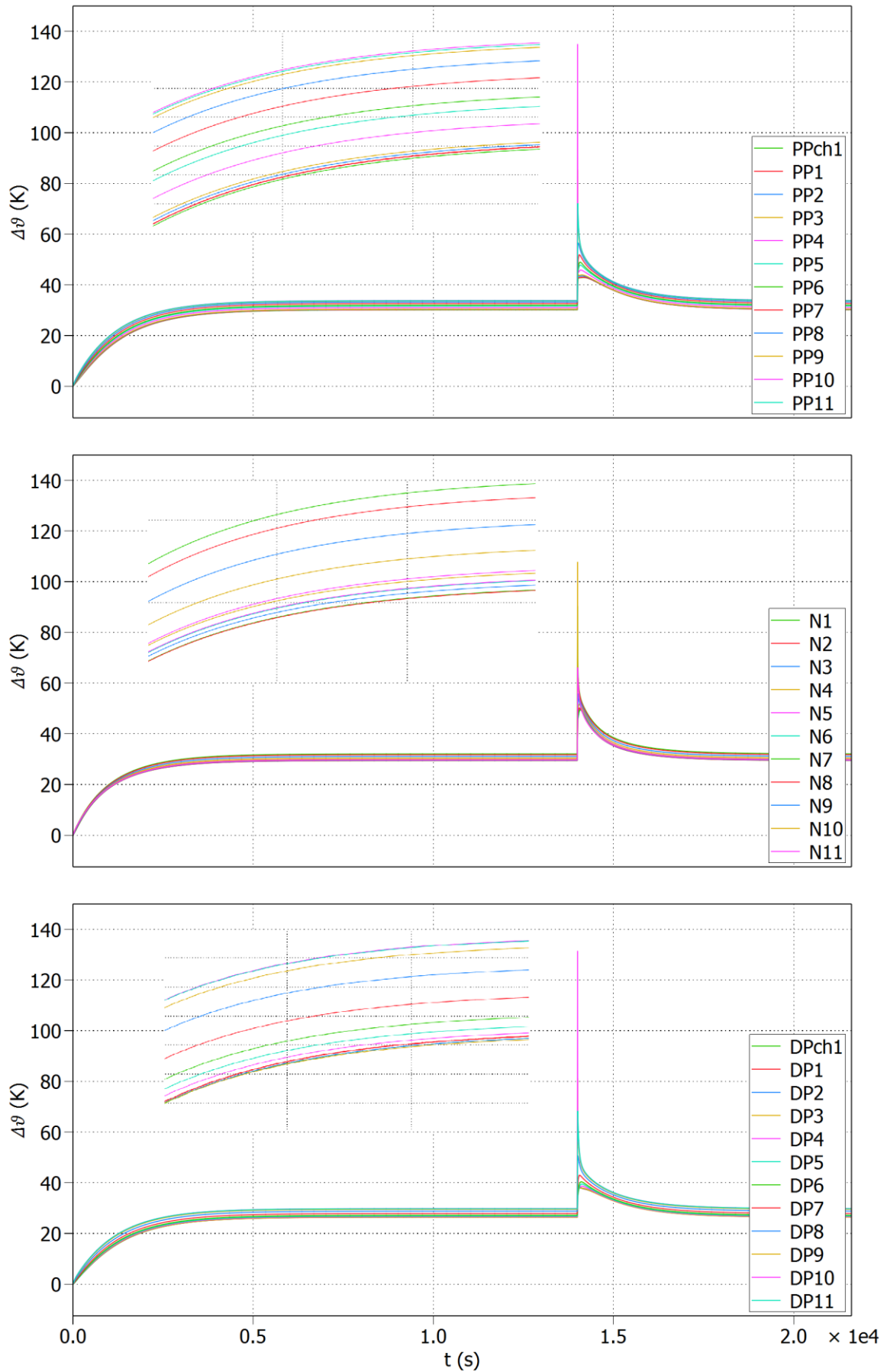
Celkový průběh simulovaných oteplení je na Obr. 3.10. Ustálené hodnoty byly pro lepší čitelnost zaneseny na Obr. 3.9. Nejvyššího ustáleného oteplení je dosaženo na prvním praporci v polovině kontaktu, což odpovídá předpokladům. Teplo z tohoto místa je odváděno jak do prvního praporce, tak do nože. Vzhledem k teplotnímu skoku způsobeného vyšším teplotním odporem kontaktu je patrné, že se teplo mezi těmito částmi hůře přenáší. Stejně tak je zřejmé, že část nože je lépe chlazená. Teplotní tok na praporci v ustáleném

stavu směřuje od středu kontaktu k přívodním kabelům. Oteplení obou kabelů na konci nastavené délky je nižší než na částech praporce, tudíž v simulaci je teplo prvního praporce dále předáváno přívodním kabelům. Horní čtvrtina kontaktu simulovaná článkem PP11 je nepatrně chladnější, to je způsobeno především chladicí částí praporce nad kontaktem.

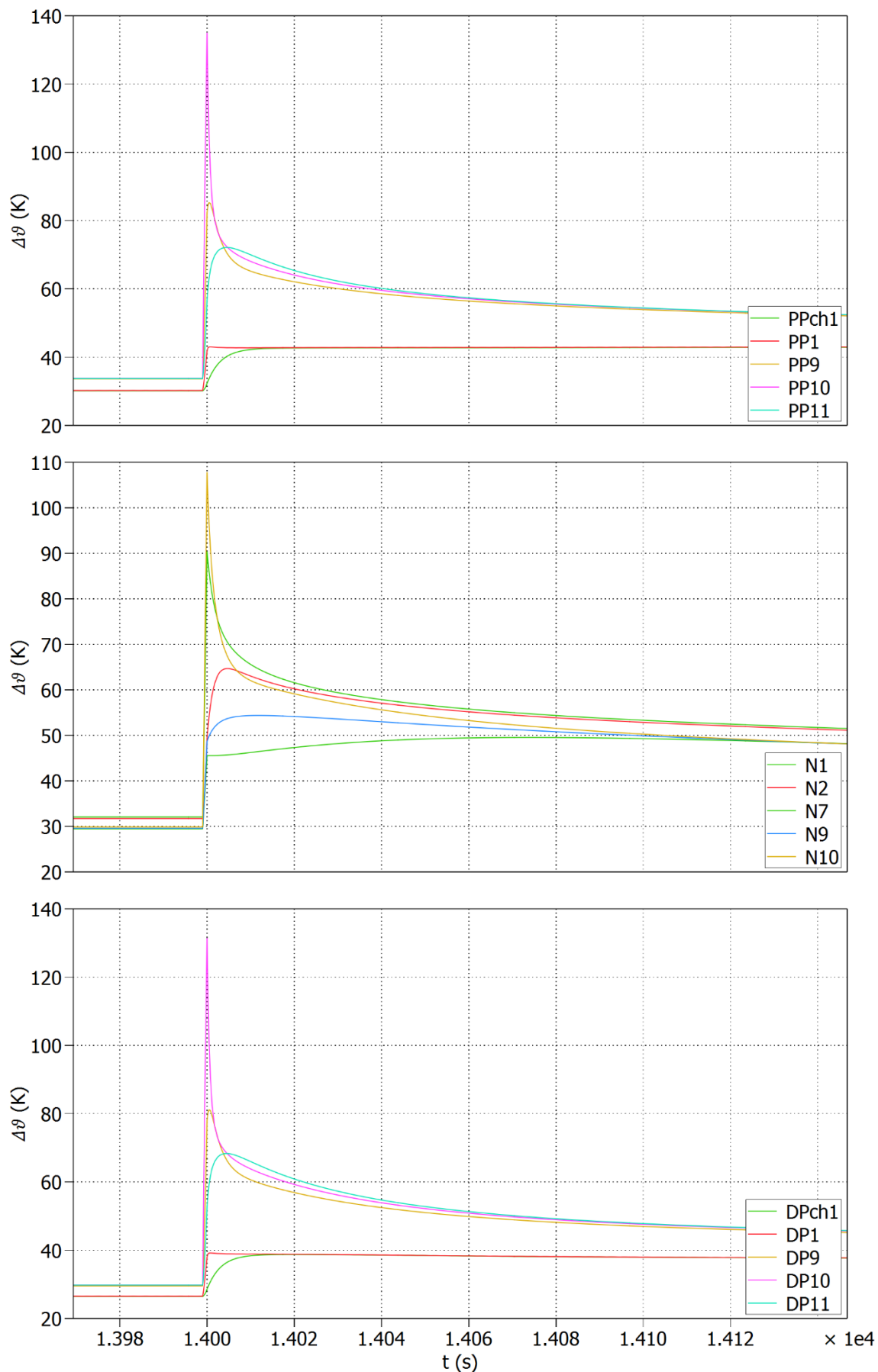


Obr. 3.9. Oteplení na částech odpojovače

Na části nože je nejchladnější úsek mezi body N7 a N8. Směrem k tomuto místu je odváděno teplo od obou kontaktů. V části druhého praporce jsou teploty dle simulace nižší. To způsobuje hlavně zemnicí praporec, který působí jako poměrně velké chladicí žebro a částečně také držák nože, jenž také zvyšuje chladicí plochu. Kontaktem ocelového držáku s nožem dochází k toku paralelního proudu k hlavnímu kontaktu, pokusy bylo ověřeno, že tento proud nehraje téměř žádnou roli. Naopak tepelný odpor tohoto kontaktu již znatelně napomáhá odvodu tepla z nože do okolí a do části druhého praporce vzdálenější od kontaktu. Také proto je teplotní skok na obou stranách kontaktu nepatrný. Z hodnot je patrné, že oteplení na držáku nože je nižší než oteplení části PP7, ke které je připojen malým tepelným odporem. Dle toho lze usuzovat, že teplo vyvinuté průchodem paralelního proudu je zanedbatelné a ocelový držák slouží především jako chladicí část. Ovšem jak bylo zmíněno výše, stykový odpor tohoto kontaktu je nahodilý, tudíž odhad nemusí být správný, ale i vzhledem k odporu oceli by proud i při dobrém kontaktu nebyl výrazný. V části DP5 je připojeno zemnicí žebro. To se projevilo výrazným snížením oteplení v této části. V části připojení přívodních vodičů se oteplení odpojovače přibližuje hodnotě oteplení kabelů. V místech kontaktu přívodních vodičů se vyvíjí teplo, které tyto vodiče výrazně odvádí. Patrně z toho důvodu je v úseku DP1 až DP3 teplotní tok opačný než u prvního praporce.

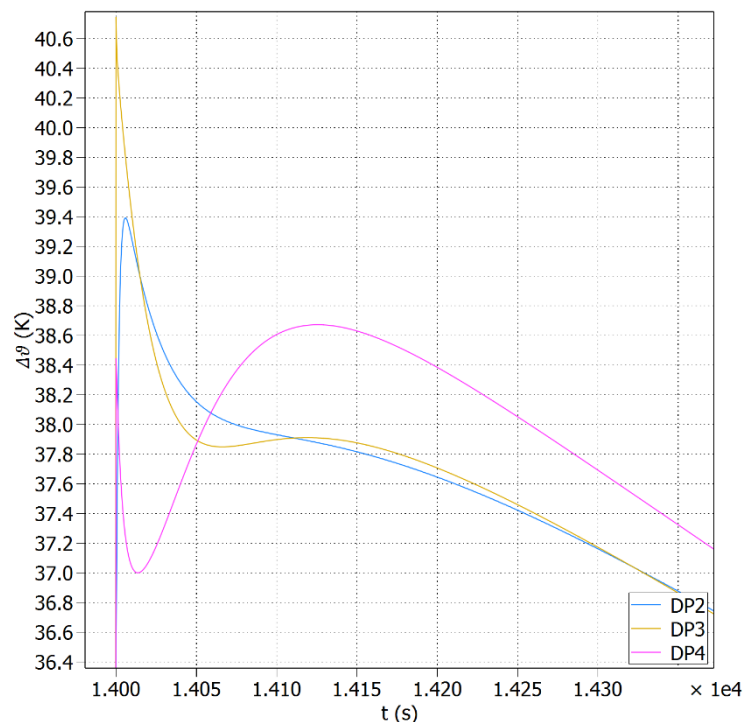


Obr. 3.10. Průběhy oteplení částí odpojovače s detailem v ohybu



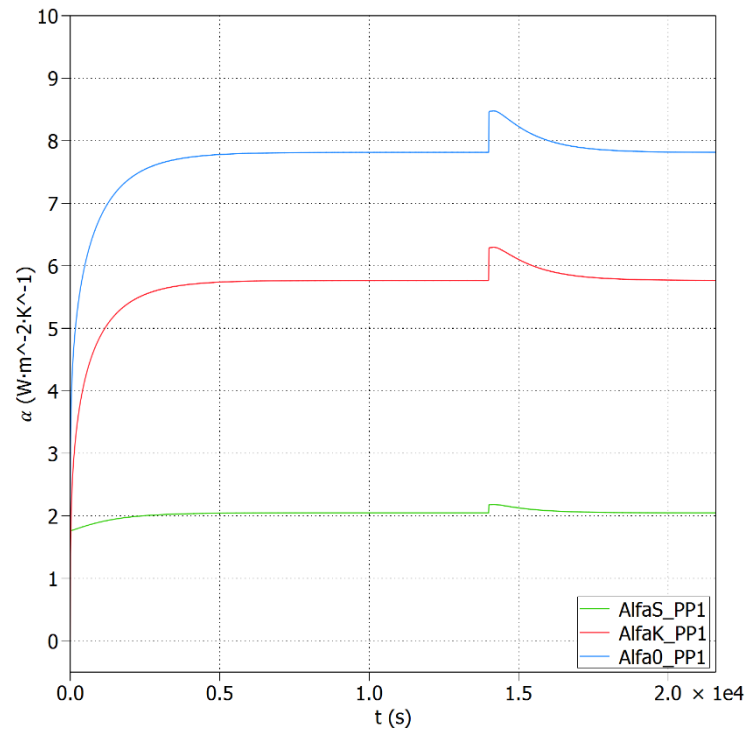
Obr. 3.11. Vybrané průběhy oteplení při proudovém rázu

Další vyhodnocované přechodové děje jsou spjaté se simulací prudkého nárůstu proudu. Oteplení vybraných částí při tomto ději je na Obr. 3.11. Při tomto proudovém rázu se nejvíce prudce oteplí části PP10 a DP10, tedy středy kontaktů na přípojnicích a kontaktní části nože. Z toho vyplývá, že největší vývin tepla je, jak bylo předpokládáno, na kontaktech. Části dále od kontaktů se vlivem malého odporu a vlastní tepelné kapacity oteplí jen málo. Velmi rychlý přechodový děj nastává v místech mezi částmi, které se oteplují prudce, a částmi, u nichž se oteplení tolik neprojevuje. Příklad těchto dějů je na Obr. 3.12. Tyto děje lze vysvětlit tak, že po rychlém proudovém rázu je teplo, které zde vzniklo, částečně odvedeno do blízké části, která zůstala chladnější, nebo do okolí. Následně se z teplejší části kontaktů díky zpoždění k místu dostává teplo, které způsobí opětovný ohřev. Fyzikálně je toto zpoždění, způsobené postupným předáváním energie atomů v pevných látkách, určeno tepelnou vodivostí. Toto však model nezahrnuje. Zpoždění zde způsobuje různá časová konstanta jednotlivých částí, závislá na tepelné kapacitě a tepelných odporech.



