

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza oteplení proudové dráhy odpojovače VVN

vedoucí práce: Ing. Jan Sedláček, Ph.D.
autor: Bc. Pavel Knödl

2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel KNÖDL**
Osobní číslo: **E11N0188P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Analýza oteplení proudové dráhy odpojovače vvn**
Zadávající 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 elektrický odpojovač vvn a oteplení proudové dráhy elektrického přístroje.
2. Navrhněte proudovou dráhu elektrického odpojovače pro zadané parametry.
3. Porovnejte a zhodnoťte možné metody analýzy oteplení navržené proudové dráhy.
4. Aplikujte vybranou metodu pro výpočet oteplení proudové dráhy, vypočtené výsledky vyhodnoťte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. Havelka, O., Vávra, Z., Svoboda, D.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů, VUT, Brno
2. Vostracký, Z.: Spínací přístroje velmi vysokého napětí, SNTL, Praha
3. Havelka, O.: Elektrické přístroje, SNTL, Praha

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Sedláček, Ph.D.

Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




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

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Tato diplomová práce předkládá postupný návrh proudové dráhy horizontálního odpojovače VVN pro parametry uvedené ve 4. kapitole s následnou statickou i dynamickou analýzou jejího oteplení. Analýza je provedena pomocí metody tepelné sítě. Dále se zabývá teorií sdílení tepla, oteplením vodiče při průchodu elektrického proudu, metodami pro řešení oteplení.

Klíčová slova

Návrh proudové dráhy, metoda tepelné sítě, přestup tepla, odpojovač, oteplení, analýzy oteplení

Abstract

This thesis presents a progressive design of current path of HV horizontal disconnecter for parameters mentioned in the 4th chapter followed by the static and the dynamic analysis of heating. The analysis is performed using the thermal network method. It also deals with the heat transfer theory, conductor heating by electrical current, methods for solving heating.

Key words

Design of current path, thermal network method, heat transfer, disconnecter, heating, analysis of heating

Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za příkladné vedení, cenné rady a připomínky během vytváření práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za veškerou podporu, kterou mi poskytli během studia na Západočeské univerzitě v Plzni.

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 7.5.2013

Pavel Knödl

Obsah

Seznam symbolů a značek.....	9
Úvod	11
1. Odpojovače.....	12
1.1. Typy odpojovačů	13
1.2. Základní parametry	13
1.3. Označení odpojovačů a uzemňovačů	15
2. Přenos tepla	16
3. Oteplování vodiče	18
3.1. Oteplení průchodem proudu	18
3.2. Oteplení při přerušovaném chodu.....	19
4. Návrh proudové dráhy.....	20
4.1. Izolační vzdálenost proti zemi	21
4.1.1. Dočasné přepětí	21
4.1.2. Atmosférický impuls	21
4.2. Izolační vzdálenost v proudové dráze	22
4.2.1. Dočasné přepětí	22
4.2.2. Atmosférický impuls	23
4.3. Tři kritéria pro návrh kontaktů spínacího přístroje.....	23
4.3.1. Kritérium pro jmenovitý proud	23
4.3.2. Kritérium pro dynamický proud.....	24
4.3.3. Kritérium pro krátkodobý tepelný proud	24
4.4. Kontaktní síla.....	24
4.5. Volba rozměrů v proudové dráze	25
4.6. Stanovení rozměrů ramene odpojovače.....	25
4.7. Základní kontrola oteplení.....	27
4.7.1. Ramena odpojovače	27

4.7.2. Kontaktní palce	28
4.8. Kontaktní pružina	29
5. Metody pro řešení oteplení.....	30
5.1. Analytické metody.....	30
5.2. Numerické metody	30
5.3. Metoda tepelné sítě.....	31
6. Metoda tepelné sítě.....	32
6.1. Prvky jednořadové tepelné sítě.....	33
6.2. Řešení jednořadé tepelné sítě	35
7. PLECS.....	36
8. Statická analýza.....	37
8.1. Tepelné odpory	37
8.2. Tepelné toky	39
8.3. Výsledek statické analýzy	40
9. Dynamická analýza	41
9.1. Tepelné kapacity.....	41
9.2. Výsledek dynamické analýzy	43
Závěr.....	45
Použitá literatura	46
Přílohy	47

Seznam symbolů a značek

VVN	-	velmi vysoké napětí
U_p	-	navýšená hodnota napětí
I_n	-	jmenovitý proud
I_i	-	jmenovitý proud jedním palcem
n	-	počet palců
R_S	-	stykový odpor
R_{ss}	-	odpor stejnosměrného proud
R_{st}	-	odpor střídavého proud
ρ	-	rezistivita
I_{dyn}	-	dynamický zkratový proud
$I_{dyn i}$	-	dynamický zkratový proud jedním palcem
I_{kt}	-	krátkodobý tepelný zkratový proud
t_k	-	doba trvání zkratu
F_K	-	kontaktní síla
α_0	-	součinitel přestupu tepla holého vodiče
A	-	povrch
S	-	průřez
T	-	teplota [K]
k_{zh}	-	koeficient zhuštění
ϑ	-	oteplení
Φ	-	tepelný tok

R_{Tl}	-	podélný (longitudinální) tepelný odpor
R_{Tt}	-	příčný (transversální) tepelný odpor
R_{Tq}	-	tepelný odpor (chladící)
V, v	-	objem
c	-	měrná tepelná kapacita
C	-	tepelná kapacita
W_O	-	modul průřezu v ohybu
M	-	moment
σ	-	mechanické napětí
Y	-	vychýlení pružiny

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá statickou a dynamickou analýzou oteplení proudové dráhy horizontálního odpojovače. Určení oteplení je důležité pro každý elektrický přístroj, pro jeho životnost i pro jeho funkci. V práci je uvedena základní metoda pro návrh proudové dráhy dle zadaných parametrů, pro kterou se oteplení počítá. Cílem práce je stanovit úroveň oteplení každého konstrukčního prvku v proudové dráze. A to jak pro statickou analýzu, tak pro dynamickou analýzu.

Diplomová práce začíná stručným seznámením s odpojovačem, přístrojem, kterým je vybavená každá rozvodna. Následuje stručná teorie o oteplení a s ním spojené ochlazování pro různé stavy zatěžování. Dále obsahuje návrh proudové dráhy odpojovače VVN pro konkrétní hodnoty včetně kontroly na oteplení. Jelikož se práce zabývá především elektrickou částí tohoto přístroje, nejsou v ní uvažovány mechanické vlivy. Hodnoty pro výpočet proudové dráhy byly převzaty z technických parametrů pro odpojovač 3 sht-1220 firmy SERW. V dalším bodě jsou uvedeny různé výpočetní metody pro řešení analýzy oteplení. Pro konečné řešení jsem zvolil metodu tepelné sítě, pro kterou jsem sestavil náhradní obvod a s použitím programu PLECS dostal výsledky. Nejprve se provedla analýza statická a poté i dynamická. Výsledkem práce je znázornění oteplení různých konstrukčních částí v proudové dráze.

1. Odpojovače

Odpojovače jsou spínací elektrické přístroje, které slouží k izolování částí elektrických obvodů od napětí. Na odpojených obvodech se mohou provádět udržovací a revizní práce se zajištěním bezpečnosti pracovníků. Odpojovač má dvě základní polohy – zapnuto (obr. 1), vypnuto (obr. 2). Tyto stavy jsou patrné na první pohled, ale jelikož se ovládají dálkově, je důležité zajistit spolehlivé hlášení jejich polohy, neboť by mohlo dojít k hlášení mezi polohy a nedaly by se dálkově obsluhovat. Pro zajištění bezpečnosti a pro usnadnění ovládání může být požadováno použití blokovacích zařízení mezi různými součástmi zařízení (např. mezi spínacím přístrojem a příslušným uzemňovačem).

- 1) Pokud je odpojovač zajištěn uzemňovačem, nesmí sepnout.
- 2) Pokud je vypínač v poloze zapnuto, odpojovač nesmí rozpojit.

Spínací přístroje, jejichž nesprávná činnost může způsobit škody nebo spínací přístroje použité pro zajištění odpojovací dráhy musí být vybaveny uzamykajícím zařízením stanoveným výrobcem (např. použitím zámků).

Ovládací pokyny jsou realizovány pomocí pohonů – elektrický či pneumatický. Všechny odpojovače jsou dále vybaveny záložním ručním pohonem. Hlášení jejich polohy je důležité z hlediska signalizace na dispečinku.




Obr. 1 Poloha zapnuto



Obr. 2 Poloha vypnuto

1.1. Typy odpojovačů

Konstrukčních řešení odpojovačů je několik typů, např.: pantografové, horizontální, vertikální sklápěcí, vertikální pákový nebo otočný s dvojitou vypínací dráhou. Nejčastěji používaným typem je horizontální odpojovač, kterým se bude zabývat i tato práce.



Jmenovitá napětí	Jmenovité proudy	Horizontální odpojovač	Pantografový odpojovač	Vertikální sklápěcí odpojovač	Vertikální pákový odpojovač	Odpojovač otočný s dvojitou vypínací dráhou
36 kV	I_n [A] I_s [kA] $I_{th(1s)}$ [kA] $I_{th(3s)}$ [kA]	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	≤ 4000 ≤ 100 ≤ 50 ≤ 31.5
72,5 kV	I_n [A] I_s [kA] $I_{th(1s)}$ [kA] $I_{th(3s)}$ [kA]	≤ 3150 ≤ 100 ≤ 50 ≤ 31.5	- - - -	- - - -	- - - -	≤ 2500 ≤ 100 ≤ 50 ≤ 31.5
123 kV	I_n [A] I_s [kA] $I_{th(1s)}$ [kA] $I_{th(3s)}$ [kA]	≤ 4000 ≤ 160 ≤ 100 ≤ 63	≤ 3150 ≤ 125 ≤ 50 ≤ 31.5	≤ 3150 ≤ 125 ≤ 50 ≤ 31.5	≤ 2500 ≤ 100 ≤ 50 ≤ 31.5	≤ 2500 ≤ 100 ≤ 50 ≤ 31.5
145–170kV	I_n [A] I_s [kA] $I_{th(1s)}$ [kA] $I_{th(3s)}$ [kA]	≤ 4000 ≤ 160 ≤ 100 ≤ 63	≤ 3150 ≤ 125 ≤ 50 ≤ 31.5	- - - -	≤ 3150 ≤ 135 ≤ 63 ≤ 31.5	≤ 2500 ≤ 100 ≤ 50 ≤ 31.5
245–300kV	I_n [A] I_s [kA] $I_{th(1s)}$ [kA] $I_{th(3s)}$ [kA]	≤ 4000 ≤ 160 ≤ 100 ≤ 63	≤ 4000 ≤ 160 ≤ 100 ≤ 63	- - - -	≤ 4000 ≤ 160 ≤ 100 ≤ 63	≤ 3150 ≤ 125 ≤ 100 ≤ 63
362–550kV	I_n [A] I_s [kA] $I_{th(1s)}$ [kA] $I_{th(3s)}$ [kA]	≤ 4000 ≤ 200 ≤ 100 ≤ 63	≤ 4000 ≤ 200 ≤ 100 ≤ 63	- - - -	≤ 4000 ≤ 200 ≤ 100 ≤ 63	≤ 4000 ≤ 160 ≤ 100 ≤ 63
800 kV	I_n [A] I_s [kA] $I_{th(1s)}$ [kA] $I_{th(3s)}$ [kA]	- - - -	- - - -	- - - -	≤ 4000 ≤ 160 ≤ 80 ≤ 50	≤ 4000 ≤ 200 ≤ 100 ≤ 63

Tab. 1. Typy odpojovačů na různé napěťové hladiny

[8]

1.2. Základní parametry

Jmenovité napětí – Jmenovité napětí je rovno nejvyššímu napětí soustavy, pro kterou je spínací a řídicí zařízení určeno. Označuje maximální hodnotu „nejvyššího napětí sítě“, pro kterou může být zařízení použito.