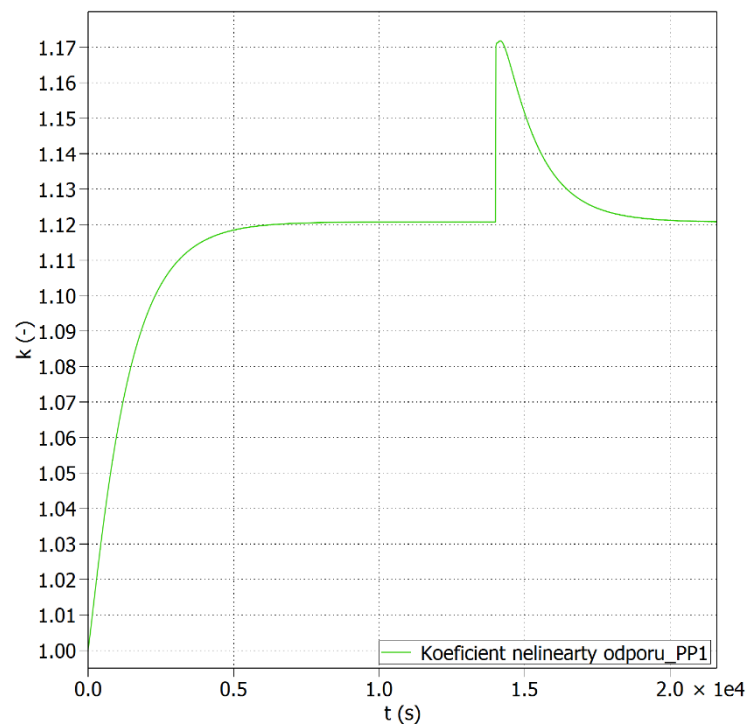
Obr. 3.12. Detail přechodového děje

Průběh součinitelů přestupu tepla článku PP1 je na Obr. 3.13. Součinitel přestupu tepla sáláním a konvekcí jsou určeny funkcemi v závislosti na oteplení, výsledný průběh součinitele je jejich součtem. Složka proudění podle předpokladů dosahuje vyšších hodnot. Narůstá od nulových hodnot, což odpovídá situaci, kdy je vzduch okolo teplosměnných ploch v klidovém stavu a s teplotním rozdílem se uvádí do většího pohybu. Souhrnný součinitel dosahuje ustálené hodnoty okolo 7,8, to odpovídá výpočtu v předchozí kapitole.



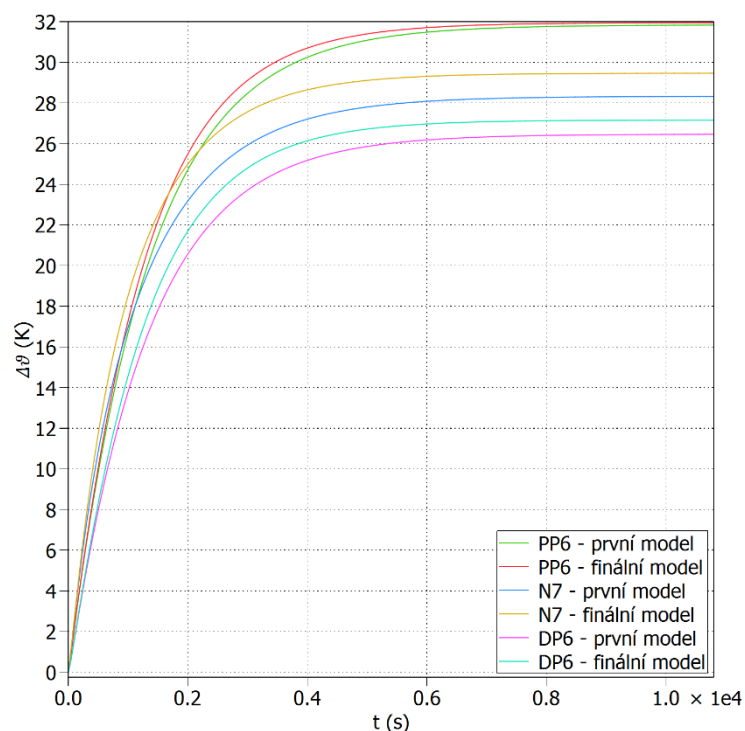
Obr. 3.13. Průběh součinitelů přestupu tepla článku PP1

Obr. 3.14 je zobrazen příklad průběhu koeficientu zvyšujícího elektrický odpor. Tento průběh zohledňuje nelinearitu odporu v závislosti na oteplení konkrétního článku.



Obr. 3.14. Koeficient respektující nelinearitu odporu článku PP1

Nakonec je uvedeno porovnání obou vytvořených modelů, viz Obr. 3.15. Na první pohled si oba modely téměř odpovídají, teplota na první přípojnici je téměř stejná. Hodnota na druhém praporci a noži se liší zhruba o 0,5 °K. Tento rozdíl je způsoben především odlišným součinitelem přestupu tepla, který byl pro první model zadán jako konstanta, zatímco ve finální modelu je počítán. Vliv otočného kontaktu je pro rozdíl simulací nepatrný, to bylo ověřeno pokusným modelem bez tohoto vlivu. Vzhledem k zavedení součinitele přestupu tepla se dá předpokládat, že finální model bude přesnější.

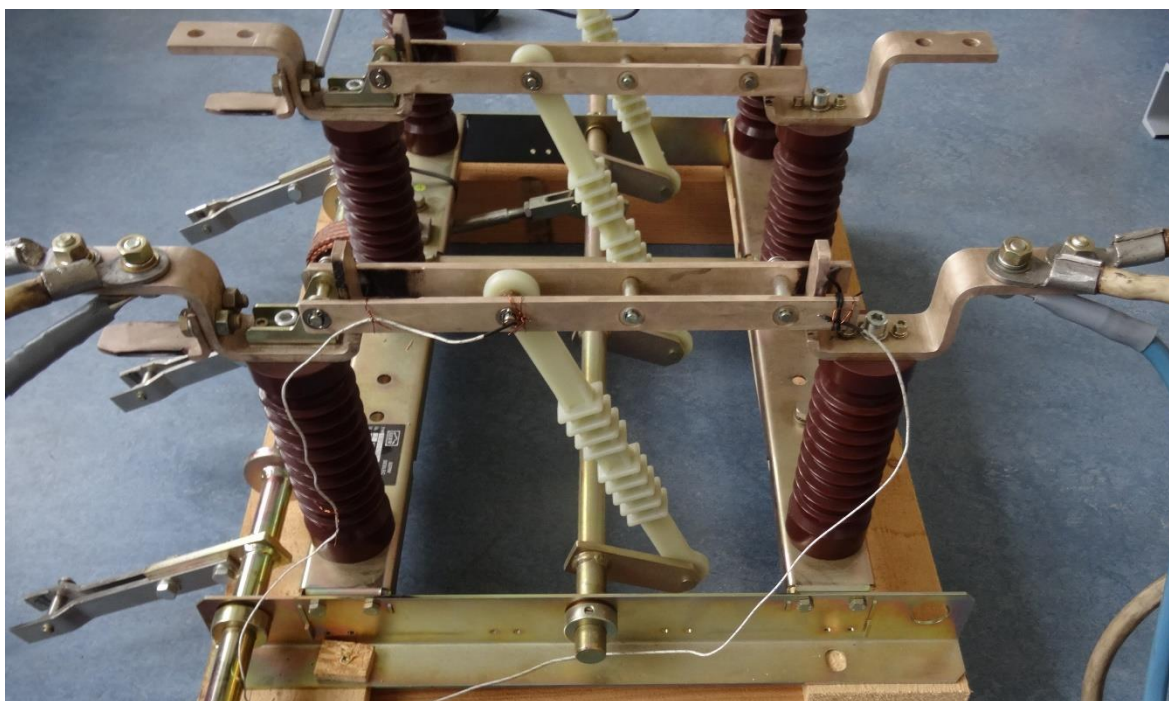


Obr. 3.15. Porovnání vytvořených modelů

Při důkladné analýze přechodových jevů na Obr. 3.15. je patrné, že finální model se oproti modelu s konstantním součinitelem přestupu tepla otepluje rychleji. Při vyhodnocení časových konstant bylo zjištěno, že například oteplení v místě PP6 má pro první model časovou konstantu 1345,70 s, zatímco finální model má konstantu 1271,15 s. Toto způsobuje proměnný součinitel přestupu tepla, který narůstá s oteplením.

3.3 Porovnání s reálným měřením

Pro ověření simulace bylo uskutečněno experimentální měření oteplení odpojovače při jeho jmenovitém proudu. Náhled na odpojovač při měření je na obrázku Obr. 3.16. K modelu byly připojeny dva termočlánky na místo v simulaci označené jako N7 a N1. Dále byl pořízen záznam pomocí termovize. Měření bylo provedeno dvakrát za účelem získání co nejlepších snímků termovize. Při druhém měření, ze kterého je použit záznam z termovize, byly použity pouze dva přívodní vodiče na každé straně. Měření probíhalo ve vnitřních prostorách učebny a měřená proudová dráha měla počáteční teplotu shodnou s teplotou okolí.



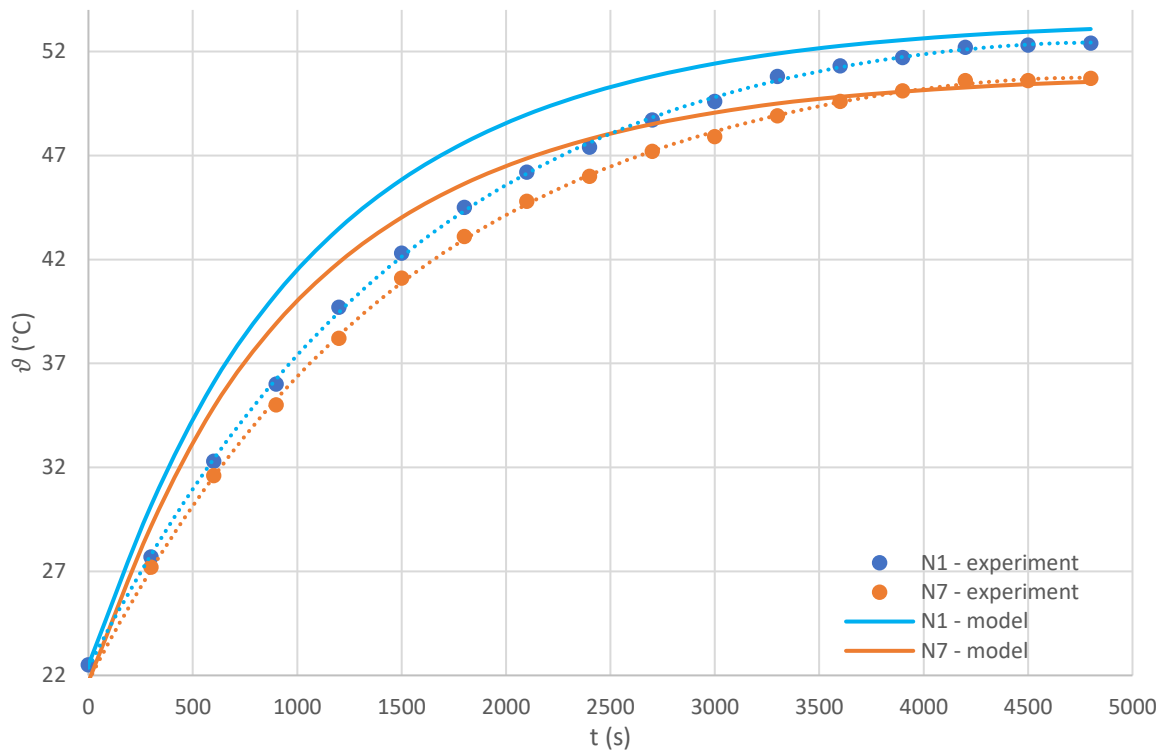
Obr. 3.16. Pohled na odpojovač při experimentálním měření

Hodnoty teplot termočlánků byly odečítány po 5 minutách do 80 minuty, kdy bylo měření ukončeno. Hodnoty z obou měření se shodovaly, i přes menší celkový průřez kabelů při druhém měření. Tato změna průřezu by byla nejvýrazněji patrná v částech praporců blíže místům připojení kabelů. Naměřené hodnoty identické pro obě měření jsou zaneseny v Tab. 3.2. Počáteční teploty se liší o $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, to je způsobeno především nepřesností termočlánků a chybou měřícího multimetru.