Jmenovitý proud – Jmenovitý proud spínacího a řídicího zařízení je efektivní hodnota proudu, který musí být spínací a řídicí zařízení schopno přenášet v nepřerušovaném provozu za předepsaných podmínek užití a funkce.

Jmenovité oteplení – Libovolné části spínacích a řídicích zařízení při teplotě okolního vzduchu nepřevyšující 40°C nesmí přesáhnout hodnoty oteplení pro kontakty z mědi a slitin mědi pokovené stříbrem nebo niklem 65°C. Další hodnoty oteplení jsou uvedeny v normě ČSN EN 62 271-1.

Jmenovitý krátkodobý výdržný proud – Je efektivní hodnota proudu, který spínací a řídicí zařízení může vést v zapnuté poloze po stanovenou dobu za předepsaných podmínek užití a provozu.

Jmenovitý dynamický výdržný proud – Vrcholová hodnota první nejvyšší půlplny zkratového proudu, který spínací a řídicí zařízení snese bez poškození v zapnuté poloze za předepsaných podmínek užití a provozu.

Jmenovitá doba zkratu – Doba, po kterou je spínací a řídicí zařízení (v sepnutém stavu) schopno přenášet proud rovný jmenovitému krátkodobému výdržnému proudu. Normalizovaná hodnota jmenovité doby zkratu je 1s. Pokud je požadováno, je možné volit dobu kratší nebo delší než 1s, doporučené hodnoty jsou 0,5s, 2s a 3s. [9]

Odpojovače nejsou vybaveny zhášecí komorou, nemají schopnost vypínat ani jmenovité, ani zkratové proudy. Veškerá jejich manipulace se musí provádět bez zatížení. V opačném případě by došlo k vytvoření elektrického oblouku, který by vlivem vysokých teplot mechanicky poškodil kontakty odpojovače. V kontaktní hlavici je přechod proudu z jednoho ramene do druhého přes kontaktní palce.

1.3. Označení odpojovačů a uzemňovačů

3	S	H	T	W	1	2	2	0
A	b	c	d	E	f	g	h	i

kde: a.....typové označení

b.....typ přístroje

S – odpojovač

c.....konstrukční typ

H – horizontální

S – sklápěcí

P – pantografový

d.....počet pólů

J – jednopólový

D – dvoupólový

T – trojpólový

e.....uzemňovač

U – 1 uzemňovač

W – 2 uzemňovače

f,g.....jmenovité napětí

07 – 72,5 kV

12 – 123kV

24 – 245kV

42 – 420kV

h,i.....jmenovitý proud

16 – 1600A

20 – 2000A

31 – 3150A

2. Přenos tepla

Přenos tepla nastává samovolně a nevratně z tělesa s vyšší teplotou k tělesu s nižší teplotou, ne naopak. Tato nevratnost je důsledkem 2. věty termodynamické. Stacionární přenos tepla nastává v místech s konstantní teplotou, kde se teplo šíří. Je-li teplota proměnná, jedná se o nestacionární přenos tepla. Sdílení tepla se děje třemi způsoby: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací).

1) Vedení:

Vedení tepla je charakterizováno pro pevná tělesa v důsledku pohybů základních částí hmoty. V místě styku s teplejším tělesem vzroste amplituda kmitů molekul a tím se zvýší i jejich energie. Část energie se předá sousedním molekulám s nižší kinetickou energií. Dochází pouze k přenosu energie, nikoliv hmoty.

Typický příklad vedení tepla je přestup tepla zdí. Pro zjednodušení se předpokládá homogenní prostředí, dokonalá tepelná izolace a jednosměrné šíření tepla. Množství tepla prošlého zdí, tedy určitou plochou S za daný čas τ s konstantním tepelným spádem se určí vztahem

$$Q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{l} \cdot S \cdot \tau \quad (1)$$

Pokud není tepelný spád konstantní, musí se daný úsek rozdělit na nekonečně malé díly.

Člen $\frac{t_1 - t_2}{l}$ se nahradí členem $\frac{dt}{dx}$. [7]

2) Proudění:

Přestup tepla prouděním je realizován tekutinou (voda, vzduch). Dochází tedy jak k pohybu energie, tak pohybu hmoty. Proudění se rozděluje na volné a nucené. Volné proudění je vyvolané pouze gradientem teploty. V místě styku s předmětem vyšší teploty dochází k nárůstu teploty tekutiny, k jejímu roztahování a tím pádem i ke zmenšení hustoty. Tím se stává lehčí než okolní chladná tekutina a vlivem vztlaku začne stoupat vzhůru. Chladná kapalina se dostane na její místo a proces se opakuje. Nucené proudění vzniká působením vnějších účinků, například čerpadlo, ventilátor apod. Podmínky pohybu závisí na vlastnostech tekutiny.

Existují dva typy proudění: laminární a turbulentní. Pokud se částice kapaliny pohybují rovnoběžně se stěnami, jedná se o laminární proudění. Když střední průtočná

rychlost nabude rychlosti kritické nebo větší, proudění se změní na turbulentní. Kritická rychlost závisí na typu kapaliny a geometrickém uspořádání. Turbulentní proudění je pohyb většiny tekutiny chaotický, neuspořádaný. Kolem stěny se vytvoří mezní vrstva, která proudí laminárně. Tloušťka mezní vrstvy závisí na střední rychlosti tekutiny, se vzrůstající rychlostí se vrstva zmenšuje. Typ proudění stanovuje podmínky, za kterých dochází k přestupu tepla. U laminárního proudění přechází teplo kolmo na směr průtoku tekutiny vedením a určuje se tepelnou vodivostí tekutiny. Turbulentní proudění využívá tento jev pouze v mezní vrstvě a její tepelný odpor je pro přestup tepla rozhodující. V jádru turbulentního proudění se teplo předává promícháváním částic tekutiny. [5] [7]

3) Sálání:

Zářivá energie se přenáší pomocí elektromagnetických vln o různé vlnové délce, od délek několik mikrometrů až do délek mnoha kilometrů. Vlnění má různé vlnové délky jiné vlastnosti a jiné využití: rentgenové, viditelné paprsky, ultrafialové, infračervené, elektromagnetické, rádiové apod. Z hlediska přestupu tepla je nejpodstatnější světelné a infračervené záření, protože jejich paprsky po pohlcení tělesem se mění na tepelnou energii. Jejich vlnová délka se pohybuje v rozsahu 10 - 340 μ m, nazývají se tepelné paprsky a jejich šíření probíhá tepelným zářením či sáláním.

Každé těleso samovolně vyzařuje tepelnou energii. Tato energie se při dopadu na další těleso částečně pohltí, částečně odrazí a část projde tělesem. Pohlcená energie se přeměňuje na teplo. Odražená energie dopadá na další těleso, stejně tak i energie, která tělesem prošla. Celá vysálaná energie se sdělí okolním tělesům. Každé těleso tedy nejen vyzařuje, ale zároveň i pohlcuje sálavou energii. Množství odevzdané a pohlcené energie není rovno nule, je-li teplota těles různá. Pokud tělesa mají stejnou teplotu, jedná se o stav pohyblivé tepelné rovnováhy. Ovšem i v tomto stavu tělesa sálají a pohlcují energii, ale množství vysálané energie se rovná množství pohlcené energie. [5]

3. Oteplování vodiče

3.1. Oteplení průchodem proudu

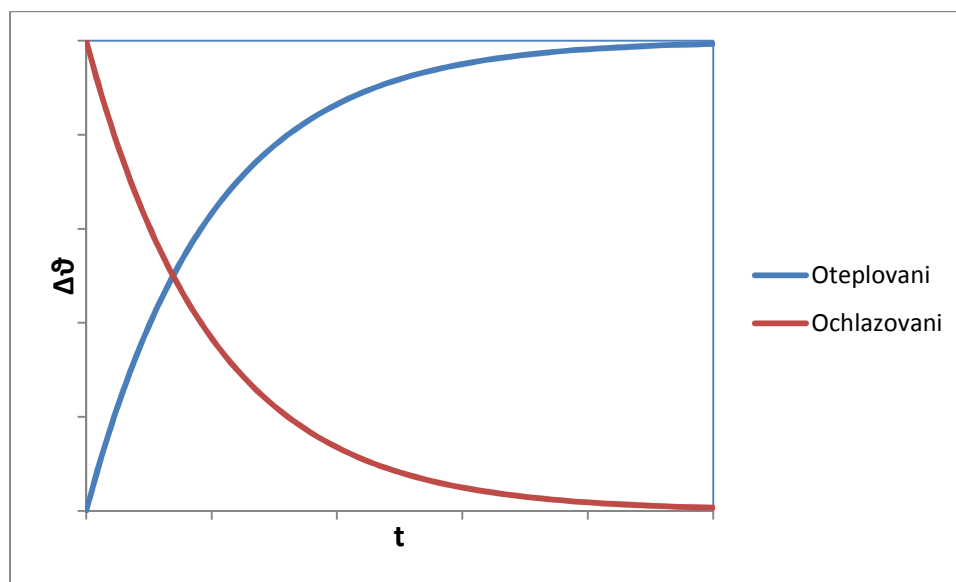
Průchodem elektrického proudu I vodičem s odporem R , vznikají na vodiči tepelné ztráty $dQ = R \cdot I^2 \cdot dt$. Vzniklé teplo se rozděluje do dvou částí. Část přijatého tepla se odvede ochlazováním do okolí, které charakterizuje $\alpha_0 \cdot \Delta\vartheta \cdot A \cdot dt$. Druhá část tepla se v tělese uchovává a tím zvyšuje jeho teplotu o $d\vartheta$. Množství tohoto tepla udává vztah $c \cdot V \cdot d\vartheta$. Spojením těchto vztahů vznikne rovnice

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

Křivka časového průběhu má exponenciální charakter, který popisuje rovnice

$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3)$$

kde časová konstanta $\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A}$.



Graf 1. Časový průběh oteplování a ochlazování

Graf 1 vychází z předpokladu, že se nemění časová konstanta, velikost proudu a odpor materiálu. Během oteplování se však nepatrně mění součinitel přestupu tepla, který je závislý

na $\Delta\vartheta$. Měrná objemová kapacita c se také může měnit. Měřená oteplovací křivka zcela nesouhlasí s vypočtenou křivkou.

V ustáleném stavu, kdy vodičem prochází stále stejný proud, dosáhne teplotně ustáleného stavu. Ve kterém platí $\frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = 0$, takže rovnice pro ustálený stav bude mít podobu

$$R \cdot I^2 \cdot dt = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot dt \quad (4)$$

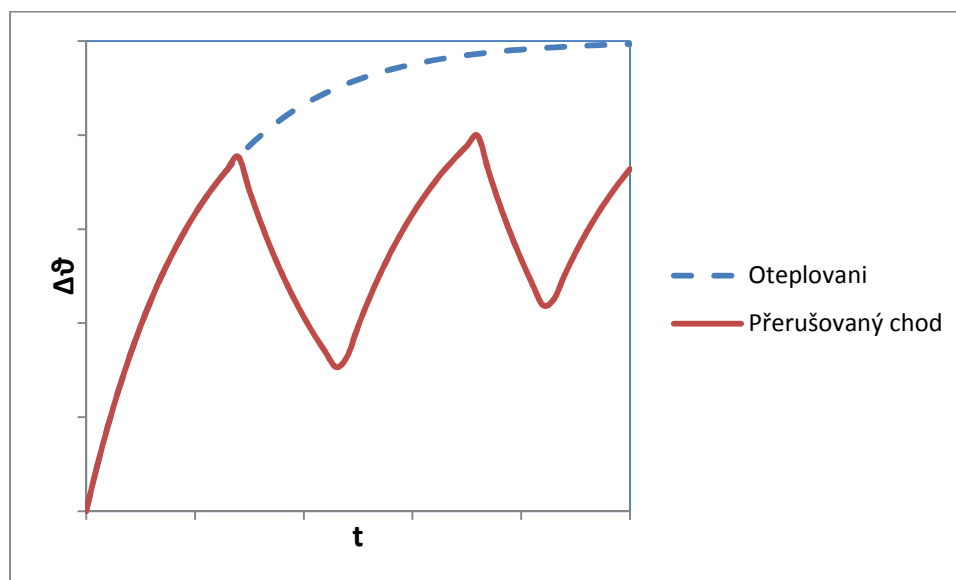
Dosažením maximálního oteplení nastává tepelná rovnováha: veškeré teplo vzniklé ve vodiči se jeho povrchem odvede do okolí. [1]