Tab. 3.2. Naměřené hodnoty teplot na odpojovači

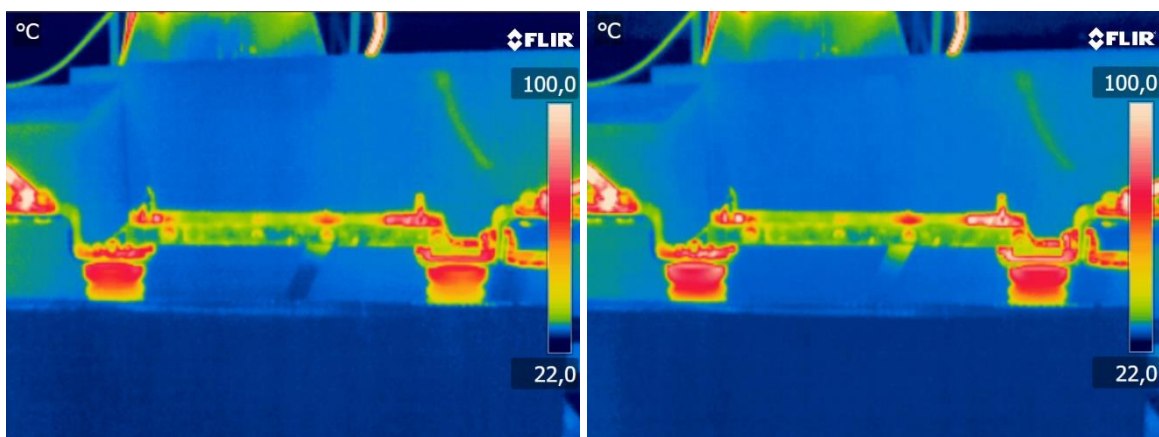
t (s)	N1 (°C)	N7 (°C)
0	22,5	21,7
300	27,7	27,2
600	32,3	31,6
900	36	35
1200	39,7	38,2
1500	42,3	41,1
1800	44,5	43,1
2100	46,2	44,8
2400	47,4	46
2700	48,7	47,2
3000	49,6	47,9
3300	50,8	48,9
3600	51,3	49,6
3900	51,7	50,1
4200	52,2	50,6
4500	52,3	50,6
4800	52,4	50,7

Naměřené hodnoty byly zaneseny do grafu a vhodně aproximovány, viz Obr. 3.17. Pro srovnání jsou přiloženy simulované průběhy teplot ve stejných místech. Z porovnání vyplývá, že simulovaný model v čase blízcímu se ustálené hodnotě dobře odpovídá skutečným výsledkům. Je však také patrná výrazná odchylka rychlosti oteplení. Časová konstanta pro simulovaný průběh teploty v místě N7 je 1010,35 s. Časová konstanta pro naměřený průběh pro toto místo je okolo 1300 s. Tato odchylka simulace může být způsobena rozdílnou celkovou tepelnou kapacitou a odlišným průběhem součinitelů sdílení tepla. V simulaci byla zanedbána tepelná kapacita izolátorů, stejně tak vliv přírodních kabelů a na ně dále připojeného masivního transformátoru. Průběh součinitele sdílení tepla alfa v tomto modelu výrazně ovlivňuje složka proudění. Ta je počítána ze vztahů, které jsou určeny pro určení součinitele přestupu tepla prouděním pro ustálený stav, to může vést k pozorovanému rozdílu průběhů teplot.



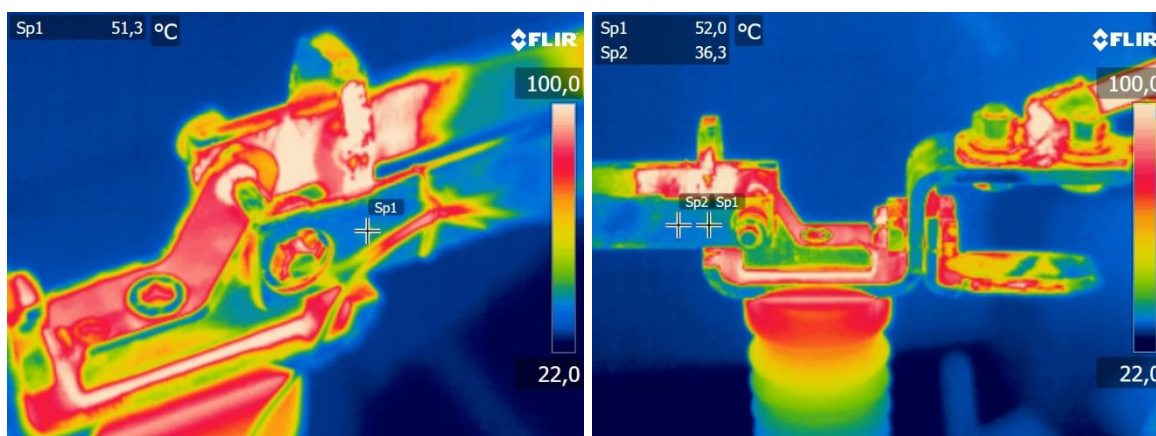
Obr. 3.17. Porovnání simulovaných a naměřených hodnot

Ve stejném čase, kdy byly zapisovány teploty termočlánků, byly pořizovány snímky termovize s nastavenou emisivitou 0,3. Pro omezení vlivu okolí byl odpojovač během měření obestavěn clonícími stěnami. Na Obr. 3.18. jsou zobrazeny dva snímky, levý snímek je pořízený v 45 minutě a pravý snímek v 75 minutě. Nárůst oteplení s časem je zřetelný. Na snímcích jako nejteplejší místa vycházejí izolátory, vnitřní plochy nožů u kontaktů a přívodní vodiče, to je ovšem způsobené jejich výrazně vyšší emisivitou. Hodnoty teplot na snímcích termovize vycházejí v různých místech proudové dráhy odlišné o desítky stupňů, to je způsobeno velkou odrazivostí povrchu, který je patrně povrchově upraven pasivací.

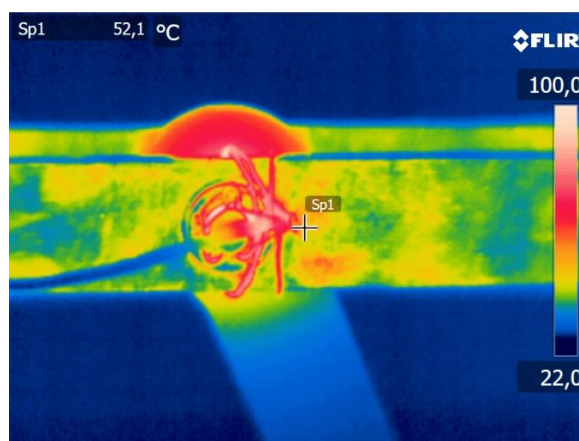


Obr. 3.18. Celkové snímky termovize v 45 a 75 minutě

Na levé polovině obrázku Obr. 3.19. je vliv těchto odrazů jasně patrný na ploše praporce nad kontakty, kde dochází k zrcadlení teploty nože. Stejně tak teploty vnitřních částí držáku vycházejí vysoké vlivem vzájemných odrazů na sebe sálajících stěn. Porovnatelný snímek termovize je na Obr. 3.20. Při pořízení tohoto snímku byla kamera blízko nože a kolmo na povrch, tím se eliminoval vliv odrazů. Z tohoto snímku bodovým měřením v místě teplotní sondy byla zjištěna teplota 52,1 °C. Tato teplota odpovídá teplotě naměřené termočlánkem, lze tedy říci, že určená emisivita povrchu 0,3 je odpovídající.



Obr. 3.19. Detaily termovize v místě druhého praporce



Obr. 3.20. Detail termovize v místě měřicí sondy

4 Možnosti zlepšení chlazení

V případě, kdy byla zjištěna příliš vysoká teplota celého nebo jen jeho části, je třeba realizovat odpovídající opatření pro snížení oteplení. Obecně platí, že odvod tepla z proudové dráhy do okolí lze zlepšit zvětšením teplosměnné plochy a zvýšením součinitele přestupu tepla.

Zvětšení teplosměnné plochy je obvykle nejjednodušší způsob pro zařízení, která nejsou příliš prostorově omezena. Zvětšení plochy lze efektivně provést přidáním chladícího žebrování nebo zvětšením některých částí. Sdílení tepla sáláním lze zlepšit zvýšením emisivity vhodnou úpravou povrchu sálavých ploch. Větší možnosti však představuje sdílení tepla prouděním. Nejjednodušším způsobem jeho zlepšení je vhodná konstrukce zařízení, které umožňuje dobrý průtok chladícího média okolo zahříváných ploch a zároveň efektivně využívá sifonový efekt. Přívod chladícího média by měl být z co nejchladnějšího místa pro co nejvyšší teplotní spád. V případě, kdy přirozené proudění chladícího média nedostačuje, lze za pomoci ventilátoru nebo čerpadla vytvořit nucený oběh, který umožňuje vytvořit proud média i v problematických místech. Proud chladícího média lze směřovat k potřebným částem pomocí deflektoru. Většina elektrických zařízení je chlazená vzduchem, je to nejjednodušší a nejméně nákladný způsob. V případech, kde je chlazení vzduchem nedostačující a nelze zajistit rovnoměrnější rozložení teplot tak, aby nedosahovalo maximálních mezí, přistupuje se ke změně chladícího média. Výrazně lepší chladící účinky přináší vodík, olej nebo voda. S těmito médii je ovšem nutné mít nákladné hospodářství pro danou chladící látku.

Jiný způsob, jak docílit snížení oteplení je zmenšení elektrického odporu proudové dráhy, čímž dojde k redukci tepelných ztrát. Elektrický odpor vodiče se snižuje zvětšením jeho průřezu, případně volbou materiálu s lepší elektrickou vodivostí. Zvětšení průřezu vodiče zvyšuje také jeho tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu, to zlepšuje rovnoměrnost rozložení teplot a snižuje rychlost nárůstu oteplení při prudkém zvýšení proudu. U odporu elektrického kontaktu je situace složitější. Elektrický odpor lze snížit zvětšením plochy kontaktu, zvýšením přitlačné síly, volbou vhodných materiálů nebo také tvarem kontaktů. U rozměrnějších kontaktů se aplikuje rozdělení do více paralelních ploch.

4.1 Možnosti zlepšení chlazení odpojovače

Simulovaný odpojovač vyhovuje stanoveným normám. Obecně oteplení odpojovačů nebývá problematické. V případě potřeby snížení oteplení se jako nejjednodušší jeví zvětšení průřezu částí proudové dráhy. Konstrukční úpravou nože nařiznutím v místech kontaktu dojde k rozdělení kontaktu do více míst, a tím k lepšímu stykovému odporu. Tato úprava spolu se zvětšením výšky nože a rozdělením přitlačného mechanismu je využívána u větších odpojovačů. Další využívanou možností je přidání paralelních nožů.

Závěr

Hlavním cílem diplomové práce byla numerická analýza oteplení proudové dráhy zadaného elektrického zařízení, kterým byl odpojovač pro distribuční síť v provedení pro vnitřní použití. Analýza oteplení proudové dráhy byla realizována metodou tepelné sítě. Ta je spolu s problematikou oteplení proudové dráhy včetně kontaktů zpracována v teoretické části práce. Na teoretickou část navazuje část praktická, kde se věnuji simulaci odpojovače. Tato část je oproti zadání doplněna experimentálními měřeními na daném odpojovači, které bylo realizováno v laboratoři elektrických přístrojů KEE.

Prvním cílem bylo vytvořit náhradní článek obsahující funkčně řízené odpory zohledňující závislost ztrát a přestupu tepla na oteplení. Program Simulink s modulem PLCES, ve kterém byla tepelná síť řešena, nedokáže řešit proměnné odpory bez paralelní vazby s kapacitou. Proto byly vytvořeny dva základní články pro stavbu modelu oteplení pomocí metody tepelné sítě. První článek je pro obecnou tepelnou tyč pouze s teplotní závislostí ztrát. Druhý článek je pro tepelně krátkou tyč, která umožnila zohlednit proměnný součinitel přestupu tepla. Z těchto článků byly vytvořeny dva modely tepelné sítě pro odpojovač.

Simulací byly zjištěny průběhy oteplení odpojovače při počátečním ohřevu i jmenovitém krátkodobém proudu. Z těchto závislostí byly odečteny velikosti oteplení a směr tepelných toků. Oteplení v ustáleném stavu se pohybovalo okolo hodnoty 30 °C, experimentálními měřeními bylo dosaženo stejných výsledků. U simulovaného průběhu byla však oproti experimentu časová konstanta o 290 sekund menší. Tato odchylka může být způsobena rozdílnou celkovou tepelnou kapacitou, odlišným průběhem součinitelů sdílení tepla a nedokonalě zohledněným vlivem přírodních kabelů.