3.2. Oteplení při přerušovaném chodu

Přerušením průchodu proudu ($I=0$) se ohřátý přístroj, předchozím průchodem proudu, začne ochlazovat. Základní rovnice se změní na tvar

$$0 = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot dt + c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (5)$$

Časový průběh bude mít opět exponenciální průběh pro oteplování i ochlazování, který je znázorněn na grafu 2. [1]



Graf 2. Časový průběh přerušovaného chodu

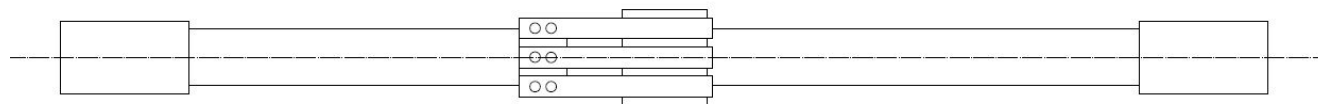
4. Návrh proudové dráhy

Pro návrh proudové dráhy byla použita metodika ze ZČU a zároveň i z firmy SERW. Tato metodika vychází ze tří kritérií pro návrh kontaktů přístroje, z kterých se pak dopočte celá proudová dráha. Výchozí hodnoty pro návrh odpojovače jsem převzal z technických parametrů skutečného odpojovače 3 sht-1220 firmy SERW. Výpočet je proveden pouze pro elektrickou část přístroje. Hlavní parametry pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 2.

Jmenovité napětí	kV	123
Frekvence	Hz	50
Izolační hladina proti zemi mezi póly:		
Výdržné napětí při atmosférickém impulsu	kV	550
Krátkodobé výdržné napětí střídavé	kV	230
Izolační hladina v odpojovací dráze:		
Výdržné napětí při atmosférickém impulsu	kV	630
Krátkodobé výdržné napětí střídavé	kV	265
Jmenovitý proud	A	2000
Jmenovitý krátkodobý proud (1s)	kA	40
Jmenovitý dynamický proud	kA	100

Tab. 2 Technické parametry odpojovače [13]

Při konstrukci odpojovače pro VVN musí být všechny vodivé části zaobleny, aby se zabránilo sršení z hrotů. Během návrhu bylo použito zjednodušení, které toto hledisko neuvažuje, viz obr. 3.



Obr. 3 Proudová dráha horizontálního odpojovače

4.1. Izolační vzdálenost proti zemi

4.1.1. Dočasné přepětí

Dočasné přepětí je charakterizováno krátkodobým zvýšením jmenovité hodnoty napětí. Pro napěťovou hladinu 123kV se jedná o normalizovanou hodnotu 230kV, která se také nachází v technickém popisu vybraného odpojovače, kterou také musí vydržet. Tato hodnota se vynásobí koeficientem 1,15.

- 1) Navýšení hodnoty napětí:

$$U_p = U \cdot k_{pS} = 230 \cdot 1,15 = 264,5 \text{ kV} \quad (6)$$

Z navýšené hodnoty napětí se dopočítají hodnoty vzdáleností. Hledaná hodnota má největší velikost.

- 2) Výpočet vzdáleností:

$$U_p = 14 + 0,316 \cdot d \Rightarrow b_1 = \frac{U_p - 14}{0,316} = \frac{264,5 - 14}{0,316} = 792,7 \text{ mm} \quad (7)$$

$$U_p = 10,6 + 0,36 \cdot d \Rightarrow b_2 = \frac{U_p - 10,6}{0,36} = \frac{264,5 - 10,6}{0,36} = 705,3 \text{ mm} \quad (8)$$

4.1.2. Atmosférický impuls

Pod pojmem atmosférický impuls se představuje úder blesku. Jde o vlnu 1,2/50 μ s s kladným hrotem proti zemi. Výrobce udává výdržnou hodnotu 550kV.

koeficient: $k_{pA} = 1,2$

- 1) Navýšení hodnoty napětí:

$$U_p = U \cdot k_{pA} = 550 \cdot 1,2 = 660 \text{ kV} \quad (9)$$

- 2) Výpočet vzdáleností:

$$U_p = 45 + 0,57 \cdot d \Rightarrow b_3 = \frac{U_p - 45}{0,57} = \frac{660 - 45}{0,57} = 1079 \text{ mm} \quad (10)$$

$$U_p = 0,505 \cdot d \Rightarrow b_4 = \frac{U_p}{0,505} = \frac{660}{0,505} = 1307 \text{ mm} \quad (11)$$

$$U_p = 148 + 0,545 \cdot d \Rightarrow b_s = \frac{U_p - 148}{0,545} = \frac{660 - 148}{0,545} = 939 \text{ mm} \quad (12)$$

Vybereme b jako nejvyšší platnou hodnotu:

$$b = 1307 \text{ mm}$$

Velikost b udává izolační vzdálenost proti zemi.

4.2. Izolační vzdálenost v proudové dráze

Pro bezpečný provoz i v rozepnutém stavu musí být odpojovač konstruován tak, aby jeho vzdálenost v proudové dráze byla větší než vzdálenosti proti zemi. V případě vzniku přepětí dojde k přeskoku na zem, nikoliv na opačný pól.

4.2.1. Dočasné přepětí

Výpočet se provádí naprosto stejně jako při určování vzdálenosti proti zemi. Výrobce udává hodnotu výdržného napětí 265kV.

1) Navýšení napětí:

$$U_p = U \cdot k_{ps} = 265 \cdot 1,15 = 304,75 \text{ kV} \quad (13)$$

2) Výpočet vzdáleností:

$$U_p = 14 + 0,316 \cdot d \Rightarrow c_1 = \frac{U_p - 14}{0,316} = \frac{304,75 - 14}{0,316} = 920 \text{ mm} \quad (14)$$

$$U_p = 10,6 + 0,36 \cdot d \Rightarrow c_2 = \frac{U_p - 10,6}{0,36} = \frac{264,5 - 10,6}{0,36} = 817 \text{ mm} \quad (15)$$

4.2.2. Atmosférický impuls

Hodnota od výrobce pro výdržné napětí při atmosférickém impulsu je 630 kV.

1) Navýšení napětí:

$$U_p = U \cdot k_{PA} = 630 \cdot 1,2 = 756 \text{ kV} \quad (16)$$

2) Výpočet vzdáleností:

$$U_p = 45 + 0,57 \cdot d \Rightarrow c_3 = \frac{U_p - 45}{0,57} = \frac{756 - 45}{0,57} = 1247 \text{ mm} \quad (17)$$

$$U_p = 0,505 \cdot d \Rightarrow c_4 = \frac{U_p}{0,505} = \frac{756}{0,505} = 1497 \text{ mm} \quad (18)$$

$$U_p = 148 + 0,545 \cdot d \Rightarrow c_5 = \frac{U_p - 148}{0,545} = \frac{756 - 148}{0,545} = 1117 \text{ mm} \quad (19)$$

Vybereme c jako nejvyšší platnou hodnotu pro určení vzdálenosti v proudové dráze.

$$b = 1307 \text{ mm} \quad c = 1497 \text{ mm}$$

(z předchozího bodu)

4.3. Tři kritéria pro návrh kontaktů spínacího přístroje

Výpočet odporu vychází ze tří hlavních hodnot proudu: jmenovitého, dynamického a tepelného. Návrh uvažuje nejhorší možný případ.

4.3.1. Kritérium pro jmenovitý proud

Dodržení maximálního úbytku napětí při jmenovitém proudu.

- $I_n = 2000 \text{ A}$
- $n = 6$

$$R_s' = \frac{\Delta U_s}{I_i} = \frac{0,02}{333} = 6 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (20)$$

4.3.2. Kritérium pro dynamický proud

Nesvaření se kontaktů vlivem jejich odskočení při průchodu dynamického proudu.

- $I_{\text{dyn}} = 100 \text{ kA}$
- $n = 6$

$$R_S'' = \frac{\Delta U_S \cdot 10}{I_{\text{dyn}i}} = \frac{0,35 \cdot 10}{16666} = 21 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (21)$$

4.3.3. Kritérium pro krátkodobý tepelný proud

Nesvaření se kontaktů v důsledku průchodu zkratového proudu velké hodnoty.

- $I_{\text{kt}} = 40 \text{ kA}$
- $t_k = 1 \text{ s}$
- $n = 6$

$$R_S''' = \frac{E \cdot 10}{I_{\text{kti}}^2 \cdot t_k} = \frac{200 \cdot 10}{6666^2 \cdot 1} = 4,5 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (22)$$

kde E je přípustná energie uvolněná na odporu v konstantní úžině.

Vybere se nejmenší hodnota odporu:

$$R_S = 4,5 \cdot 10^{-5} \Omega$$

4.4. Kontaktní síla

Kontaktní neboli přitlačná síla udává, jakou silou jsou k sobě kontakty přitahovány. V praxi se volí 30-40 N/100 A.

$$F_K = \left(\frac{k}{R_S} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{11 \cdot 10^{-4}}{4,5 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,65} = 137 \text{ N} \quad (23)$$

4.5. Volba rozměrů v proudové dráze

Z tabulky se zvolí hodnota průměru příruby izolátoru D_p , ze které se dopočítají základní rozměrové poměry v proudové dráze.

U_N (kV)	h (mm)	ϕD_p (mm)
72,5	70 až 90	140 až 200
123		
145		
170	80 až 100	180 až 220
245		
440	90 až 110	240

Tab. 2 Rozměry přírub pro různé napěťové hladiny

Průměr příruby izolátoru	$D_p = 160 \text{ mm}$
Průměr přívodní hlavice	$D_{ph} = 1,1 \cdot D_p = 176 \text{ mm}$
Délka kontaktní hlavice	$l_{KH} = 1,5 \cdot D_p = 240 \text{ mm}$
Výška příruby izolátoru	$h = 70 \text{ mm}$
Délka objímky	$l_0 \approx D_p = 160 \text{ mm}$

4.6. Stanovení rozměrů ramene odpojovače

Rameno odpojovače je trubkový hliníkový vodič o zvolené délce l_r , vnějším průměru d a vnitřním průměru d_l . Výrobci v katalogu uvádějí vnější průměr a tloušťku stěny.

$$l_r = \frac{c}{2} - l_0 - \frac{3}{4} \cdot l_{KH} = \frac{1497}{2} - 160 - \frac{3}{4} \cdot 240 = 408,5 \text{ mm} \quad (24)$$

Pro určení tloušťky stěny ramene se vychází z výpočtu hloubky vniku. Ovšem v praxi se nepočítá se 100% hloubkou vniku.

$$a_r = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \frac{1}{2,885 \cdot 10^{-8}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}} = 0,012 \text{ m} \quad (25)$$

Ze známé hodnoty proudu a z dovolené proudové hustoty se určí předběžný průřez trubkového vodiče.

$$S_r = \frac{I_n}{\sigma_{dov}} = \frac{2000}{1,5} = 1333 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

Z něhož se dopočtou rozměry průměrů vodiče. Vychází z rovnice pro výpočet průřezu dutého vodiče

$$S_r = \pi \cdot (R^2 - r^2) \quad (27)$$

Postupným upravováním se vytvoří rovnice pro výpočet vnitřního poloměru r .

$$r = \frac{\frac{S_r}{\pi} - a_r^2}{2 \cdot a_r} = \frac{\frac{1333}{\pi} - 12^2}{2 \cdot 12} = 11,7 \text{ mm} \quad (28)$$

$$r = 11,7 \text{ mm} \quad d_1 = 23,4 \text{ mm}$$

$$R = r + a_r = 23,7 \text{ mm} \quad d = 47,4 \text{ mm}$$

Volba trubkového vodiče 70x8 mm

Zvolením reálného trubkového vodiče se dopočítá jeho skutečný průřez

$$S_r = \pi \cdot (R^2 - r^2) = \pi \cdot (35^2 - 27^2) = 1558 \text{ mm}^2 \quad (29)$$

Průřez kontaktního palce je vydělení průřezu ramene počtem palců.

$$S_p = \frac{S_r}{n} = \frac{1558}{6} \doteq 260 \text{ mm}^2 \Rightarrow a = 10 \text{ mm}; b = 26 \text{ mm} \quad (30)$$

Kontaktní palec je měděný vodič obdélníkového průřezu, kde strana a je šířka palce a b je výška palce.

4.7. Základní kontrola oteplení

Pro navržené rozměry vodičů a částí proudové dráhy se provede kontrola na oteplení jmenovitým proudem a tepelným zkratovým proudem.

4.7.1. Ramena odpojovače

1) Jmenovitý proud

Nejprve se určí výpočtem hodnota odporu trubkového vodiče pro rameno

$$R_{SS} = \rho_{Al} \cdot \frac{l_r}{S_r} = 3,5 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,4085}{1558 \cdot 10^{-6}} = 9,18 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (31)$$

Koeficient zhuštění je násobná hodnota, která uvažuje zhodnocení skinefektu s ohledem na povrchový jev.

$$k_{zh} = f \left(\sqrt{\frac{S_r \cdot f}{\rho_{Al}}} \right) = f \left(\sqrt{\frac{1558 \cdot 10^{-6} \cdot 50}{3,5 \cdot 10^{-8}}} \right) = f(1492) \Rightarrow 1,02 \quad (32)$$

$$R_{ST} = k_{zh} \cdot R_{SS} = 1,02 \cdot 9,18 \cdot 10^{-6} = 9,36 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (33)$$

Rameno svojí plochou předává teplo do okolí, počítá se pouze s vnějším pláštěm.

$$A = \pi \cdot d \cdot l_r = \pi \cdot 0,07 \cdot 0,4085 = 0,0898 \text{ m}^2 \quad (34)$$

Velikost oteplení je poměr vzniklého tepla ke chladícím účinkům tělesa.

$$\Delta \vartheta = \frac{R_{ST} \cdot I_n}{\alpha_0 \cdot A} = \frac{9,36 \cdot 10^{-6} \cdot 2000^2}{12 \cdot 0,0898} = 34,72 \text{ K} \quad (35)$$

2) Tepelný zkratový proud

Jelikož jsou zkraty velmi krátké děje, neuvažuje se odvod vzniklého tepla do okolí plochou tělesa. Proud prochází celým vodičem, proto se uvažuje jeho objem a nikoliv plocha.

$$v_r = S_r \cdot l_r = 1558 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4085 = 636,44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (36)$$

Těleso se neochlazuje, proto se nepočítá ani se součinitelem přestupu tepla. Dochází k akumulaci tepla v tepelné kapacitě tělesa.

$$\Delta\vartheta = \frac{R_{ST} \cdot I_{kt}^2 \cdot t}{c_v \cdot v_r} = \frac{9,36 \cdot 10^{-6} \cdot 40000^2 \cdot 1}{2,422 \cdot 10^6 \cdot 636,44 \cdot 10^{-6}} = 9,71 \text{ K} \quad (37)$$

4.7.2. Kontaktní palce

Stejným způsobem jako pro rameno se vypočítá oteplení i pro kontaktní palec.

1) Jmenovitý proud

Konečná hodnota oteplení nesmí překročit hodnotu 65K, která je uvedena v normě ČSN EN 62 271-1.

$$R_p = \rho_{Cu} \cdot \frac{l_p}{S_p} = 2,1 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,18}{260 \cdot 10^{-6}} = 1,46 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (38)$$

$$A_p = (a+b) \cdot l_p = (10+26) \cdot 240 = 8640 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (39)$$

$$\Delta\vartheta = \frac{\frac{R_S \cdot I_{ni}^2}{2} + R_p \cdot I_{ni}^2}{\alpha_0 \cdot A_p} = \frac{\frac{4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 333^2}{2} + 1,46 \cdot 10^{-5} \cdot 333^2}{12 \cdot 8640 \cdot 10^{-6}} = 39,71 \text{ K} \quad (40)$$

2) Krátkodobý tepelný zkratový proud

$$v_p = a \cdot b \cdot l_p = 10 \cdot 26 \cdot 240 = 62,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (41)$$

$$\Delta\vartheta = \frac{R_p \cdot I_{kti}^2 \cdot t}{c_{vCu} \cdot v_p} = \frac{1,66 \cdot 10^{-5} \cdot 6666^2 \cdot 1}{3,45 \cdot 10^6 \cdot 62,4 \cdot 10^{-6}} = 3 \text{ K} \quad (42)$$



Obr. 4 Kontaktní palce

4.8. Kontaktní pružina

Návrh rozměrů kontaktní ocelové pružiny na mechanické účinky při zachování pracovní výchylky.

Šířka pružiny se přibližně volí jako polovina z šířky palce $h \sim \frac{1}{2} a$.

$$h = 4 \text{ mm}$$

Pružina je připevněná k palci a jejich výška je tedy stejná.

$$b = 26 \text{ mm}$$

Z těchto základních rozměrů se vypočte modul průřezu v ohybu

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,026 \cdot 0,004^2}{6} = 6,93 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \quad (43)$$

Velikost momentu v místě styku, které odpovídá ½ délce kontaktní hlavice

$$M = F_K \cdot \frac{1}{2} l_{KH} = 137 \cdot \frac{1}{2} \cdot 240 = 16,4 \text{ Nm} \quad (44)$$

Namáhání pružiny musí být menší než možné maximální namáhání oceli

$$\sigma_{DOV} = \frac{\sigma_{PT}}{1,4} = \frac{1200}{1,4} = 857 \text{ MPa} \quad (45)$$

$$\sigma = \frac{M}{W_o} = \frac{16,4}{6,93 \cdot 10^{-8}} = 237 \text{ MPa} \quad (46)$$

Přitlačením kontaktů na sebe se pružina vychýlí ze základní polohy o vzdálenost

$$Y = \frac{2 \cdot (0,5 \cdot l_{KH})^3 \cdot F_K}{3 \cdot h \cdot W_o \cdot E} = \frac{2 \cdot (0,5 \cdot 0,24)^3 \cdot 137}{3 \cdot 0,004 \cdot 6,93 \cdot 10^{-8} \cdot 22 \cdot 10^{10}} = 2,58 \text{ mm} \quad (47)$$

kde E je modul pružnosti.

5. Metody pro řešení oteplení

Matematický popis sdílení tepla vede v principu na řešení parciálních diferenciálních rovnic. V řadě případů lze úlohu zjednodušit na jednorozměrný problém řešitelný pomocí obyčejných diferenciálních rovnic. Řešení těchto rovnic pro některé definované stavy, např. ustálený prostup tepla stěnou, pak vede k analytickým vztahům běžně používaným v praxi. Pro zjednodušený popis některých fyzikálních procesů se zároveň používají i empirické vztahy založené na měřeních a zkušenostech.

5.1. Analytické metody

Analytická metoda je základní aparát pro výpočet oteplení. Touto metodou je v kapitole 4.7 uveden výpočet pro kontrolu oteplení. Jedná se o postup výpočtu oteplení, který nezahrnuje dynamické změny. Existuje zde mnoho zjednodušení a tudíž má tato metoda i omezené použití.

5.2. Numerické metody

Diferenciální rovnice popisující sdílení tepla lze ve velmi omezených případech řešit analyticky. Ve většině případů je nutné použít numerické řešení.

Pro řešení parciálních diferenciálních rovnic se používají metoda konečných diferencí, metoda konečných prvků, metoda hraničních prvků, metoda konečných objemů či typově další metody řešení např. metoda Monte Carlo.

Výpočetní oblast se diskretizuje, pro jednotlivé elementy výpočetní sítě se sestavují algebraické rovnice. Výsledný systém matic je následně řešen danou výpočetní metodou. V případě často používané metody konečných prvků, spadající do skupiny Galerkinových metod, jsou rovnice sestavovány na základě zvolených bázeických funkcí. Vlastní řešení je pak řešeno minimalizací energetického reziduálu.

Pro řešení sdílení tepla v prostoru lze využít například komerční výpočetní programy ANSYS APDL (metoda konečných prvků) nebo ANSYS FLUENT / CFX (metoda konečných objemů). Pro 2D úlohy pak například programy AGROS, QuickField apod.

Obyčejné diferenciální rovnice popisující jednorozměrné úlohy jsou nejčastěji řešeny funkcemi ode45 a ode23. Funkce ode45 je ve většině výpočetních softwarů nastavená jako výchozí metoda. Funkce ode45 je funkce pro řešení diferenciálních rovnic, která je založena na explicitní Runge-Kuttově rovnici, Dormand-Pricově metodě. Jedná se o metodu řešící obyčejné diferenciální rovnice. Metoda má sedm stupňů, ale používá šest funkčních hodnocení, protože využívá vlastnost první stejný jako poslední (First Same As Last). Dormand-Pricova metoda vybírá koeficienty pro minimalizaci chyby řešení pátého řádu. Z tohoto důvodu je tato metoda vhodnější, když více řádové řešení slouží k pokračování integrace. [11]

Funkce ode23 počítá s obyčejnými diferenciálními rovnicemi. Jedná se o Bogacki-Shampinovu metodu, což je Runge-Kuttova metoda třetího řádu se čtyřmi stupni s vlastností první stejný jako poslední, což znamená, že poslední člen kroku je stejný, jako první člen následujícího kroku. Používá tři funkční vyhodnocení na krok. Má vestavěnou metodu druhého řádu, kterou lze použít k implementaci adaptivní velikosti kroku. [10]

Mezi další možné použité metody patří Eulerova metoda a Heunova metoda, které patří výpočetně k nejjednodušším.

Řešení obyčejných diferenciálních rovnic lze realizovat například v prostředí Matlab.

5.3. Metoda tepelné sítě

Metoda tepelné sítě spadá mezi jednorozměrné úlohy. Řešení tak vede na soustavu obyčejných diferenciálních rovnic. V případě náhradní tepelné sítě pro ustálený stav pak řešení vede na soustavu algebraických rovnic, které lze za použití různých metod řešit i analyticky (jednořadá tepelná síť pro ustálený stav).

Pro metodu tepelné sítě je nutné sestavit náhradní schéma jednořadá tepelné sítě. Jednotlivé prvky soustavy jsou nahrazeny tepelnými odpory, tepelnými kapacitami a tepelnými zdroji. V místě spojení prvků se vytvoří uzel, ve kterém se dopočítá výsledné oteplení. Podrobněji je tato metoda rozepsaná v následující kapitole.

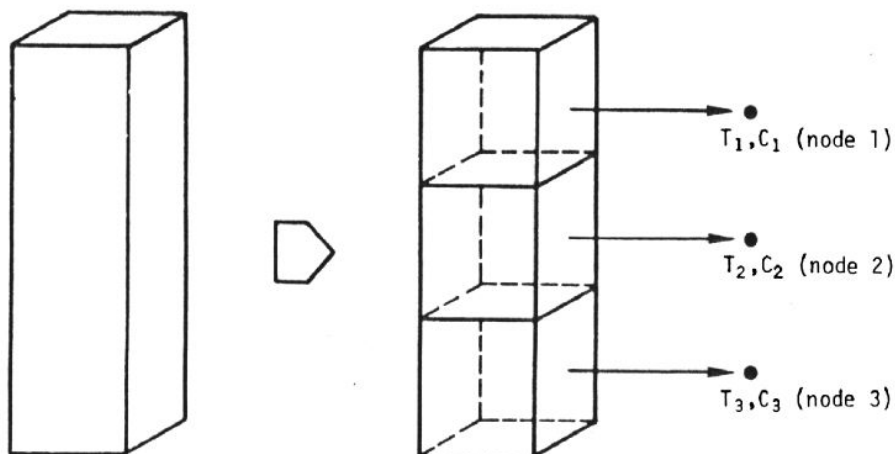
6. Metoda tepelné sítě

Metoda tepelné sítě využívá analogie mezi elektrickým a tepelným obvodem. Používá se pro jednopólová zařízení nebo pro více pólová zařízení, kde je dostatečná vrstva vzduchu nebo jiného plynu a nedochází ke vzájemnému sdílení tepla. Výsledkem je oteplení uzlů sítě (míst spojení dílčích schémat), které představuje koncová místa jednotlivých úseků proudové dráhy.