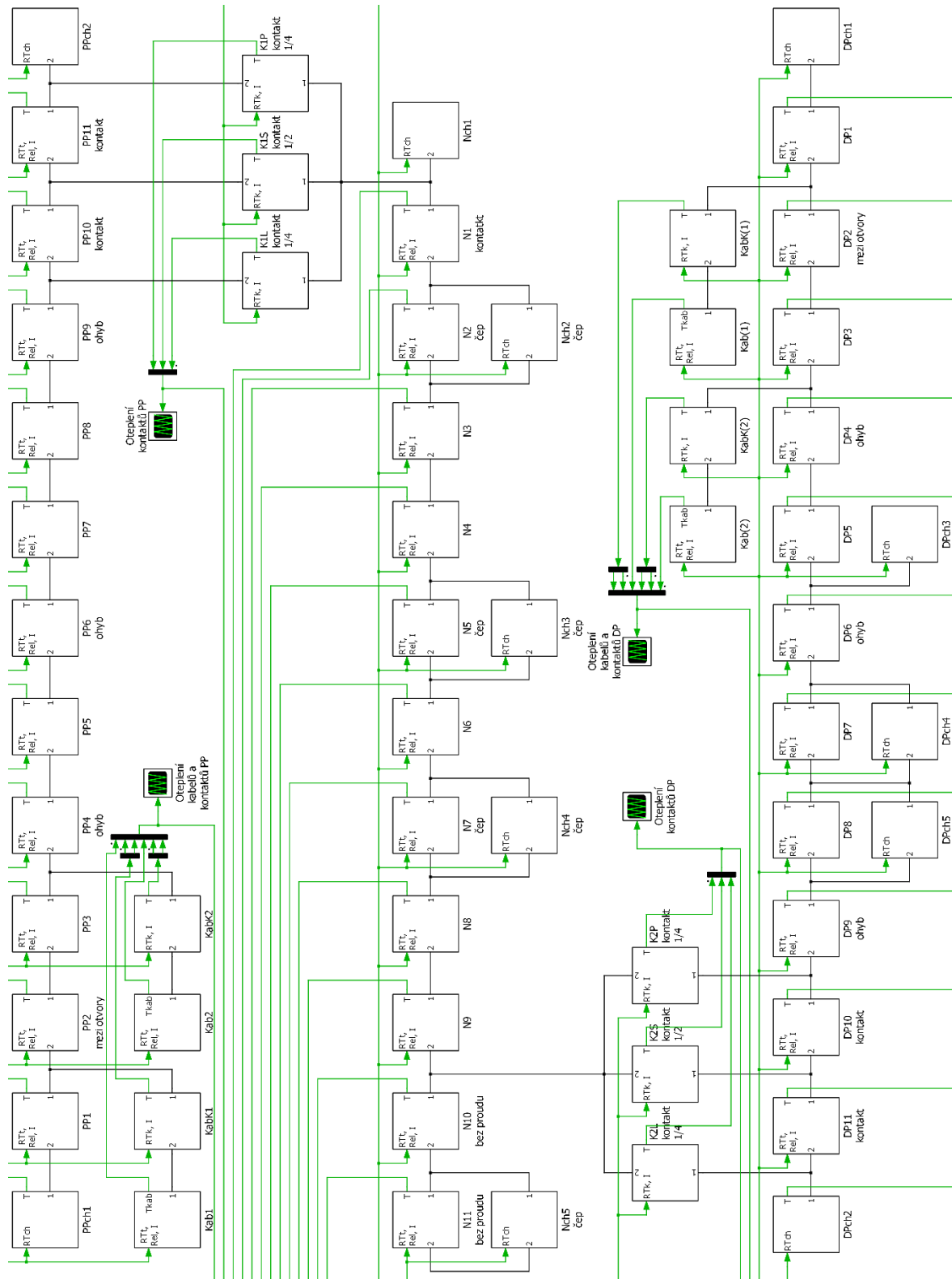
Přínos této práce je ve vytvoření aparátu pro řešení oteplení metodou tepelné sítě v programu PLECS. Pro proudovou dráhu řešenou metodou tepelné sítě lze podle této práce vytvořit model respektující nelinearitu odporu a přestupu tepla do okolí s funkčně zadávanými parametry. To umožňuje kvalitní analýzu přechodových dějů. Dále práce ukazuje způsob řešení proudové dráhy odpojovače a způsob rozdělení kontaktu na více článků.

Seznam literatury a informačních zdrojů

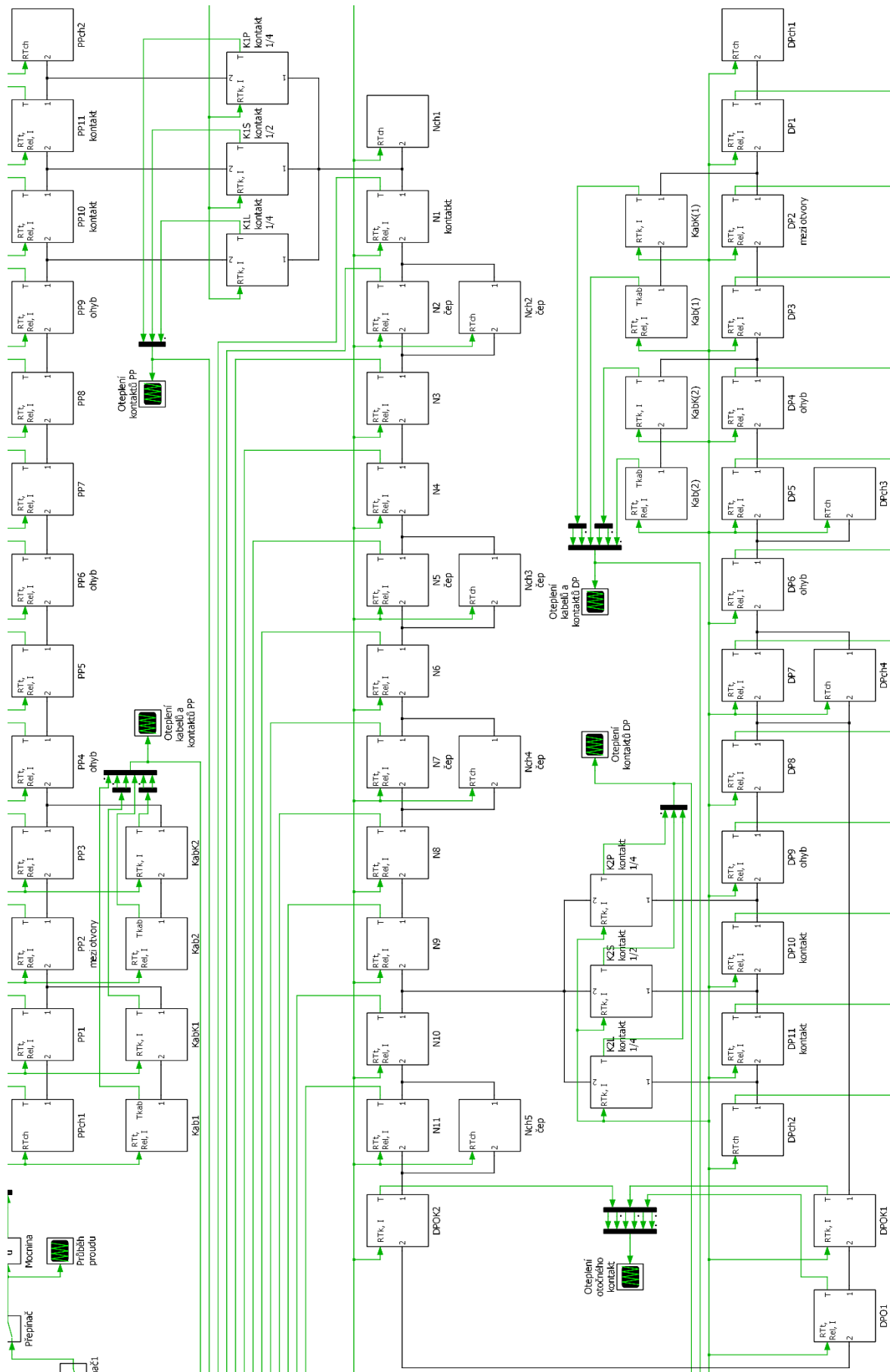
- [1] RUŠŇÁK, Š. a ŘEZÁČEK, P. *Elektrické přístroje 1. 2. přeprac. vyd.* Plzeň: ZČU, 2001. ISBN 807082-825-0.
- [2] HOFMANN, J. a URBANOVÁ, M. *Fyzika I* [online]. Verze 1.0, Praha: VŠCHT, 2005. [cit. 1.4.2017]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pages-img/obsah.html
- [3] ECKERTOVÁ, L. *Fyzikální elektronika pevných látek*. Praha: UK, 1992. ISBN 80-706-6535-1.
- [4] BUL', B. K. *Elektrické přístroje: základy teorie*. Praha: SNTL, 1977. Řada elektrotechnické literatury.
- [5] DĚDEK, L. *Teorie elektromagnetického pole*. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990. ISBN 80-214-0219-9.
- [6] RADA, J. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985.
- [7] VOSTRACKÝ, Z. a kol. *Možnosti proudového zatěžování vedení VVN/ZVN*. Plzeň, 2010.
- [8] LANGER, E. *Elektrotepelná technika, část I + II*. vyd. 2. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1974.
- [9] MICHEJEV, M. A. *Základy sdílení tepla*. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952.
- [10] HAVELKA, O. a kol. *Elektrické přístroje*. Brno: VUT, 1985.
- [11] K&K Associates. *Thermal Network Modeling Handbook* [online]. Westminster, USA, 2005. [cit. 9.5.2017]. Dostupné z: <http://www.tak2000.com/data/handbookx.pdf>
- [12] BRAUNOVIĆ, M., KONCHITS, V. V a MYSHKIN, K. N. *Fundamentals of Electrical Contacts* [online]. Columbus: The Ohio State University, 2006. [cit. 9.5.2017]. Dostupné z: <http://s1.downloadmienphi.net/file/downloadfile6/192/1385058.pdf>
- [13] HAVELKA, O., SVOBODA D. a VÁVRA Z. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*, 1985. ISBN podklady elektrických přístrojů.
- [14] PLEXIM GmbH. *Support* [online]. Zurich, Switzerland. [cit. 10.5.2017]. Dostupné z: <https://www.plexim.com>
- [15] HENNLICH. *Produkty: pružiny* [online]. [cit. 10.5.2017]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/pruziny-77.html>

Přílohy

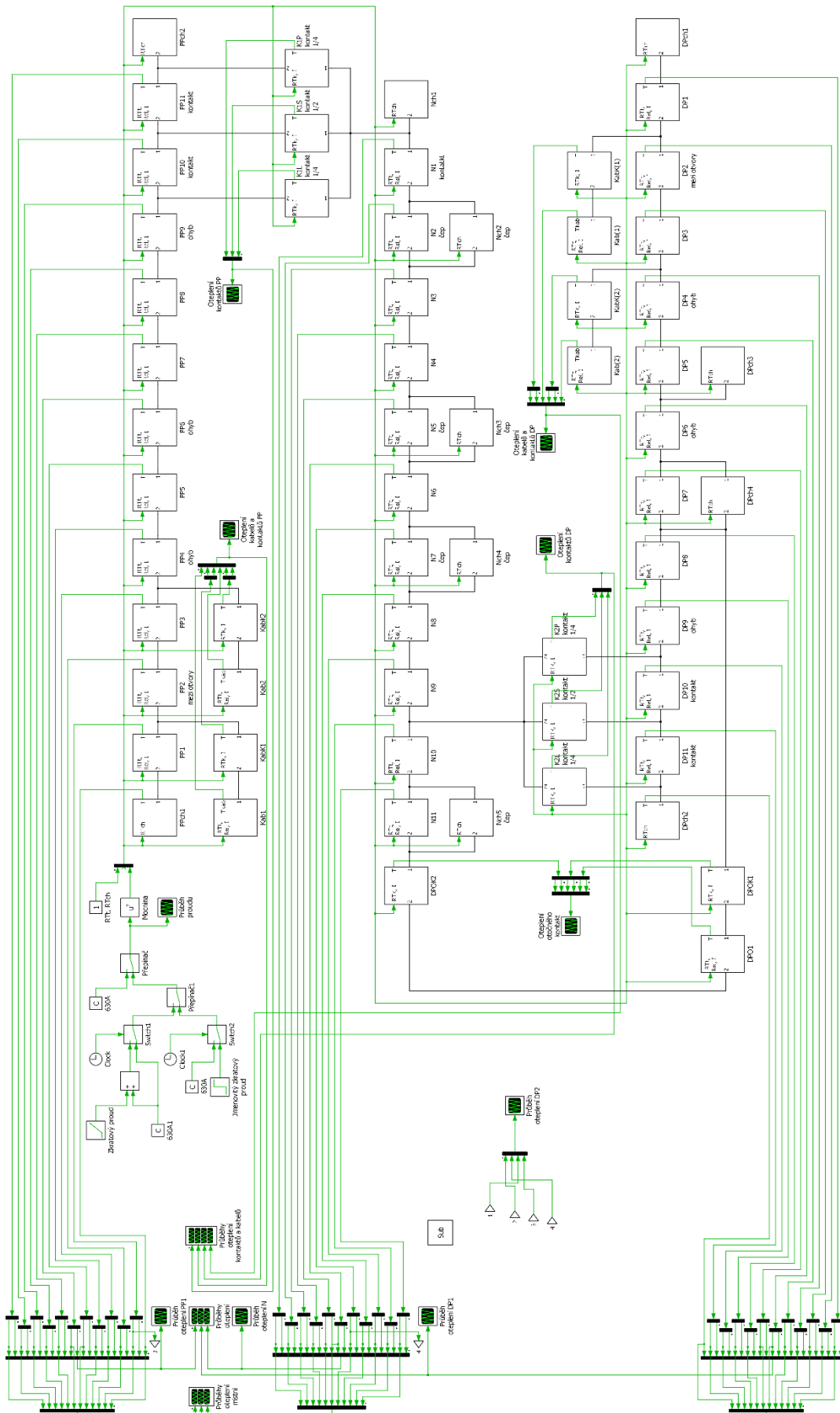
Příloha A – Náhradní schéma pro model odpojovače bez otočného kontaktu