Veličina	Tepelný obvod	Elektrický obvod
Napětí	ϑ	U
Tok (proud)	Φ	I
Odpor	R	R
Kapacita	C	C
Ohmův zákon	$\Phi = \vartheta/R$	$I = U/R$

Tab. 3 Analogie tepelného a elektrického obvodu

Celý soubor se rozdělí do menších dílčích částí, které nemusí být stejně velké. Každá část reprezentuje tepelný odpor a tepelnou kapacitu. Tepelná síť elektromotorů nebo transformátorů má mřížkový charakter. U spínacích přístrojů má proudová dráha podobu podlouhlého tvarově různorodého vodiče. [3]



Obr. 5 Příklad rozdělení souboru

[3]

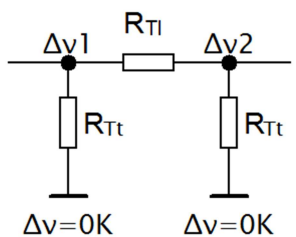
Pro výpočet oteplení je nutné daný rozdělený soubor převést do náhradního schématu tepelné sítě s uvažováním rozměrů částí a použitého materiálu. Jednotlivá schémata se spojí do tepelné sítě, která se řeší analogicky jako elektrická.

6.1. Prvky jednořadové tepelné sítě

Druhů prvků tepelné sítě elektrických spotřebičů je několik, níže jsou uvedené prvky použité v této práci.

- 1) Tyče beze ztrát konstantního průřezu o délce l , buď holé, nebo izolované.

Tímto tělesem neprochází elektrický proud a nevzniká v něm žádné teplo. Ve schématu jsou znázorněny jako články písmene Π . Podélný (longitudinální) odpor R_{Tl} a příčný (transversální) odpor R_{Tt} se určí ze vztahu



$$R_{Tl} = \frac{\sinh \beta l}{\delta} \tag{48}$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \operatorname{tgh} \frac{\beta l}{2}} \tag{49}$$

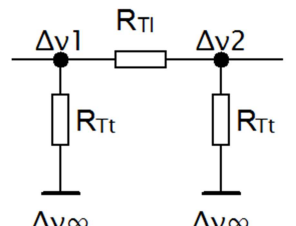
Za činitele β a δ se do rovnic 1 a 2 dosazují hodnoty výrazů

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_0 \cdot O}{\lambda \cdot S}} \tag{50}$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_0 \cdot O \cdot \lambda \cdot S} \tag{51}$$

- 2) Tyče se ztrátami konstantního průřezu o délce l , buď holé, nebo izolované.

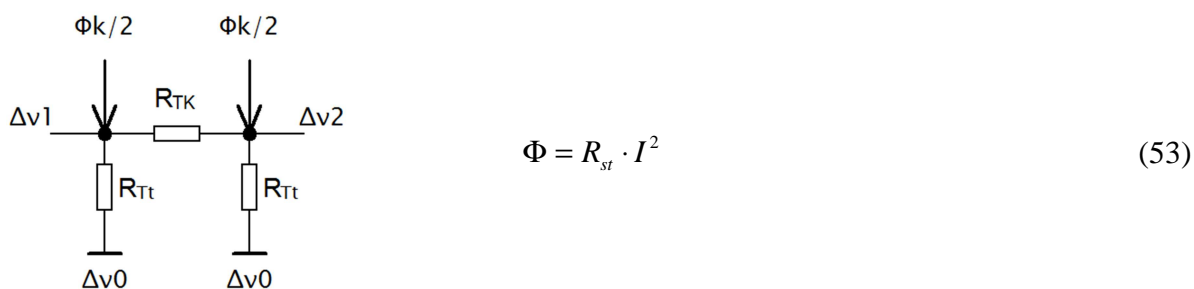
Průchodem elektrického proudu vzniká v tělese tepelný příkon. Náhradním schématem je opět Π – článek. Rozdíl oproti tyči beze ztrát je v oteplení koncových bodů příčných větví na hodnotu $\Delta \vartheta_\infty$, která je daná vztahem



$$\Delta \vartheta_\infty = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot O \cdot l} = \frac{\rho \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot O \cdot S} \tag{52}$$

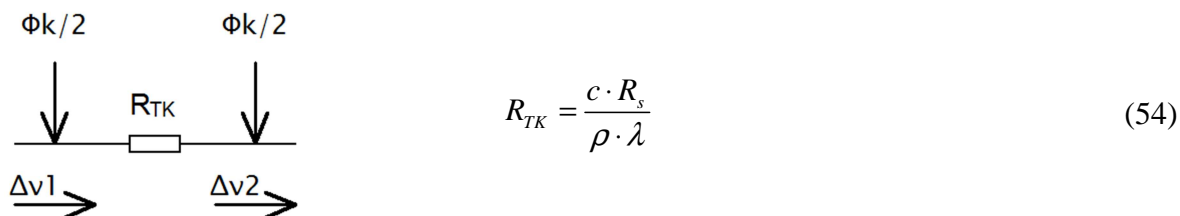
Hodnota oteplení $\Delta \vartheta_\infty$ uvažuje případ, kdy veškeré teplo vzniklé v dané části se odvede od okolí, proto je nutné považovat tuto hodnotu za fiktivní. Její velikost může být větší, než je dovolené oteplení. Hodnotě skutečného oteplení odpovídají hodnoty $\Delta \vartheta_1$ a $\Delta \vartheta_2$, které se určí výsledným řešením celé sítě.

Druhý způsob tyče se ztrátami nepočítá s oteplením koncových bodů, jejich hodnota zůstává nulová. Vzniklé teplo se injektuje do obvodu formou tepelného toku,



který se rozdělí na stejné díly do obou krajních uzlů prvku.

- 3) Kontaktní styk – má charakter tepelně krátké tyče, podélný odpor R_{TK} se rovná skutečnému tepelnému odporu. Velikost odporu R_{TK} se určí z rovnice

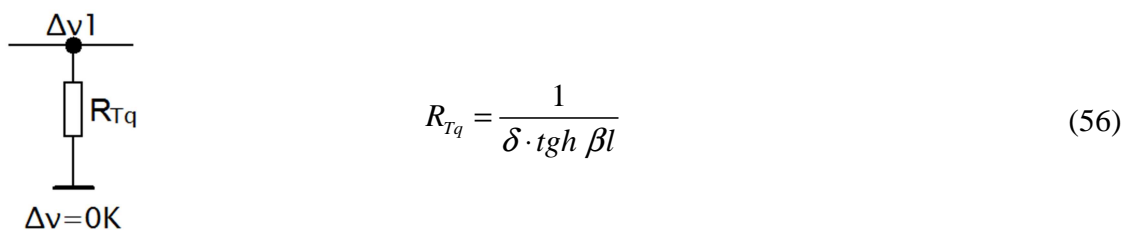


Tepelné ztráty v kontaktním styku jsou dány vztahem

$$\Phi_k = R_s \cdot I^2 \tag{55}$$

Do náhradního schématu se vkládají rovným dílem do obou konců 1 a 2 odporu R_{TK} .

- 4) Chladicí tyč – nejčastěji holé díly, které svým povrchem předávají veškeré vstupující teplo do okolí. V tepelné síti jsou značeny příčným odporem R_{Tq} . [1] [2]



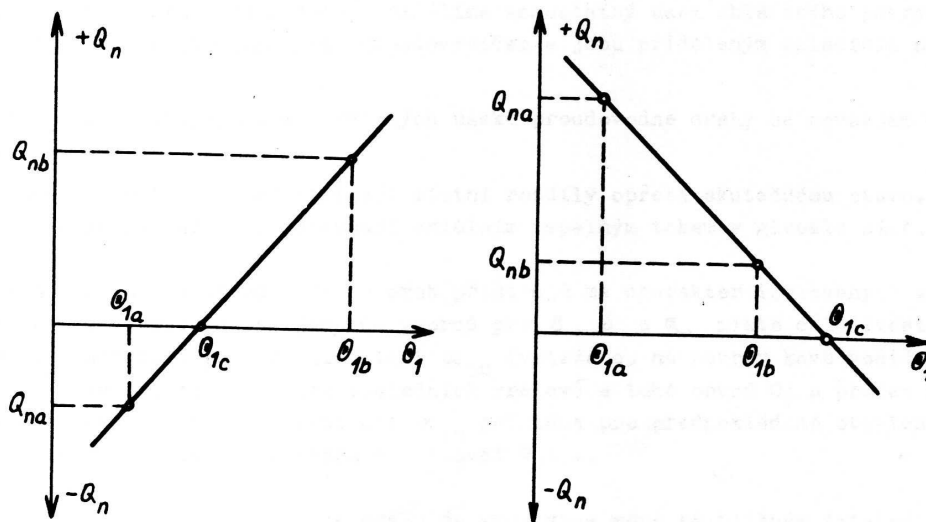
6.2. Řešení jednořadé tepelné sítě

Tepelná síť se vytvoří sériovým spojením jednotlivých dílů náhradních schémat a řeší se zpravidla numericky interpolační metodou. Základem pro výpočet je uzlová rovnice (analogie 1. Kirchhoffova zákona), podle níž je součet tepelných toků v uzlu roven nule. Na jednom konci sítě se zvolí oteplení ϑ_{1a} a postupně se dopočítají oteplení v uzlech až do druhého konce sítě (který by měl být nulový). Nejprve se vypočítá tok příčnou větví

$$\Phi_{r1} = \frac{\Delta \vartheta_{1a} - \Delta \vartheta_{\infty}}{R_{T11}} \quad (57)$$

pak z uzlové rovnice $\Sigma \Phi = 0$ tok podélnou větví Φ_{11} . Oteplení mezi uzly 1 a 2 na odporu analogií Ohmova zákona. Oteplení v uzlu 2 je součet oteplení ϑ_{1a} a ϑ_{12} . Opakováním postupu se dopočítají oteplení ve zbylých uzlech. Výsledky oteplení jsou správné, pokud výsledný tepelný tok z posledního uzlu vyjde roven nule. V opačném případě se musí zvolit jiná hodnota počátečního oteplení a celá síť se musí přepočítat.

Tomuto složitému počítání lze předejít početně metodou třetí hodnoty. Pro první hodnotu zvoleného oteplení se spočítají tepelné toky z jednotlivých uzlů v podélných větvích. Stejný postup se opakuje s další zvolenou hodnotou oteplení. Tímto postupem se získají dvě hodnoty tepelného toku pro dvě hodnoty zvoleného oteplení pro každý uzel. Grafickou metodou hledáme bod protnutí s osou oteplení znázorněnou na obr. 6. [2]



Obr. 6 Grafická metoda určení oteplení

[2]

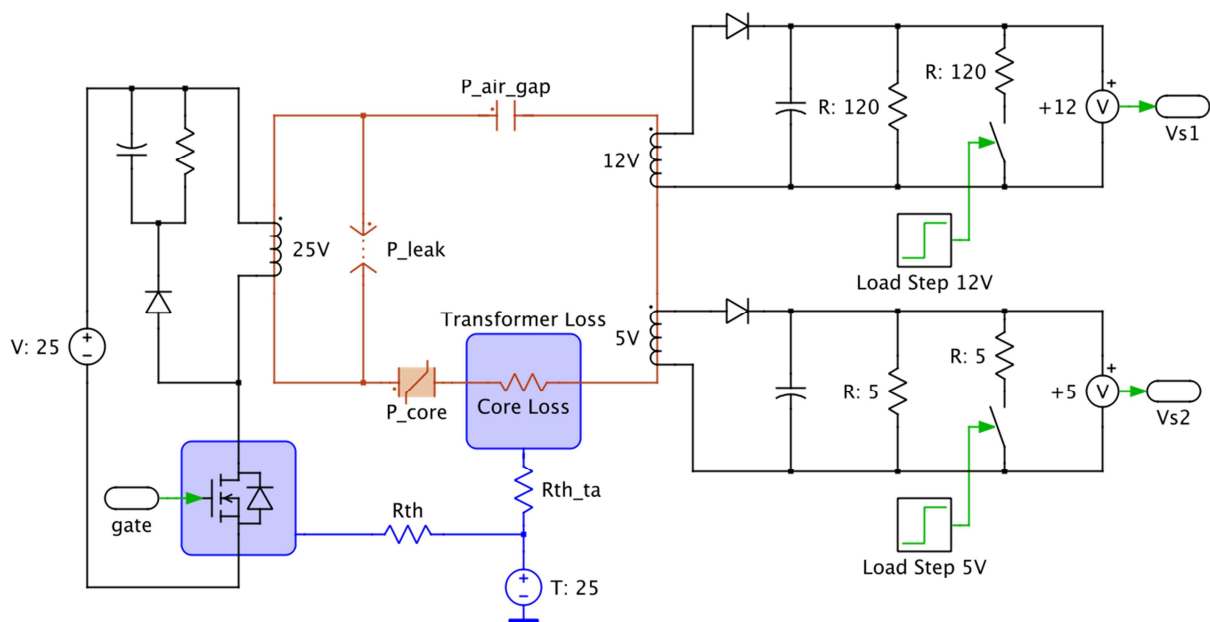
Výsledek se dá určit i početně s větší přesností vztahem [2]

$$\vartheta_{1c} = \vartheta_{1a} - \frac{\Phi_{na} \cdot (\vartheta_{1b} - \vartheta_{1a})}{\Phi_{nb} - \Phi_{na}} \quad (58)$$

S využitím výpočetní techniky lze celou úlohu zjednodušit tím, že se do uzlů zapojí voltmetry. Jejich hodnoty pak odpovídají hodnotám oteplení. Takovou tepelnou síť jsem sestavil v programu PLECS.

7. PLECS

PLECS je rozšíření programu MATLAB/Simulink. Jeho součástí je komplexní knihovna, která zahrnuje elektrické, tepelné, magnetické a mechanické aspekty systémů a jejich ovládání. Obvody se tvoří pomocí schématického editoru. [12]



Obr. 7 Obvod využívající elektrické, magnetické a tepelné oblasti [12]

Řešič úloh využívá numerické metody pro řešení diferenciálních rovnic, které se dají navolit. Od diskrétní metody přes Eulerovu metodu až k Dormand-Pricově metodě. Výstup výpočtů se provádí pomocí členu Scope, který vizualizuje výsledky simulace v závislosti na čase. Délka kroku a celková časová délka se dají uživatelsky nastavit.

8. Statická analýza

Statická analýza je zjednodušená analýza, kde se okamžitá změna v systému vypočte bez dlouhodobějšího následku dané změny. Pro výpočet metodou tepelné sítě to znamená, že se uvažují pouze tepelné odpory. Veškeré přijaté teplo se odvede povrchem tělesa do okolí, platí tedy rovnice (4). Výsledkem této analýzy je průběh oteplení napříč proudovou dráhou.

8.1. Tepelné odpory

Všechny prvky proudové dráhy se ze svých parametrů převedou na tepelné odpory podle kapitoly 6.1. Pro rychlejší vypsání výsledků jsem vytvořil m-file v programu MATLAB, který je obsažen v příloze 1.

1) Objímka

Obě objímky mají stejné rozměry: délka 160mm; vnitřní průměr 27mm; vnější průměr 45mm

Objímka jako těleso představuje dutý válec, za tohoto předpokladu se určí jeho obvod a průřez.

$$O = \pi \cdot d_o = \pi \cdot 0,09 = 0,2827 \text{ m}$$

$$S = \pi \cdot \left(\frac{d_o^2}{4} - \frac{(d_R - 2 \cdot tl)^2}{4} \right) = \pi \cdot \left(\frac{0,09^2}{4} - \frac{(0,07 - 2 \cdot 0,008)^2}{4} \right) = 0,0041 \text{ m}^2$$

kde d_o je průměr objímky; d_R je průměr ramene; tl je tloušťka ramene

Následně se dopočítají parametry β a δ , které slouží k výpočtům tepelných odporů.

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_o \cdot O}{\lambda \cdot S}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 0,2827}{237 \cdot 0,0041}} = 1,8751 \text{ m}^{-1}$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_o \cdot O \cdot \lambda \cdot S} = \sqrt{12 \cdot 0,2827 \cdot 234 \cdot 0,0041} = 1,8094 \text{ W / K}$$

Dále se dopočítají výsledné tepelné odpory.

$$R_{Ti} = \frac{\sinh \beta l}{\delta} = \frac{\sinh (1,8751 \cdot 0,16)}{1,8094} = 0,1683 \text{ K/W}$$

$$R_{Tl} = \frac{1}{\delta \cdot \operatorname{tgh} \frac{\beta l}{2}} = \frac{1}{1,8094 \cdot \operatorname{tgh} \frac{1,8751 \cdot 0,16}{2}} = 3,7117 \text{ K/W}$$

Stejným postupem se postupuje u všech prvků proudové dráhy.

2) Ramena

Každé rameno je u tohoto typu odpojovače jinak dlouhé. Rameno 1 jsem označil kratší rameno, na kterém jsou připojeny palce. Rameno 2 je delší s připojeným roubíkem.

Rameno 1: délka 408,5mm; vnitřní průměr 27mm; vnější průměr 35mm

$$\beta = 2,6732 \text{ m}^{-1}$$

$$\delta = 0,9872 \text{ W/K}$$

$$R_{Ti} = 1,3395 \text{ K/W}$$

$$R_{Tl} = 2,0361 \text{ K/W}$$

Rameno 2: délka 528,5mm; vnitřní průměr 27mm; vnější průměr 35mm

$$\beta = 2,6732 \text{ m}^{-1}$$

$$\delta = 0,9872 \text{ W/K}$$

$$R_{Ti} = 1,9570 \text{ K/W}$$

$$R_{Tl} = 1,6650 \text{ K/W}$$

3) Základové těleso

Na základové těleso jsou z jedné strany připevněny kontaktní palce s pružnou, z druhé strany je připevněno rameno odpojovače.

Výška 98mm; délka 60mm; šířka 100mm

$$\beta = 1,1208 \text{ m}^{-1}$$

$$\delta = 4,2398 \text{ W/K}$$

$$R_{Tl} = 0,0159 \text{ K / W}$$

$$R_{Ti} = 7,0172 \text{ K / W}$$

4) Palce

Proud neprochází celou délkou kontaktních palců, ale jen $\frac{3}{4}$ délkou. Poslední $\frac{1}{4}$ se dá uvažovat jako chladicí plocha. Výška 26mm; šířka 10mm; délka 240mm

$$\beta = 2,0747 \text{ m}^{-1}$$

$$\delta = 1,2493 \text{ W / K}$$

$$R_{Tl} = 0,3059 \text{ K / W}$$

$$R_{Ti} = 4,3364 \text{ K / W}$$

$$R_{Tq} = 3,2316 \text{ K / W}$$

5) Kontakt

Kontaktní odpor mezi palci a roubíkem

$$R_{TK} = 0,5739 \text{ K / W}$$

6) Roubík

Zjednodušeně jsem uvažoval roubík jako dutý válec o průměru 105mm; výšce 118mm

$$\beta = 1,8364 \text{ m}^{-1}$$

$$\delta = 1,6729 \text{ W / K}$$

$$R_{Tl} = 0,0822 \text{ K / W}$$

$$R_{Ti} = 8,7392 \text{ K / W}$$

8.2. Tepelné toky

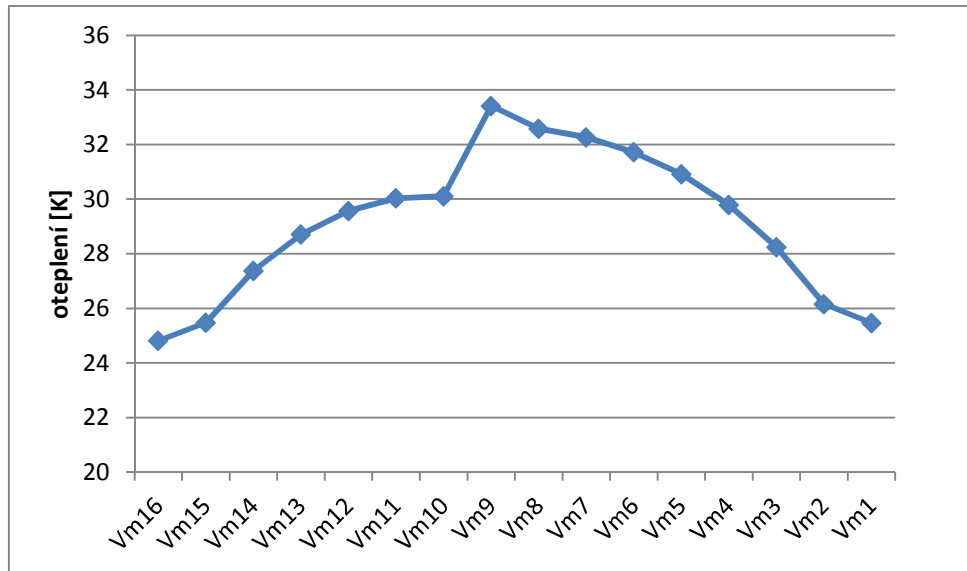
Tepelné toky injektují do obvodu přídatné oteplení. Jejich velikost se počítá ze vztahu 55. Výsledné hodnoty oteplení pro jednotlivé prvky jsou uvedeny v tabulce 4.

prvek	objímky	rameno 1	těleso	palce	kontakt	roubík	rameno 2
Φ [W]	5,5017	37,4359	0,8571	9,6923	30	2,6557	48,4330

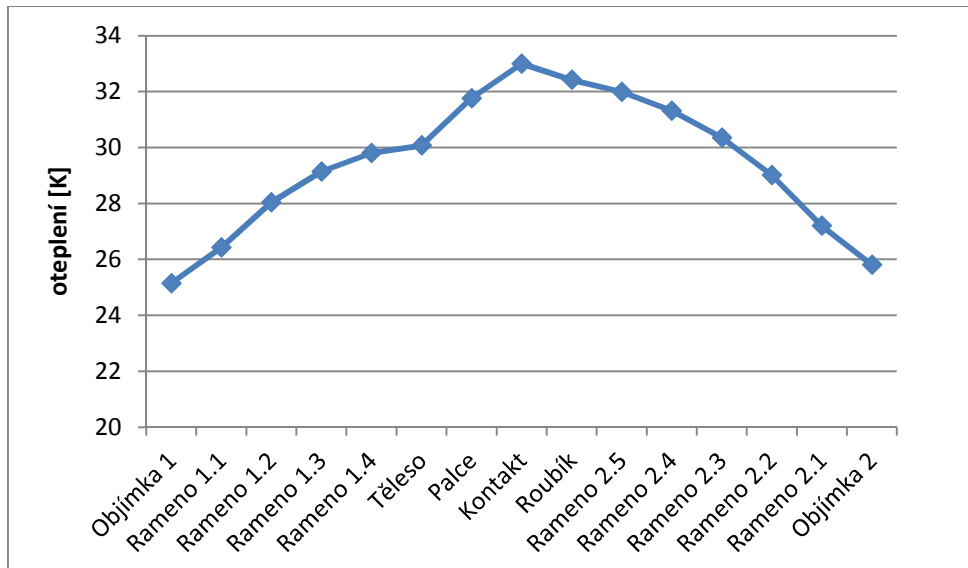
Tab. 4. Vypočtené hodnoty tepelných toků

8.3. Výsledek statické analýzy

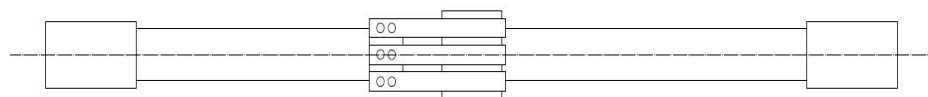
Graf 3 znázorňuje oteplení v jednotlivých uzlech tepelné sítě podle schématu pro statickou analýzu. Graf 4 zprůměroval hodnoty krajních uzlů, čímž dostal průměrné oteplení na každém prvku proudové dráhy.