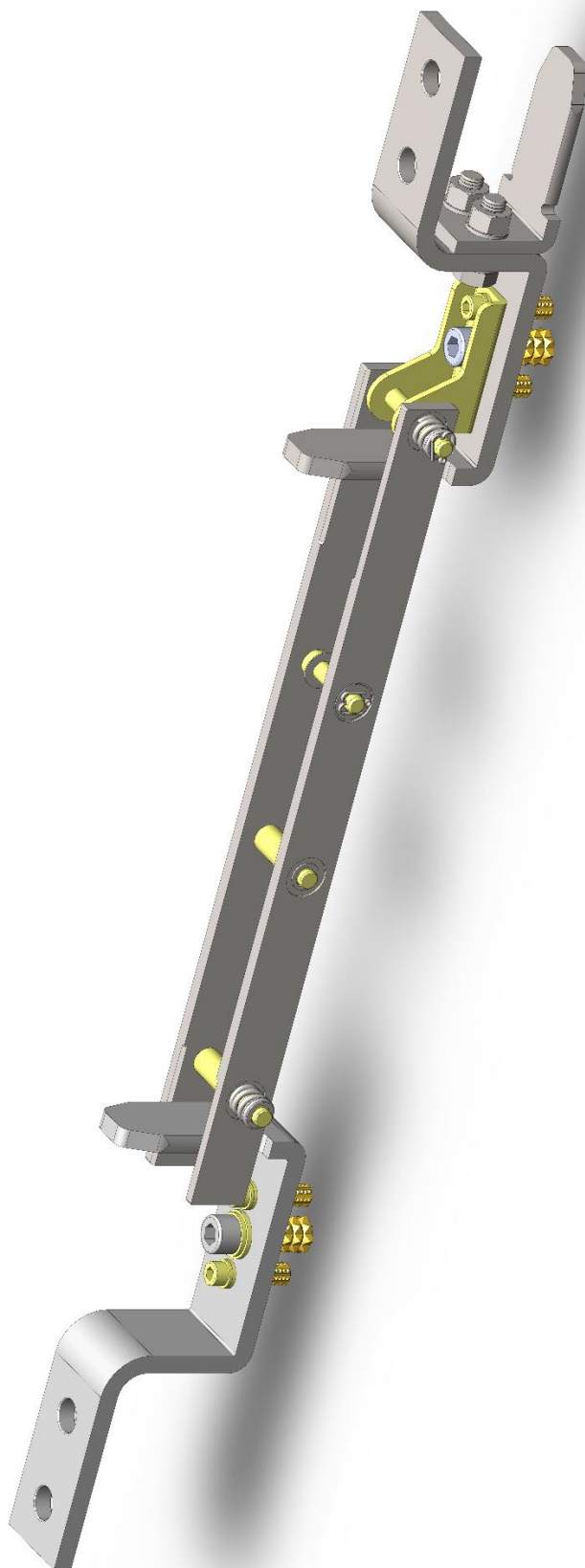
Příloha B – Náhradní schéma pro model odpojovače s otočným kontaktem



Příloha C – Celkové náhradní schéma v programu PLECS



Příloha D – Model odpojovače zpracovaný v programu SolidWorks



Příloha E – Skript v programu MATLAB

```

clear, clc
%Konstaty pro následující výpočty
lambdaCu=386; %tepelná vodivost elektrovedné mědi
lambdaOceli=50; %tepelná vodivost konstrukční oceli
roCu=1.77e-8; %elektrická vodivost elektrovedné mědi
roOceli=9.5e-8; %elektrická vodivost konstrukční oceli
alfaCu1=0.004; %první teplotní součinitel elektrovedné mědi
alfaCu2=0; %druhý teplotní součinitel elektrovedné mědi
epsilonCu=0.3; %emisivita mědi
epsilonOceli=0.3; %emisivita oceli s měděnou povrchovou úpravou
cvCu=3.45e6; %měrná objemová tepelná kapacita elektroved. mědi
cvOceli=3.611e6; %měrná objemová tepelná kapacita oceli
cvMosazi=3.244e6; %měrná objemová tepelná kapacita mosazy
K1_kCu=12e-4; %materiálová konstanta kontaktu měď - meď
K1_kOceli=21e-3; %materiálová konstanta kontaktu měď - meď
Tpoc=0; %Počáteční hodnota oteplení tepelných kapacit
T0=0; %Počáteční teplota pro teplotní závislosti odporu
TOK=22; %Počáteční teplota pro součinitel sálání
%Výpočet částí prvního praporce (bez zemnicího praporce)
%Části prvního praporce figurující jako chladiče
%Část od kraje praporce k otvoru pro připojení vodiče
PPch1_delka=12.5e-3; %délka části
PPch1_prurez=320e-6; %průřez části
PPch1_plocha=1270e-6; %efektivní chladičí plocha části
PPch1_objem=4000e-9; %objem části
PPch1_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
PPch1_obvod=PPch1_plocha/PPch1_delka; %chladičí obvod části
PPch1_RTch=1/(PPch1_alfa0*PPch1_plocha);
PPch1_C=PPch1_objem*cvCu;
%Část nad kontaktem
PPch2_delka=34.5e-3; %délka části
PPch2_prurez=238.95e-6; %průřez části
PPch2_plocha=2519e-6; %efektivní chladičí plocha části
PPch2_objem=7371.25e-9; %objem části
PPch2_alfa0=7.8; %součinitel přestupu tepla
PPch2_obvod=PPch2_plocha/PPch2_delka; %chladičí obvod části
PPch2_RTch=1/(PPch2_alfa0*PPch2_plocha);
PPch2_C=PPch2_objem*cvCu;
%Části proudové dráhy
%Část otvoru pro připojení vodiče
PP1_delka=15e-3; %délka části
PP1_prurez=240e-6; %průřez části (zmenšený o 4/3)
PP1_plocha=875e-6; %efektivní chladičí plocha části
PP1_objem=3557.24e-9; %objem části
PP1_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
PP1_k=1; %koeficient el. odporu
PP1_obvod=PP1_plocha/PP1_delka; %chladičí obvod části
PP1_beta=sqrt(PP1_alfa0*PP1_obvod/(lambdaCu*PP1_prurez));
PP1_delta=sqrt(PP1_alfa0*PP1_obvod*lambdaCu*PP1_prurez);
PP1_RTl=(sinh(PP1_beta*PP1_delka))/PP1_delta;
PP1_RTt=1/(PP1_delta*tanh((PP1_beta*PP1_delka)/2));
PP1_Rel=roCu*PP1_k*(PP1_delka/PP1_prurez);
PP1_C=PP1_objem*cvCu;
%Část mezi otvory
PP2_delka=25e-3; %délka části
PP2_prurez=320e-6; %průřez části
PP2_plocha=1900e-6; %efektivní chladičí plocha části
PP2_objem=8000e-9; %objem části
PP2_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla

```

```

PP2_k=1; %koeficient el. odporu
PP2_obvod=PP2_plocha/PP2_delka; %chladicí obvod části
PP2_beta=sqrt(PP2_alfa0*PP2_obvod/(lambdaCu*PP2_prurez));
PP2_delta=sqrt(PP2_alfa0*PP2_obvod*lambdaCu*PP2_prurez);
PP2_RTl=(sinh(PP2_beta*PP2_delka))/PP2_delta;
PP2_RTt=1/(PP2_delta*tanh((PP2_beta*PP2_delka)/2));
PP2_Rel=roCu*PP2_k*(PP2_delka/PP2_prurez);
PP2_C=PP2_objem*cvCu;
%Část druhého otvoru pro připojení vodiče
PP3_delka=15e-3; %délka části
PP3_prurez=240e-6; %průřez části (zmenšený o 4/3)
PP3_plocha=875e-6; %efektivní chladicí plocha části
PP3_objem=3557.24e-9; %objem části
PP3_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
PP3_k=1; %koeficient el. odporu
PP3_obvod=PP3_plocha/PP3_delka; %chladicí obvod části
PP3_beta=sqrt(PP3_alfa0*PP3_obvod/(lambdaCu*PP3_prurez));
PP3_delta=sqrt(PP3_alfa0*PP3_obvod*lambdaCu*PP3_prurez);
PP3_RTl=(sinh(PP3_beta*PP3_delka))/PP3_delta;
PP3_RTt=1/(PP3_delta*tanh((PP3_beta*PP3_delka)/2));
PP3_Rel=roCu*PP3_k*(PP3_delka/PP3_prurez);
PP3_C=PP3_objem*cvCu;
%Část od druhého otvoru po konec prvního ohybu
PP4_delka=35.062e-3; %délka části
PP4_prurez=320e-6; %průřez části
PP4_plocha=3135.95e-6; %efektivní chladicí plocha části
PP4_objem=11219.82e-9; %objem části
PP4_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
PP4_k=1; %koeficient el. odporu
PP4_obvod=PP4_plocha/PP4_delka; %chladicí obvod části
PP4_beta=sqrt(PP4_alfa0*PP4_obvod/(lambdaCu*PP4_prurez));
PP4_delta=sqrt(PP4_alfa0*PP4_obvod*lambdaCu*PP4_prurez);
PP4_RTl=(sinh(PP4_beta*PP4_delka))/PP4_delta;
PP4_RTt=1/(PP4_delta*tanh((PP4_beta*PP4_delka)/2));
PP4_Rel=roCu*PP4_k*(PP4_delka/PP4_prurez);
PP4_C=PP4_objem*cvCu;
%Část od prvního ohybu k 5mm od druhého ohybu
PP5_delka=33e-3; %délka části
PP5_prurez=320e-6; %průřez části
PP5_plocha=3168e-6; %efektivní chladicí plocha části
PP5_objem=10560e-9; %objem části
PP5_alfa0=7.8; %součinitel přestupu tepla
PP5_k=1; %koeficient el. odporu
PP5_obvod=PP5_plocha/PP5_delka; %chladicí obvod části
PP5_beta=sqrt(PP5_alfa0*PP5_obvod/(lambdaCu*PP5_prurez));
PP5_delta=sqrt(PP5_alfa0*PP5_obvod*lambdaCu*PP5_prurez);
PP5_RTl=(sinh(PP5_beta*PP5_delka))/PP5_delta;
PP5_RTt=1/(PP5_delta*tanh((PP5_beta*PP5_delka)/2));
PP5_Rel=roCu*PP5_k*(PP5_delka/PP5_prurez);
PP5_C=PP5_objem*cvCu;
%Část ohybů a 5mm od každé strany
PP6_delka=17.854e-3; %délka části
PP6_prurez=320e-6; %průřez části
PP6_plocha=1613.98e-6; %efektivní chladicí plocha části
PP6_objem=5713.27e-9; %objem části
PP6_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
PP6_k=1; %koeficient el. odporu
PP6_obvod=PP6_plocha/PP6_delka; %chladicí obvod části
PP6_beta=sqrt(PP6_alfa0*PP6_obvod/(lambdaCu*PP6_prurez));
PP6_delta=sqrt(PP6_alfa0*PP6_obvod*lambdaCu*PP6_prurez);
PP6_RTl=(sinh(PP6_beta*PP6_delka))/PP6_delta;

```

```

PP6_RTt=1/(PP6_delta*tanh((PP6_beta*PP6_delka)/2));
PP6_Rel=roCu*PP6_k*(PP6_delka/PP6_prurez);
PP6_C=PP6_objem*cvCu;
%Část 5mm ohybu do poloviny šroubu M10
PP7_delka=39e-3; %délka části
PP7_prurez=320e-6; %průřez části
PP7_plocha=2721.8e-6; %efektivní chladicí plocha části
% (z toho plocha šroubů 605.39e-6)
PP7_objem_medi=11939.65e-9; %objem části elektrovodné mědi
PP7_objem_oceli=3221.9e-9; %objem šroubů
PP7_objem_mosazi=1593.8e-9; %objem mosazných vložek
PP7_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
PP7_k=1; %koeficient el. odporu
PP7_obvod=PP7_plocha/PP7_delka; %chladicí obvod části
PP7_beta=sqrt(PP7_alfa0*PP7_obvod/(lambdaCu*PP7_prurez));
PP7_delta=sqrt(PP7_alfa0*PP7_obvod*lambdaCu*PP7_prurez);
PP7_RTl=(sinh(PP7_beta*PP7_delka))/PP7_delta;
PP7_RTt=1/(PP7_delta*tanh((PP7_beta*PP7_delka)/2));
PP7_Rel=roCu*PP7_k*(PP7_delka/PP7_prurez);
PP7_C=PP7_objem_medi*cvCu+PP7_objem_oceli*cvOceli+PP7_objem_mosazi*cvMosa
zi;
%Část od poloviny šroubu M10 k 5mm od ohybu
PP8_delka=39e-3; %délka části
PP8_prurez=320e-6; %průřez části
PP8_plocha=2721.8e-6; %efektivní chladicí plocha části
PP8_objem_medi=11939.65e-9; %objem části elektrovodné mědi
PP8_objem_oceli=3221.9e-9; %objem šroubů
PP8_objem_mosazi=1593.8e-9; %objem mosazných vložek
PP8_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
PP8_k=1; %koeficient el. odporu
PP8_obvod=PP8_plocha/PP8_delka; %chladicí obvod části
PP8_beta=sqrt(PP8_alfa0*PP8_obvod/(lambdaCu*PP8_prurez));
PP8_delta=sqrt(PP8_alfa0*PP8_obvod*lambdaCu*PP8_prurez);
PP8_RTl=(sinh(PP8_beta*PP8_delka))/PP8_delta;
PP8_RTt=1/(PP8_delta*tanh((PP8_beta*PP8_delka)/2));
PP8_Rel=roCu*PP8_k*(PP8_delka/PP8_prurez);
PP8_C=PP8_objem_medi*cvCu+PP8_objem_oceli*cvOceli+PP8_objem_mosazi*cvMosa
zi;
%Část 5mm před ohybem ke kontaktu
PP9_delka=27.354e-3; %délka části
PP9_prurez=320e-6; %průřez části
PP9_plocha=2491.11e-6; %efektivní chladicí plocha části
PP9_objem=8156.97e-9; %objem části
PP9_alfa0=7.8; %součinitel přestupu tepla
PP9_k=1.3; %koeficient el. odporu (zúžení)
PP9_obvod=PP9_plocha/PP9_delka; %chladicí obvod části
PP9_beta=sqrt(PP9_alfa0*PP9_obvod/(lambdaCu*PP9_prurez));
PP9_delta=sqrt(PP9_alfa0*PP9_obvod*lambdaCu*PP9_prurez);
PP9_RTl=(sinh(PP9_beta*PP9_delka))/PP9_delta;
PP9_RTt=1/(PP9_delta*tanh((PP9_beta*PP9_delka)/2));
PP9_Rel=roCu*PP9_k*(PP9_delka/PP9_prurez);
PP9_C=PP9_objem*cvCu;
%Část první poloviny kontaktu
PP10_delka=12.5e-3; %délka části
PP10_prurez=238.95e-6; %průřez části
PP10_plocha=730e-6; %efektivní chladicí plocha části
PP10_objem=2986.87e-9; %objem části
PP10_alfa0=7.8; %součinitel přestupu tepla
PP10_k=1; %koeficient el. odporu
PP10_obvod=PP10_plocha/PP10_delka; %chladicí obvod části
PP10_beta=sqrt(PP10_alfa0*PP10_obvod/(lambdaCu*PP10_prurez));