Graf 3. Oteplení v uzlech tepelné sítě



Graf 4. Oteplení na prvcích proudové dráhy



9. Dynamická analýza

Dynamická analýza uvažuje jak tepelné odpory, tak tepelné kapacity. Tepelná kapacita uchovává část tepla uvnitř materiálu. Pro tento případ se uplatňuje rovnice (2). Jedná se o nejreálnější a nejpřesnější výpočet oteplení. Schéma jednořadé tepelné sítě se pro výpočet změny pouze přidáním tepelných kapacit, které závisí na měrné tepelné kapacitě materiálu a jeho objemu

$$C = c_v \cdot V \quad (59)$$

První řešení dynamické analýzy se počítalo s konstantní hodnotou jmenovitého proudu, kde je průběh oteplení v závislosti na čase pro každý uzel zvlášť. Další řešení využívalo generátor sinusového proudu, který svou frekvencí generovalo sinusovou křivku připomínající denní diagram zatížení. Tento časově proměnný proud, jehož osa byla zvolena na hodnotu 70% jmenovitého proudu a od této hodnoty se pohyboval v rozmezí $\pm 30\%$, vyvolal časové změny průběhu oteplení. Vlivem tepelných kapacit je křivka oteplení rozdílná oproti původní sinusové křivce.

9.1. Tepelné kapacity

Velikost tepelné kapacity udává množství tepla, které je tělesu nutno dodat, aby se jeho teplota zvýšila o 1K. Pro výpočet tepelných kapacit je použita rovnice (59). Měrná tepelná kapacita je pro hliník $2,422 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ a pro měď $3,45 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$.

1) Objímka

$$v = \pi \cdot (r_o^2 - r_v^2) \cdot l_o = \pi \cdot (0,045^2 - 0,027^2) \cdot 0,16 = 6,514 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$C = v \cdot c_v = 6,514 \cdot 10^{-4} \cdot 2,422 \cdot 10^6 = 1577,79 \text{ J/K}$$

kde r_v je vnitřní poloměr trubkového vodiče

Stejným postupem vypočítají hodnoty i pro zbylé prvky

2) Ramena

Rameno 1

$$v = \pi \cdot (r_R^2 - r_v^2) \cdot l_o = \pi \cdot (0,035^2 - 0,027^2) \cdot 0,4085 = 6,365 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$C = v \cdot c_v = 6,365 \cdot 10^{-4} \cdot 2,422 \cdot 10^6 = 1541,69 \text{ J/K}$$

Rameno 2

$$v = \pi \cdot (r_R^2 - r_v^2) \cdot l_o = \pi \cdot (0,035^2 - 0,027^2) \cdot 0,5285 = 8,235 \cdot 10^{-4} m^3$$

$$C = v \cdot c_v = 8,235 \cdot 10^{-4} \cdot 2,422 \cdot 10^6 = 1994,58 J / K$$

3) Základové těleso

$$v = x \cdot v_{kh} \cdot \frac{1}{4} \cdot l_{kh} = 0,1 \cdot 0,098 \cdot \frac{1}{4} \cdot 0,24 = 5,88 \cdot 10^{-4} m^3$$

$$C = v \cdot c_v = 5,88 \cdot 10^{-4} \cdot 2,422 \cdot 10^6 = 1424,14 J / K$$

kde x je šířka základového tělesa

4) Palce

$$v = n \cdot a \cdot b \cdot l_{kh} = 6 \cdot 0,01 \cdot 0,026 \cdot 0,24 = 3,744 \cdot 10^{-4} m^3$$

$$C = v \cdot c_v = 3,744 \cdot 10^{-4} \cdot 3,45 \cdot 10^6 = 1291,68 J / K$$

5) Roubík

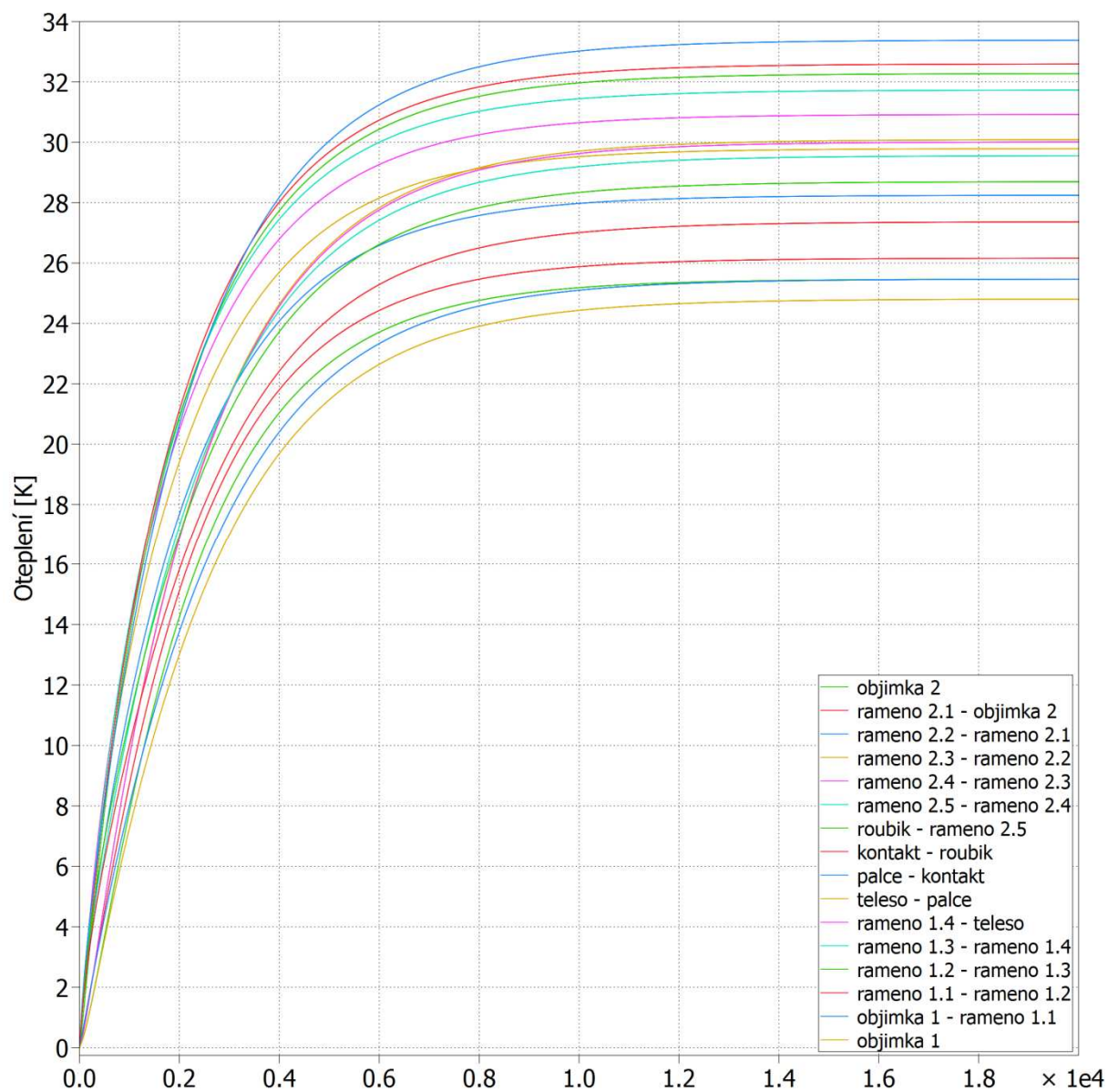
$$v = \pi \cdot (r_r^2 - r_v^2) \cdot v_r = \pi \cdot (0,0525^2 - 0,0425^2) \cdot 0,118 = 3,522 \cdot 10^{-4} m^3$$

$$C = v \cdot c_v = 3,522 \cdot 10^{-4} \cdot 3,45 \cdot 10^6 = 1215 J / K$$

Vypočtené tepelné kapacity se vkládají do schématu paralelně k příčným odporům.

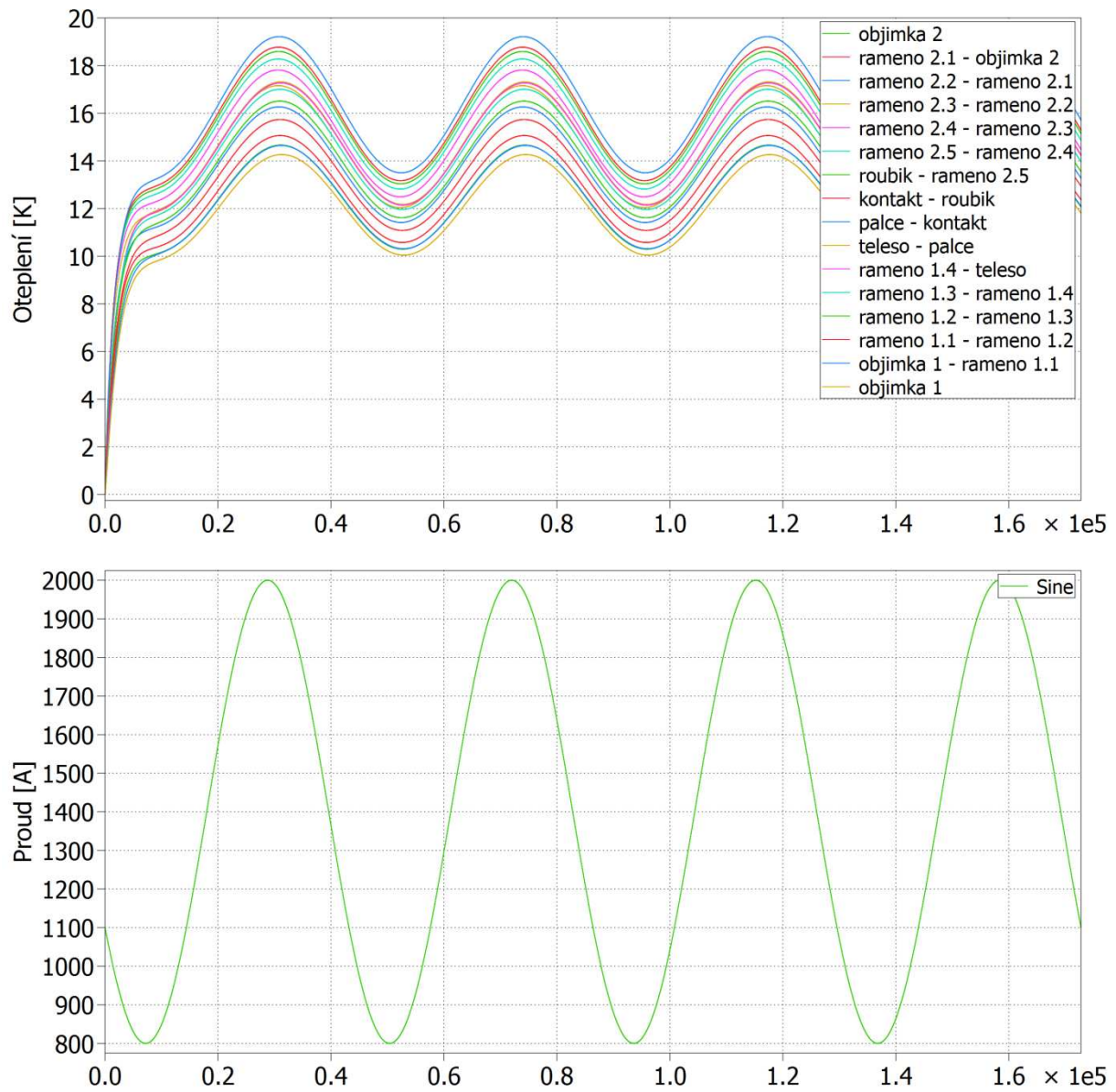
9.2. Výsledek dynamické analýzy

První část dynamické analýzy se zabývá průběhem oteplení, které vyvolal jmenovitý proud o konstantní hodnotě, graf 5.