```



```

PP10_delta=sqrt(PP10_alfa0*PP10_obvod*lambdaCu*PP10_prurez);
PP10_RTl=(sinh(PP10_beta*PP10_delka)/PP10_delta);
PP10_RTt=1/(PP10_delta*tanh((PP10_beta*PP10_delka)/2));
PP10_Rel=roCu*PP10_k*(PP10_delka/PP10_prurez);
PP10_C=PP10_objem*cvCu;
%Část druhé poloviny kontaktu
PP11_delka=12.5e-3; %délka části
PP11_prurez=238.95e-6; %průřez části
PP11_plocha=730e-6; %efektivní chladicí plocha části
PP11_objem=2986.87e-9; %objem části
PP11_alfa0=7.8; %součinitel přestupu tepla
PP11_k=1; %koeficient el. odporu
PP11_obvod=PP11_plocha/PP11_delka; %chladicí obvod části
PP11_beta=sqrt(PP11_alfa0*PP11_obvod/(lambdaCu*PP11_prurez));
PP11_delta=sqrt(PP11_alfa0*PP11_obvod*lambdaCu*PP11_prurez);
PP11_RTl=(sinh(PP11_beta*PP11_delka)/PP11_delta);
PP11_RTt=1/(PP11_delta*tanh((PP11_beta*PP11_delka)/2));
PP11_Rel=roCu*PP11_k*(PP11_delka/PP11_prurez);
PP11_C=PP11_objem*cvCu;
%Výpočet částí nože
%Kontakty nože
K1_delka=25e-3; %délka části
K1_F=140; %přítlačná síla kontaktu
K1_n=0.7; %tab. hodnota pro přímkový styk
K1_c=0.8; %koef. přestupu tepla kontaktu
K1_Rel1=K1_kCu*K1_F^(-K1_n);
K1_RTk1=K1_c*K1_Rel1/(lambdaCu*roCu);
K1_Rel=K1_Rel1/2; %korekce pro paralelní kontakty
K1_RTk=K1_RTk1/2; %korekce pro paralelní kontakty
K2_Rel=K1_Rel1/2; %korekce pro paralelní kontakty
K2_RTk=K1_RTk1/2; %korekce pro paralelní kontakty
%Chladicí části nože
%Chladicí část na špici nože
Nch1_plocha=1513.8e-6; %efektivní chladicí plocha části
Nch1_objem=3543.97e-9; %objem části
Nch1_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
Nch1_RTch1=1/(Nch1_alfa0*Nch1_plocha);
Nch1_C1=Nch1_objem*cvCu;
Nch1_RTch=Nch1_RTch1/2; %korekce pro paralelní dva nože
Nch1_C=Nch1_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Část delšího čepu s pružinou a pojistným kroužkem
Nch2_plocha=2850.6e-6; %efektivní chladicí plocha části
Nch2_objem=4944.92e-9; %objem části
Nch2_alfa0=8.5; %součinitel přestupu tepla
Nch2_RTch=2/(Nch2_alfa0*Nch2_plocha);
Nch2_C=Nch2_objem*cvCu;
%Část kratšího čepu s pojistným kroužkem
Nch3_plocha=1161.2e-6; %efektivní chladicí plocha části
Nch3_objem=3056.14e-9; %objem části
Nch3_alfa0=8.5; %součinitel přestupu tepla
Nch3_RTch=2/(Nch3_alfa0*Nch3_plocha);
Nch3_C=Nch3_objem*cvCu;
%Část kratšího čepu se závlačkou
Nch4_plocha=656e-6; %efektivní chladicí plocha části
Nch4_objem=3041.25e-9; %objem části
Nch4_alfa0=8.5; %součinitel přestupu tepla
Nch4_RTch=2/(Nch4_alfa0*Nch4_plocha);
Nch4_C=Nch4_objem*cvCu;
%Část delšího čepu s pružinou a závlačkou
Nch5_plocha=2850.6e-6; %efektivní chladicí plocha části
Nch5_objem=4390.22e-9; %objem části

```

```

Nch5_alfa0=8.5; %součinitel přestupu tepla
Nch5_RTch=2/(Nch5_alfa0*Nch5_plocha);
Nch5_C=Nch5_objem*cvCu;
%Části proudové dráhy
%Část od středu kontaktu ke čtverci otvoru
N1_delka=11.5e-3; %délka části
N1_prurez=147.75e-6; %průřez části
N1_plocha=617.79e-6; %efektivní chladicí plocha části
N1_objem=3557.24e-9; %objem části
N1_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N1_k=1; %koeficient el. odporu
N1_obvod=N1_plocha/N1_delka; %chladicí obvod části
N1_beta=sqrt(N1_alfa0*N1_obvod/(lambdaCu*N1_prurez));
N1_delta=sqrt(N1_alfa0*N1_obvod*lambdaCu*N1_prurez);
N1_RTl1=(sinh(N1_beta*N1_delka))/N1_delta;
N1_RTt1=1/(N1_delta*tanh((N1_beta*N1_delka)/2));
N1_Rel1=roCu*N1_k*(N1_delka/N1_prurez);
N1_C1=N1_objem*cvCu;
N1_RTl=N1_RTl1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N1_RTt=N1_RTt1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N1_Rel=N1_Rel1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N1_C=N1_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Část čtverce otvoru
N2_delka=25e-3; %délka části
N2_prurez=147.75e-6; %průřez části
N2_plocha=1532.9e-6; %efektivní chladicí plocha části
N2_objem=3168.72e-9; %objem části
N2_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N2_k=1.1; %koeficient el. odporu
N2_obvod=N2_plocha/N2_delka; %chladicí obvod části
N2_beta=sqrt(N2_alfa0*N2_obvod/(lambdaCu*N2_prurez));
N2_delta=sqrt(N2_alfa0*N2_obvod*lambdaCu*N2_prurez);
N2_RTl1=(sinh(N2_beta*N2_delka))/N2_delta;
N2_RTt1=1/(N2_delta*tanh((N2_beta*N2_delka)/2));
N2_Rel1=roCu*N2_k*(N2_delka/N2_prurez);
N2_C1=N2_objem*cvCu;
N2_RTl=N2_RTl1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N2_RTt=N2_RTt1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N2_Rel=N2_Rel1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N2_C=N2_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Část od čtverce otvoru do poloviny části mezi otvory
N3_delka=38.5e-3; %délka části
N3_prurez=150e-6; %průřez části
N3_plocha=2387e-6; %efektivní chladicí plocha části
N3_objem=5775e-9; %objem části
N3_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N3_k=1; %koeficient el. odporu
N3_obvod=N3_plocha/N3_delka; %chladicí obvod části
N3_beta=sqrt(N3_alfa0*N3_obvod/(lambdaCu*N3_prurez));
N3_delta=sqrt(N3_alfa0*N3_obvod*lambdaCu*N3_prurez);
N3_RTl1=(sinh(N3_beta*N3_delka))/N3_delta;
N3_RTt1=1/(N3_delta*tanh((N3_beta*N3_delka)/2));
N3_Rel1=roCu*N3_k*(N3_delka/N3_prurez);
N3_C1=N3_objem*cvCu;
N3_RTl=N3_RTl1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N3_RTt=N3_RTt1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N3_Rel=N3_Rel1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N3_C=N3_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Část od poloviny části mezi otvory ke čtverci otvoru
N4_delka=38.5e-3; %délka části
N4_prurez=150e-6; %průřez části

```

```

N4_plocha=2387e-6; %efektivní chladicí plocha části
N4_objem=5775e-9; %objem části
N4_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N4_k=1; %koeficient el. odporu
N4_obvod=N4_plocha/N4_delka; %chladicí obvod části
N4_beta=sqrt(N4_alfa0*N4_obvod/(lambdaCu*N4_prurez));
N4_delta=sqrt(N4_alfa0*N4_obvod*lambdaCu*N4_prurez);
N4_RTl1=(sinh(N4_beta*N4_delka))/N4_delta;
N4_RTt1=1/(N4_delta*tanh((N4_beta*N4_delka)/2));
N4_Rel1=roCu*N4_k*(N4_delka/N4_prurez);
N4_C1=N4_objem*cvCu;
N4_RTl=N4_RTl1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N4_RTt=N4_RTt1/2;
N4_Rel=N4_Rel1/2;
N4_C=N4_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Část čtverce otvoru
N5_delka=25e-3; %délka části
N5_prurez=147.75e-6; %průřez části
N5_plocha=1532.9e-6; %efektivní chladicí plocha části
N5_objem=3168.72e-9; %objem části
N5_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N5_k=1.1; %koeficient el. odporu
N5_obvod=N5_plocha/N5_delka; %chladicí obvod části
N5_beta=sqrt(N5_alfa0*N5_obvod/(lambdaCu*N5_prurez));
N5_delta=sqrt(N5_alfa0*N5_obvod*lambdaCu*N5_prurez);
N5_RTl1=(sinh(N5_beta*N5_delka))/N5_delta;
N5_RTt1=1/(N5_delta*tanh((N5_beta*N5_delka)/2));
N5_Rel1=roCu*N5_k*(N5_delka/N5_prurez);
N5_C1=N5_objem*cvCu;
N5_RTl=N5_RTl1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N5_RTt=N5_RTt1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N5_Rel=N5_Rel1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N5_C=N5_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Část od čtverce otvoru ke čtverci otvoru
N6_delka=55e-3; %délka části
N6_prurez=150e-6; %průřez části
N6_plocha=3410e-6; %efektivní chladicí plocha části
N6_objem=8250e-9; %objem části
N6_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N6_k=1; %koeficient el. odporu
N6_obvod=N6_plocha/N6_delka; %chladicí obvod části
N6_beta=sqrt(N6_alfa0*N6_obvod/(lambdaCu*N6_prurez));
N6_delta=sqrt(N6_alfa0*N6_obvod*lambdaCu*N6_prurez);
N6_RTl1=(sinh(N6_beta*N6_delka))/N6_delta;
N6_RTt1=1/(N6_delta*tanh((N6_beta*N6_delka)/2));
N6_Rel1=roCu*N6_k*(N6_delka/N6_prurez);
N6_C1=N6_objem*cvCu;
N6_RTl=N6_RTl1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N6_RTt=N6_RTt1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N6_Rel=N6_Rel1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N6_C=N6_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Část čtverce otvoru
N7_delka=25e-3; %délka části
N7_prurez=147.75e-6; %průřez části
N7_plocha=1532.9e-6; %efektivní chladicí plocha části
N7_objem=3168.72e-9; %objem části
N7_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N7_k=1.1; %koeficient el. odporu
N7_obvod=N7_plocha/N7_delka; %chladicí obvod části
N7_beta=sqrt(N7_alfa0*N7_obvod/(lambdaCu*N7_prurez));
N7_delta=sqrt(N7_alfa0*N7_obvod*lambdaCu*N7_prurez);

```

```

N7_RTl1=(sinh(N7_beta*N7_delka))/N7_delta;
N7_RTt1=1/(N7_delta*tanh((N7_beta*N7_delka)/2));
N7_Rel1=roCu*N7_k*(N7_delka/N7_prurez);
N7_C1=N7_objem*cvCu;
N7_RTl=N7_RTl1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N7_RTt=N7_RTt1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N7_Rel=N7_Rel1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N7_C=N7_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Část od čtverce otvoru do poloviny části ke kontaktu
N8_delka=45.75e-3; %délka části
N8_prurez=150e-6; %průřez části
N8_plocha=2828.15e-6; %efektivní chladicí plocha části
N8_objem=6853.72e-9; %objem části
N8_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N8_k=1; %koeficient el. odporu
N8_obvod=N8_plocha/N8_delka; %chladicí obvod části
N8_beta=sqrt(N8_alfa0*N8_obvod/(lambdaCu*N8_prurez));
N8_delta=sqrt(N8_alfa0*N8_obvod*lambdaCu*N8_prurez);
N8_RTl1=(sinh(N8_beta*N8_delka))/N8_delta;
N8_RTt1=1/(N8_delta*tanh((N8_beta*N8_delka)/2));
N8_Rel1=roCu*N8_k*(N8_delka/N8_prurez);
N8_C1=N8_objem*cvCu;
N8_RTl=N8_RTl1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N8_RTt=N8_RTt1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N8_Rel=N8_Rel1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N8_C=N8_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Část od poloviny části ke kontaktu
N9_delka=45.75e-3; %délka části
N9_prurez=147.75e-6; %průřez části
N9_plocha=2756.1e-6; %efektivní chladicí plocha části
N9_objem=6759.56e-9; %objem části
N9_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N9_k=1; %koeficient el. odporu
N9_obvod=N9_plocha/N9_delka; %chladicí obvod části
N9_beta=sqrt(N9_alfa0*N9_obvod/(lambdaCu*N9_prurez));
N9_delta=sqrt(N9_alfa0*N9_obvod*lambdaCu*N9_prurez);
N9_RTl1=(sinh(N9_beta*N9_delka))/N9_delta;
N9_RTt1=1/(N9_delta*tanh((N9_beta*N9_delka)/2));
N9_Rel1=roCu*N9_k*(N9_delka/N9_prurez);
N9_C1=N9_objem*cvCu;
N9_RTl=N9_RTl1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N9_RTt=N9_RTt1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N9_Rel=N9_Rel1/2; %korekce pro dva paralelní nože
N9_C=N9_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Části u otočného spoje
%Část od kontaktu k 20mm od konce nože
N10_delka=10e-3; %délka části
N10_prurez=147.75e-6; %průřez části
N10_plocha=602.43e-6; %efektivní chladicí plocha části
N10_objem=1477.5e-9; %objem části
N10_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N10_k=1; %koeficient el. odporu
N10_obvod=N10_plocha/N10_delka; %chladicí obvod části
N10_beta=sqrt(N10_alfa0*N10_obvod/(lambdaCu*N10_prurez));
N10_delta=sqrt(N10_alfa0*N10_obvod*lambdaCu*N10_prurez);
N10_RTl1=(sinh(N10_beta*N10_delka))/N10_delta;
N10_RTt1=1/(N10_delta*tanh((N10_beta*N10_delka)/2));
N10_Rel1=roCu*N10_k*(N10_delka/N10_prurez);
N10_C1=N10_objem*cvCu;
N10_RTl=N10_RTl1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N10_RTt=N10_RTt1/2; %korekce pro paralelní dva nože

```

```

N10_Rel=N10_Rel1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N10_C=N10_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Část 20mm od konce nože
N11_delka=20e-3; %délka části
N11_prurez=147.75e-6; %průřez části
N11_plocha=1298.8e-6; %efektivní chladicí plocha části
N11_objem=2414.78e-9; %objem části
N11_alfa0=9.2; %součinitel přestupu tepla
N11_k=1; %koeficient el. odporu
N11_obvod=N11_plocha/N11_delka; %chladicí obvod části
N11_beta=sqrt(N11_alfa0*N11_obvod/(lambdaCu*N11_prurez));
N11_delta=sqrt(N11_alfa0*N11_obvod*lambdaCu*N11_prurez);
N11_RTl1=(sinh(N11_beta*N11_delka))/N11_delta;
N11_RTt1=1/(N11_delta*tanh((N11_beta*N11_delka)/2));
N11_Rel1=roCu*N11_k*(N11_delka/N11_prurez);
N11_C1=N11_objem*cvCu;
N11_RTl=N11_RTl1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N11_RTt=N11_RTt1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N11_Rel=N11_Rel1/2; %korekce pro paralelní dva nože
N11_C=N11_C1*2; %korekce pro paralelní dva nože
%Výpočet částí druhého praporce (se zemnicího praporcem a otočným spojem)
%Části druhého praporce figurující jako chladiče
%Část od kraje praporce k otvoru pro připojení vodiče
DPch1_delka=12.5e-3; %délka části
DPch1_prurez=320e-6; %průřez části
DPch1_plocha=1270e-6; %efektivní chladicí plocha části
DPch1_objem=4000e-9; %objem části
DPch1_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
DPch1_obvod=DPch1_plocha/DPch1_delka; %chladicí obvod části
DPch1_RTch=1/(DPch1_alfa0*DPch1_plocha);
DPch1_C=DPch1_objem*cvCu;
%Část nad kontaktem
DPch2_delka=34.5e-3; %délka části
DPch2_prurez=238.95e-6; %průřez části
DPch2_plocha=2519e-6; %efektivní chladicí plocha části
DPch2_objem=7371.25e-9; %objem části
DPch2_alfa0=7.8; %součinitel přestupu tepla
DPch2_obvod=DPch2_plocha/DPch2_delka; %chladicí obvod části
DPch2_RTch=1/(DPch2_alfa0*DPch2_plocha);
DPch2_C=DPch2_objem*cvCu;
%Část zohledňující zemnicí praporec
DPch3_plocha=6419.7e-6; %efektivní chladicí plocha části
DPch3_objem=15749.9e-9; %objem části
DPch3_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
DPch3_RTch=1/(DPch3_alfa0*DPch3_plocha);
DPch3_C=DPch3_objem*cvCu;
%Části držáku nože s otočným spojem
%Část poloviny držáku bez otočného spoje
DPch4_delka=26e-3; %délka části
DPch4_plocha=2039.1e-6; %efektivní chladicí plocha části
DPch4_objem=3096.22e-9; %objem části
DPch4_alfa0=6; %součinitel přestupu tepla
DPch4_obvod=DPch4_plocha/DPch4_delka; %chladicí obvod části
DPch4_RTch=2/(DPch4_alfa0*DPch4_plocha);
DPch4_C=DPch4_objem*cvOceli;
%Část polovina držáku s otočným spojem
DPch5_delka=33e-3; %délka části
DPch5_plocha=5050.2e-6; %efektivní chladicí plocha části
DPch5_objem=7109.65e-9; %objem části
DPch5_alfa0=6; %součinitel přestupu tepla
DPch5_obvod=DPch5_plocha/DPch5_delka; %chladicí obvod části

```

```

DPch5_RTch=2/(DPch5_alfa0*DPch5_plocha);
DPch5_C=DPch5_objem*cvOceli;
%Části proudové dráhy
%Část otvoru pro připojení vodiče
DP1_delka=15e-3; %délka části
DP1_prurez=240e-6; %průřez části (zmenšený o 4/3)
DP1_plocha=875e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP1_objem=3557.24e-9; %objem části
DP1_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
DP1_k=1; %koeficient el. odporu
DP1_obvod=DP1_plocha/DP1_delka; %chladicí obvod části
DP1_beta=sqrt(DP1_alfa0*DP1_obvod/(lambdaCu*DP1_prurez));
DP1_delta=sqrt(DP1_alfa0*DP1_obvod*lambdaCu*DP1_prurez);
DP1_RTl=(sinh(DP1_beta*DP1_delka))/DP1_delta;
DP1_RTt=1/(DP1_delta*tanh((DP1_beta*DP1_delka)/2));
DP1_Rel=roCu*DP1_k*(DP1_delka/DP1_prurez);
DP1_C=DP1_objem*cvCu;
%Část mezi otvory
DP2_delka=25e-3; %délka části
DP2_prurez=320e-6; %průřez části
DP2_plocha=1900e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP2_objem=8000e-9; %objem části
DP2_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
DP2_k=1; %koeficient el. odporu
DP2_obvod=DP2_plocha/DP2_delka; %chladicí obvod části
DP2_beta=sqrt(DP2_alfa0*DP2_obvod/(lambdaCu*DP2_prurez));
DP2_delta=sqrt(DP2_alfa0*DP2_obvod*lambdaCu*DP2_prurez);
DP2_RTl=(sinh(DP2_beta*DP2_delka))/DP2_delta;
DP2_RTt=1/(DP2_delta*tanh((DP2_beta*DP2_delka)/2));
DP2_Rel=roCu*DP2_k*(DP2_delka/DP2_prurez);
DP2_C=DP2_objem*cvCu;
%Část druhého otvoru pro připojení vodiče
DP3_delka=15e-3; %délka části
DP3_prurez=240e-6; %průřez části (zmenšený o 4/3)
DP3_plocha=875e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP3_objem=3557.24e-9; %objem části
DP3_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
DP3_k=1; %koeficient el. odporu
DP3_obvod=DP3_plocha/DP3_delka; %chladicí obvod části
DP3_beta=sqrt(DP3_alfa0*DP3_obvod/(lambdaCu*DP3_prurez));
DP3_delta=sqrt(DP3_alfa0*DP3_obvod*lambdaCu*DP3_prurez);
DP3_RTl=(sinh(DP3_beta*DP3_delka))/DP3_delta;
DP3_RTt=1/(DP3_delta*tanh((DP3_beta*DP3_delka)/2));
DP3_Rel=roCu*DP3_k*(DP3_delka/DP3_prurez);
DP3_C=DP3_objem*cvCu;
%Část od druhého otvoru po konec prvního ohybu
DP4_delka=35.062e-3; %délka části
DP4_prurez=320e-6; %průřez části
DP4_plocha=3135.95e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP4_objem=11219.82e-9; %objem části
DP4_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
DP4_k=1; %koeficient el. odporu
DP4_obvod=DP4_plocha/DP4_delka; %chladicí obvod části
DP4_beta=sqrt(DP4_alfa0*DP4_obvod/(lambdaCu*DP4_prurez));
DP4_delta=sqrt(DP4_alfa0*DP4_obvod*lambdaCu*DP4_prurez);
DP4_RTl=(sinh(DP4_beta*DP4_delka))/DP4_delta;
DP4_RTt=1/(DP4_delta*tanh((DP4_beta*DP4_delka)/2));
DP4_Rel=roCu*DP4_k*(DP4_delka/DP4_prurez);
DP4_C=DP4_objem*cvCu;
%Část od prvního ohybu k 5mm od druhého ohybu
DP5_delka=33e-3; %délka části

```

```

DP5_prurez=320e-6; %průřez části
DP5_plocha=4500.9e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP5_objem=14948.12e-9; %objem části
DP5_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
DP5_k=1; %koeficient el. odporu
DP5_obvod=DP5_plocha/DP5_delka; %chladicí obvod části
DP5_beta=sqrt(DP5_alfa0*DP5_obvod/(lambdaCu*DP5_prurez));
DP5_delta=sqrt(DP5_alfa0*DP5_obvod*lambdaCu*DP5_prurez);
DP5_RTl=(sinh(DP5_beta*DP5_delka))/DP5_delta;
DP5_RTt=1/(DP5_delta*tanh((DP5_beta*DP5_delka)/2));
DP5_Rel=roCu*DP5_k*(DP5_delka/DP5_prurez);
DP5_C=DP5_objem*cvCu;
%Část ohyb a 5mm od každé strany
DP6_delka=17.854e-3; %délka části
DP6_prurez=320e-6; %průřez části
DP6_plocha=1613.98e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP6_objem=5713.27e-9; %objem části
DP6_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
DP6_k=1; %koeficient el. odporu
DP6_obvod=DP6_plocha/DP6_delka; %chladicí obvod části
DP6_beta=sqrt(DP6_alfa0*DP6_obvod/(lambdaCu*DP6_prurez));
DP6_delta=sqrt(DP6_alfa0*DP6_obvod*lambdaCu*DP6_prurez);
DP6_RTl=(sinh(DP6_beta*DP6_delka))/DP6_delta;
DP6_RTt=1/(DP6_delta*tanh((DP6_beta*DP6_delka)/2));
DP6_Rel=roCu*DP6_k*(DP6_delka/DP6_prurez);
DP6_C=DP6_objem*cvCu;
%Část 5mm ohybu do poloviny šroubu M10
DP7_delka=39e-3; %délka části
DP7_prurez=320e-6; %průřez části
DP7_plocha=2321.3e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP7_objem_medi=11939.65e-9; %(z toho plocha šroubů 605.39e-6)
DP7_objem_oceli=3221.9e-9; %objem části elektrovodné mědi
DP7_objem_mosazi=1593.8e-9; %objem šroubů
DP7_alfa0=6; %objem mosazných vložek
DP7_k=1; %součinitel přestupu tepla
DP7_obvod=DP7_plocha/DP7_delka; %koeficient el. odporu
DP7_beta=sqrt(DP7_alfa0*DP7_obvod/(lambdaCu*DP7_prurez)); %chladicí obvod části
DP7_delta=sqrt(DP7_alfa0*DP7_obvod*lambdaCu*DP7_prurez);
DP7_RTl=(sinh(DP7_beta*DP7_delka))/DP7_delta;
DP7_RTt=1/(DP7_delta*tanh((DP7_beta*DP7_delka)/2));
DP7_Rel=roCu*DP7_k*(DP7_delka/DP7_prurez);
DP7_C=DP7_objem_medi*cvCu+DP7_objem_oceli*cvOceli+DP7_objem_mosazi*cvMosa
zi;
%Část od poloviny šroubu M10 k 5mm od ohybu
DP8_delka=39e-3; %délka části
DP8_prurez=320e-6; %průřez části
DP8_plocha=2195.3e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP8_objem_medi=11939.65e-9; %objem části elektrovodné mědi
DP8_objem_oceli=3221.9e-9; %objem šroubů
DP8_objem_mosazi=1593.8e-9; %objem mosazných vložek
DP8_alfa0=6; %součinitel přestupu tepla
DP8_k=1; %koeficient el. odporu
DP8_obvod=DP8_plocha/DP8_delka; %chladicí obvod části
DP8_beta=sqrt(DP8_alfa0*DP8_obvod/(lambdaCu*DP8_prurez));
DP8_delta=sqrt(DP8_alfa0*DP8_obvod*lambdaCu*DP8_prurez);
DP8_RTl=(sinh(DP8_beta*DP8_delka))/DP8_delta;
DP8_RTt=1/(DP8_delta*tanh((DP8_beta*DP8_delka)/2));
DP8_Rel=roCu*DP8_k*(DP8_delka/DP8_prurez);
DP8_C=DP8_objem_medi*cvCu+DP8_objem_oceli*cvOceli+DP8_objem_mosazi*cvMosa
zi;

```

```

%Část 5mm před ohybem ke kontaktu
DP9_delka=27.354e-3; %délka části
DP9_prurez=320e-6; %průřez části
DP9_plocha=2491.11e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP9_objem=8156.97e-9; %objem části
DP9_alfa0=7.8; %součinitel přestupu tepla
DP9_k=1.3; %koeficient el. odporu (zúžení)
DP9_obvod=DP9_plocha/DP9_delka; %chladicí obvod části
DP9_beta=sqrt(DP9_alfa0*DP9_obvod/(lambdaCu*DP9_prurez));
DP9_delta=sqrt(DP9_alfa0*DP9_obvod*lambdaCu*DP9_prurez);
DP9_RTl=(sinh(DP9_beta*DP9_delka))/DP9_delta;
DP9_RTt=1/(DP9_delta*tanh((DP9_beta*DP9_delka)/2));
DP9_Rel=roCu*DP9_k*(DP9_delka/DP9_prurez);
DP9_C=DP9_objem*cvCu;
%Část první poloviny kontaktu
DP10_delka=12.5e-3; %délka části
DP10_prurez=238.95e-6; %průřez části
DP10_plocha=730e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP10_objem=2986.87e-9; %objem části
DP10_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
DP10_k=1; %koeficient el. odporu
DP10_obvod=DP10_plocha/DP10_delka; %chladicí obvod části
DP10_beta=sqrt(DP10_alfa0*DP10_obvod/(lambdaCu*DP10_prurez));
DP10_delta=sqrt(DP10_alfa0*DP10_obvod*lambdaCu*DP10_prurez);
DP10_RTl=(sinh(DP10_beta*DP10_delka))/DP10_delta;
DP10_RTt=1/(DP10_delta*tanh((DP10_beta*DP10_delka)/2));
DP10_Rel=roCu*DP10_k*(DP10_delka/DP10_prurez);
DP10_C=DP10_objem*cvCu;
%Část druhé poloviny kontaktu
DP11_delka=12.5e-3; %délka části
DP11_prurez=238.95e-6; %průřez části
DP11_plocha=730e-6; %efektivní chladicí plocha části
DP11_objem=2986.87e-9; %objem části
DP11_alfa0=7.4; %součinitel přestupu tepla
DP11_k=1; %koeficient el. odporu
DP11_obvod=DP11_plocha/DP11_delka; %chladicí obvod části
DP11_beta=sqrt(DP11_alfa0*DP11_obvod/(lambdaCu*DP11_prurez));
DP11_delta=sqrt(DP11_alfa0*DP11_obvod*lambdaCu*DP11_prurez);
DP11_RTl=(sinh(DP11_beta*DP11_delka))/DP11_delta;
DP11_RTt=1/(DP11_delta*tanh((DP11_beta*DP11_delka)/2));
DP11_Rel=roCu*DP11_k*(DP11_delka/DP11_prurez);
DP11_C=DP11_objem*cvCu;
%Výpočet částí otočného kontaktu
%Kontakt držáku a druhé přípojnice
DPOK1_F1=24000; %utahovací síla šroubů
DPOK1_F=0.5*DPOK1_F1; %koef. z důvodu degradace spoje
DPOK1_np=1; %tab. hodnota pro plošný styk
DPOK1_c=1; %koef. přestupu tepla kontaktu
DPOK1_Rel=K1_kOceli*DPOK1_F^(-DPOK1_np);
DPOK1_RTk=DPOK1_c*DPOK1_Rel/(lambdaCu*roCu);
%Kontakt držáku a nože
DPOK2_F=5; %síla kontaktu (odhad)
DPOK2_np=0.4; %tab. hodnota pro bodový dotyk
DPOK2_c=0.8; %koef. přestupu tepla kontaktu
DPOK2_Rel=K1_kOceli*DPOK2_F^(-DPOK2_np); %kontakt je dvakrát a paralelně
DPOK2_RTk=DPOK2_c*DPOK2_Rel/(lambdaCu*roCu);
%Část držáku nože od poloviny držáku ke středu čepu
DPO1_delka=35e-3; %délka části
DPO1_prurez=120e-6; %průřez části
DPO1_plocha=5050.2e-6; %efektivní chladicí plocha části
DPO1_objem=7109.65e-9; %objem části

```



```

DPO1_alfa0=6.4; %součinitel přestupu tepla
DPO1_k=1; %koeficient el. odporu
DPO1_obvod=DPO1_plocha/DPO1_delka; %chladící obvod části
DPO1_beta=sqrt(DPO1_alfa0*DPO1_obvod/(lambdaOceli*DPO1_prurez));
DPO1_delta=sqrt(DPO1_alfa0*DPO1_obvod*lambdaOceli*DPO1_prurez);
DPO1_RTl=(sinh(DPO1_beta*DPO1_delka))/DPO1_delta;
DPO1_RTt=1/(DPO1_delta*tanh((DPO1_beta*DPO1_delka)/2));
DPO1_Rel=roOceli*DPO1_k*(DPO1_delka/DPO1_prurez);
DPO1_C=DPO1_objem*cvOceli;
%Výpočet paralelních proudů
A_Rel=K2_Rel+DP10_Rel+DP9_Rel+DP8_Rel;
B_Rel=DPO1_Rel+DPOK1_Rel+DPOK2_Rel;
DPO_Rp=A_Rel/(A_Rel+B_Rel);
DP_Rp=B_Rel/(A_Rel+B_Rel);
%Výpočet částí přívodních kabelů
%Kontakty přívodních kabelů
KabK1_F1=20000; %utahovací síla šroubu
KabK1_F=0.9*KabK1_F1; %koefice z důvodu degradace spoje
KabK1_np=1; %tab. hodnota pro plošný styk
KabK1_c=0.8; %kof. přestupu tepla kontaktu
KabK1_Rel1=K1_kCu*KabK1_F^(-KabK1_np);
KabK1_RTk1=KabK1_c*KabK1_Rel1/(lambdaCu*roCu);
KabK1_Rel=KabK1_Rel1;
KabK1_RTk=KabK1_RTk1;
KabK2_Rel=KabK1_Rel1;
KabK2_RTk=KabK1_RTk1;
%Dvojice přívodních kabelů připojených k prvnímu otvoru
Kab1_delka=500e-3; %délku uvažují půl metru kabelu
Kab1_prurez=200e-6; %společný průřez vodičů
Kab1_polomer=sqrt(Kab1_prurez/(2*pi)); %poloměr jednoho náhr. vodiče
Kab1_alfa0=12; %součinitel přestupu tepla
Kab1_k=1; %koeficient el. odporu
Kab1_obvod=2*pi*(Kab1_polomer+2e-3); %chladící obvod dvojice kabelů
Kab1_plocha=Kab1_obvod*Kab1_delka; %chladící obvod části
Kab1_objem=Kab1_prurez*Kab1_delka; %objem části
Kab1_beta=sqrt(Kab1_alfa0*Kab1_obvod/(lambdaCu*Kab1_prurez));
Kab1_delta=sqrt(Kab1_alfa0*Kab1_obvod*lambdaCu*Kab1_prurez);
Kab1_RTl=(sinh(Kab1_beta*Kab1_delka))/Kab1_delta;
Kab1_RTt=1/(Kab1_delta*tanh((Kab1_beta*Kab1_delka)/2));
Kab1_Rel=roCu*Kab1_k*(Kab1_delka/Kab1_prurez);
Kab1_C=Kab1_objem*cvCu;
%Třetí přívodní kabel připojený k druhému otvoru
Kab2_delka=500e-3; %délku uvažují půl metru kabelu
Kab2_prurez=120e-6; %společný průřez vodiče
Kab2_polomer=sqrt(Kab2_prurez/pi); %poloměr náhradního vodiče
Kab2_alfa0=12; %součinitel přestupu tepla
Kab2_k=1; %koeficient el. odporu
Kab2_obvod=2*pi*(Kab2_polomer+2e-3); %chladící obvod kabelu
Kab2_plocha=Kab2_obvod*Kab2_delka; %chladící obvod části
Kab2_objem=Kab2_prurez*Kab2_delka; %objem části
Kab2_beta=sqrt(Kab2_alfa0*Kab2_obvod/(lambdaCu*Kab2_prurez));
Kab2_delta=sqrt(Kab2_alfa0*Kab2_obvod*lambdaCu*Kab2_prurez);
Kab2_RTl=(sinh(Kab2_beta*Kab2_delka))/Kab2_delta;
Kab2_RTt=1/(Kab2_delta*tanh((Kab2_beta*Kab2_delka)/2));
Kab2_Rel=roCu*Kab2_k*(Kab2_delka/Kab2_prurez);
Kab2_C=Kab2_objem*cvCu;

```

Příloha F – Výstupní hodnoty skriptu z programu MATLAB

```

PPch1_RTch=106.4056182166418      Nch1_RTch=35.901589435167480
PPch1_C=13.799999999999999        Nch1_C=24.453393000000000
PPch2_RTch=50.895247401797626    Nch2_RTch=82.541962270069050
PPch2_C=25.430812500000000        Nch2_C=17.059974000000000
PP1_Rel=1.106250000000000e-06    Nch3_RTch=202.6301392069056
PP1_RTl=0.161945392599642        Nch3_C=10.543683000000000
PP1_RTt=308.9072945918504        Nch4_RTch=358.6800573888092
PP1_C=12.272478000000000        Nch4_C=10.492312499999999
PP2_Rel=1.382812500000000e-06    Nch5_RTch=82.541962270069050
PP2_RTl=0.202492379706763        Nch5_C=15.146258999999999
PP2_RTt=142.2812417976313        N1_Rel=6.888324873096446e-07
PP2_C=27.599999999999998        N1_RTl=0.100840735059543
PP3_Rel=1.106250000000000e-06    N1_RTt=175.9595219393134
PP3_RTl=0.161945392599642        N1_C=24.544956000000000
PP3_RTt=308.9072945918504        N2_Rel=1.647208121827411e-06
PP3_C=12.272478000000000        N2_RTl=0.219403015611693
PP4_Rel=1.939366875000000e-06    N2_RTt=70.945033927128360
PP4_RTl=0.284168604503025        N2_C=21.864168000000000
PP4_RTt=86.231800296878080        N3_Rel=2.271500000000000e-06
PP4_C=38.708379000000000        N3_RTl=0.333279505814638
PP5_Rel=1.825312500000000e-06    N3_RTt=45.591909322936460
PP5_RTl=0.267457265149261        N3_C=39.847500000000000
PP5_RTt=80.982103241162280        N4_Rel=2.271500000000000e-06
PP5_C=36.432000000000000        N4_RTl=0.333279505814638
PP6_Rel=9.875493749999997e-07    N4_RTt=45.591909322936460
PP6_RTl=0.144584986050121        N4_C=39.847500000000000
PP6_RTt=167.4798639652975        N5_Rel=1.647208121827411e-06
PP6_C=19.710781500000000        N5_RTl=0.219403015611693
PP7_Rel=2.157187500000000e-06    N5_RTt=70.945033927128360
PP7_RTl=0.316073098777189        N5_C=21.864168000000000
PP7_RTt=99.350975284091450        N6_Rel=3.245000000000000e-06
PP7_C=57.996360600000000        N6_RTl=0.477319346507412
PP8_Rel=2.157187500000000e-06    N6_RTt=31.954678003707425
PP8_RTl=0.316073098777189        N6_C=56.925000000000004
PP8_RTt=99.350975284091450        N7_Rel=1.647208121827411e-06
PP8_C=57.996360600000000        N7_RTl=0.219403015611693
PP9_Rel=1.966923562500000e-06    N7_RTt=70.945033927128360
PP9_RTl=0.221612869053734        N7_C=21.864168000000000
PP9_RTt=102.9670284340856        N8_Rel=2.699250000000000e-06
PP9_C=28.141546499999997        N8_RTl=0.396432848814545
PP10_Rel=9.259259259259259e-07    N8_RTt=38.499305755131395
PP10_RTl=0.135541262816369        N8_C=47.290668000000000
PP10_RTt=351.2695136042538        N9_Rel=2.740355329949238e-06
PP10_C=10.304701500000000        N9_RTl=0.402455250373484
PP11_Rel=9.259259259259259e-07    N9_RTt=39.505036948716450
PP11_RTl=0.135541262816369        N9_C=46.640964000000004
PP11_RTt=351.2695136042538        N10_Rel=5.989847715736041e-07
PP11_C=10.304701500000000        N10_RTl=0.087685049100477
K1_Rel=1.887389894492029e-05     N10_RTt=180.4432956906082
K1_RTk=2.209993729096957         N10_C=10.194750000000000
K2_Rel=1.887389894492029e-05     N11_Rel=1.197969543147208e-06
K2_RTk=2.209993729096957         N11_RTl=0.175464178564180

```

N11_RTt=83.718513363199950
N11_C=16.661982000000002
DPch1_RTch=1.064056182166418e+02
DPch1_C=13.799999999999999
DPch2_RTch=50.895247401797626
DPch2_C=25.430812500000000
DPch3_RTch=21.050070117783560
DPch3_C=54.337154999999996
DPch4_RTch=163.4708122864663
DPch4_C=11.180450420000000
DPch5_RTch=66.003986640793100
DPch5_C=25.672946149999998
DP1_Rel=1.106250000000000e-06
DP1_RTl=0.161945392599642
DP1_RTt=308.9072945918504
DP1_C=12.272478000000000
DP2_Rel=1.382812500000000e-06
DP2_RTl=0.202492379706763
DP2_RTt=142.2812417976313
DP2_C=27.599999999999998
DP3_Rel=1.106250000000000e-06
DP3_RTl=0.161945392599642
DP3_RTt=308.9072945918504
DP3_C=12.272478000000000
DP4_Rel=1.939366875000000e-06
DP4_RTl=0.284168604503025
DP4_RTt=86.231800296878080
DP4_C=38.708379000000000
DP5_Rel=1.825312500000000e-06
DP5_RTl=0.267559605793871
DP5_RTt=60.092571049824060
DP5_C=51.571014000000000
DP6_Rel=9.875493749999997e-07
DP6_RTl=0.144584986050121
DP6_RTt=167.4798639652975
DP7_Rel=2.157187500000000e-06
DP7_RTl=0.315969804879705
DP7_RTt=143.6503158934766
DP7_C=57.996360600000000
DP8_Rel=2.157187500000000e-06
DP8_RTl=0.315957238476761
DP8_RTt=151.8921553882175
DP8_C=57.996360600000000
DP9_Rel=1.966923562500000e-06
DP9_RTl=0.221612869053734
DP9_RTt=102.9670284340856
DP10_Rel=9.259259259259259e-07
DP10_RTl=0.135540368902651
DP10_RTt=370.2558339753339
DP10_C=10.304701500000000
DP11_Rel=9.259259259259259e-07
DP11_RTl=0.135540368902651
DP11_RTt=370.2558339753339
DP11_C=10.304701500000000
DPO1_Rel=2.7708333333333334e-05
DPO1_RTl=6.018372676339031
DPO1_RTt=62.847918288734554
DPO1_C=25.672946149999998
DPO_Rp=0.002158265190940
DP_Rp=0.997841734809060
DPOK1_Rel=1.750000000000000e-06
DPOK1_RTk=0.256140042738796
DPOK2_Rel=0.011031416778496
DPOK2_RTk=1291.697172623263
Kab1_Rel=4.425000000000000e-05
Kab1_RTl=8.687283038958666
Kab1_RTt=7.989513722244480
Kab1_C=345
Kab2_Rel=7.375000000000000e-05
Kab2_RTl=17.863140337182585
Kab2_RTt=8.191790357932026
Kab2_C=207