Graf 5. Dynamický průběh oteplení

Druhá část představuje oteplení dané křivkou připomínající denní diagram zatížení v časovém průběhu, který odpovídá dvěma dnům.



Graf 6. Průběh oteplení během dvou dnů

1	palce - kontakt	9	rameno 1.3 - rameno 1.4
2	kontakt - roubik	10	rameno 1.2 - rameno 1.3
3	roubik - rameno 2.5	11	rameno 2.2 - rameno 2.1
4	rameno 2.5 - rameno 2.4	12	rameno 1.1 - rameno 1.2
5	rameno 2.4 - rameno 2.3	13	rameno 2.1 – objimka 2
6	teleso - palce	14	objimka 2
7	rameno 1.4 - teleso	15	objimka 1 - rameno 1.1
8	rameno 2.3 - rameno 2.2	16	objimka 1

Tab. 5 Seřazené hodnoty oteplení od nejvyšší

Závěr

Z technických parametrů pro odpojovač 3 sht-1220 jsem vytvořil návrh proudové dráhy pro elektrickou část přístroje. Použité rozměry a materiálové konstanty sloužily pro výpočet tepelných odporů a tepelných kapacit, které byly použity k sestavení jednořadé tepelné sítě. K výpočtu oteplení byl použit program PLECS.

Statická analýza oteplení počítá pouze s tepelnými odpory. Pro přesnější znázornění oteplení v ramenech odpojovače byla ramena symetricky rozdělena do čtyř až pěti částí. Výsledkem analýzy je rozložení oteplení podél proudové dráhy, které je znázorněno v grafech 3 a 4, v kapitole 8.3. Pro tento způsob řešení byl řešič nastaven jako diskrétní. Graf oteplení ukazuje, že největší hodnota oteplení je v kontaktní hlavici z důvodu, že chladicí plocha je poměrně malá. Tento jev odpovídá předpokladům i snímkům pod termokamerou.

Dynamická analýza oteplení se zabývá změnou oteplení vlivem časové změny velikosti procházejícího proudu. Uvažuje i tepelné kapacity, které v sobě část tepla akumulují. Jejich vlivem dochází ke změně oteplení při změně proudu se zpožděním. Tento jev je partner na grafu 6. Pro tento druh analýzy byl řešič nastaven na funkci ode4 (Runge-Kutta). Výsledky analýzy jsem rozdělil do dvou bodů: 1) časový průběh oteplení vyvolaný konstantní hodnotou proudu, graf 5, kapitola 9.2. Velikost ustáleného oteplení odpovídá výsledkům statické analýzy, může být tedy prohlášena za korektní. 2) časový průběh oteplení podél křivky, která symbolizuje denní diagram zatížení pro dva dny uvedený v grafu 6, kapitola 9.2. Sinusový generátor byl nastaven na hodnotu bias = 0,7, která posouvá osu průběhu, a amplituda = 0,3 s fázovým posunem -150° , aby amplitudy částečně odpovídaly průběhům denních špiček DDZ.

Přínosy této práce jsou především v návrhu proudové dráhy a v řešení statické a dynamické analýzy oteplení, které se dají pozměnit vstupními proměnnými v m-filu. Změnou rozměrů se automaticky dopočítají hodnoty tepelných odporů a tepelných kapacit, které se rovnou generují do náhradní tepelné sítě. Stejně tak i změnou velikosti proudu se automaticky změní generovaný sinusový proud a velikosti tepelných toků. Pomocí těchto analýz se dají simulovat různé nadproudové stavy, které určí dobu, po kterou může být přístroj přetěžován. Velikost nadproudu pro navržený odpojovač je 2790A, který způsobí maximální oteplení 64,96K.

Použitá literatura

- [1] HAVELKA, O. Elektrické přístroje. Praha: SNTL, 1985
- [2] HAVELKA, O.; VÁVRA, Z.; SVOBODA, D. Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I. Brno: VUT, 1985
- [3] K&K Associates. Thermal Network Modeling Handbook. Westminster, 2000
- [4] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fyzika: Mechanika a termodynamika. Brno: Vutium, 2000
- [5] MICHEJEV, M. A. Základy sdílení tepla. Praha: Průmyslové vykladatelství, 1952
- [6] VOSTRACKÝ, Zdeněk; BÁRTA, Karel. Spínací přístroje velmi vysokého napětí. Praha: SNTL, 1983
- [7] SEDLÁČEK, Jan. Přednášky z předmětu Elektrické přístroje v SE. Plzeň, 2012
- [8] RUTHAL: Odpojovače a uzemňovače 36 kV – 800 kV, str. 2.
- [9] ČSN EN 62 271-1. Česká technická norma: Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení. ed. 7. 2009
- [10] Bogacki-Shampinova metoda [online], 4. 5. 2013. Dostupné na WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Bogacki%E2%80%93Shampine_method
- [11] Dormand-Pricova metoda [online], 8. 4. 2013. Dostupné na WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Dormand%E2%80%93Prince_method
- [12] PLECS [online], Dostupné na WWW: <http://www.plexim.com/plecs>
- [13] Technické parametry odpojovače spol. SERW [online], 12. 6. 2012. Dostupné na WWW: <http://www.serw.cz/cs/odpojovace-vvn-123kv/123-kv-horizontalni-odpojovace.html>

Přílohy

Příloha 1: Skript pro výpočet tepelných odporů, tepelných toků a tepelných kapacit

Příloha 2: Schéma pro výpočet statické analýzy

Schéma pro výpočet statické analýzy včetně přístrojů

Příloha 3: Schéma pro výpočet dynamické analýzy pro konstantní hodnotu proudu

Schéma pro výpočet dynamické analýzy pro proměnou hodnotu proudu včetně přístrojů

Příloha 1

Skript pro výpočet tepelných odporů, tepelných toků a tepelných kapacit

```

clc
lR=0.4085 ; %delka ramene
lR2=0.5285 ; %delka ramene
lo=0.16 ; %delka objimky
lkh=0.24 ; %delka kontaktni hlavice
vkh=0.098 ; %vyška kontaktni hlavice
dR=0.07 ; %prumer ramene
t1=0.008 ; %tloušťka ramene
do=0.09 ; %prumer objimky
alfa0=12 ; %soucinitel prestupu tepla
lambdaAl=237; %tepelna vodivost hliniku
lambdaCu=386; %tepelna vodivost medi
lambdaAg=429; %tepelna vodivost stibra
roAl=3.5e-8 ; %merna el. odpRlobv hliniku
roCu=2.1e-8 ; %merna el. odpRlobv medi
roAg=1.98e-8; %merna el. odpRlobv stibra
Rs=4.5e-5 ; %minimalni hodnota odpRlobvu
c=0.65 ;
I=2000 ; %jmenovity proud
p=6 ; %pocet palcu
A=0.3 ; %amplituda
B=0.7 ; %bias
cvAl=2.422e6; %merna tepelna kapacita hliniku
cvCu=3.45e6 ; %merna tepelna kapacita medi

fprintf ('1.RAMENO')
Rlobv=pi*dR; %obvod ramene
Rlprurez=pi*(dR^2/4-(dR-2*t1)^2/4); %prurez ramene
Rldelta=sqrt(alfa0*lambdaAl*Rlobv*Rlprurez);
Rlbeta=sqrt(alfa0*Rlobv/lambdaAl/Rlprurez);
RlRt1=(sinh(Rlbeta*lR))/Rldelta
RlRtt=1/Rldelta/tanh(Rlbeta*lR/2)
RlRst=1.02*roAl*lR/Rlprurez;
RlQ=RlRst*I^2
RlV=(pi*(dR^2/4-(dR-2*t1)^2/4))*lR;
RlC=RlV*cvAl

fprintf ('2.RAMENO')
R2obv=pi*dR; %obvod ramene
R2prurez=pi*(dR^2/4-(dR-2*t1)^2/4); %prurez ramene
R2delta=sqrt(alfa0*lambdaAl*R2obv*R2prurez);
R2beta=sqrt(alfa0*R2obv/lambdaAl/R2prurez);
R2RT1=(sinh(R2beta*lR2))/R2delta
R2RTt=1/R2delta/tanh(R2beta*lR2/2)
Rst2=1.02*roAl*lR2/Rlprurez;
R2Q=Rst2*I^2
R2V=(pi*(dR^2/4-(dR-2*t1)^2/4))*lR2;
R2C=R2V*cvAl

```

```
fprintf ('OBJIMKA')
Oobvod=pi*do; %obvod objimky
Oprurez=pi*(do^2/4-(dR-2*t1)^2/4); %prurez objimky
Odelta=sqrt(alfa0*lambdaAl*Oobvod*Oprurez);
Obeta=sqrt(alfa0*Oobvod/lambdaAl/Oprurez);
ORT1=(sinh(Obeta*lo))/Odelta
ORTt=1/Odelta/tanh(Obeta*lo/2)
ORst=roAl*lo/Oprurez;
OQ=ORst*I^2
OV=(pi*(do^2/4-(dR-2*t1)^2/4))*lo;
OC=OV*cvAl
```

```
fprintf ('KONTAKT')
KRTk=Rs*c/roAg/lambdaAg/p
KQ=p*(Rs*(I/p)^2)
```

```
fprintf ('ROUBIK')
Rdr=0.105; %prumer roubiku
Rvr=vkh+0.02; %vyska roubiku
Rtlr=0.01 ;
Rlr=0.25*pi*(Rdr-Rtlr);
Robv=2*(Rvr+Rtlr);
Rprurez=2*Rvr*Rtlr;
Rdelta=sqrt(alfa0*lambdaCu*Robv*Rprurez);
Rbeta=sqrt(alfa0*Robv/lambdaCu/Rprurez);
RRT1=(sinh(Rbeta*Rlr))/Rdelta
RRTt=1/Rdelta/tanh(Rbeta*Rlr/2)
RRst=roCu*Rlr/Rprurez;
RQ=RRst*I^2
RV=(pi*(Rdr^2/4-(Rdr-2*Rtlr)^2/4))*Rvr;
RC=RV*cvCu
```

```
fprintf ('PALEC')
a=0.010; %sirka palce
b=0.026; %vyska palce
Pobvod=p*(a+b);
Pprurez=p*a*b;
Pdelta=sqrt(alfa0*lambdaCu*Pobvod*Pprurez);
Pbeta=sqrt(alfa0*Pobvod/lambdaCu/Pprurez);
PRT1=(sinh(Pbeta*3/4*lkh))/Pdelta
PRTt=1/Pdelta/tanh(Pbeta*3/4*lkh/2)
PRTq=1/Pdelta/tanh(Pbeta*1/4*lkh)/2
PRst=roCu*3/4*lkh/Pprurez;
PQ=PRst*I^2
PV=p*a*b*lkh;
PC=PV*cvCu
```

```
fprintf ('TELESO')
R=0.128; %sire
d=1/4*lkh; %delka
Tobvod=2*((R-(2*a)-(2*0.004))+vkh);
Tprurez=(R-(2*a)-(2*0.004))*vkh ;
Tdelta=sqrt(alfa0*lambdaCu*Tobvod*Tprurez);
Tbeta=sqrt(alfa0*Tobvod/lambdaCu/Tprurez);
TRT1=(sinh(Tbeta*d))/Tdelta
TRT=1/Tdelta/tanh(Tbeta*d/2)
TRst=roAl*d/Tprurez;
TQ=TRst*I^2
TV=(R-(2*a)-(2*0.004))*vkh*1/4*lkh;
TC=TV*cvAl
```

Příloha 2

Schéma pro výpočet statické analýzy

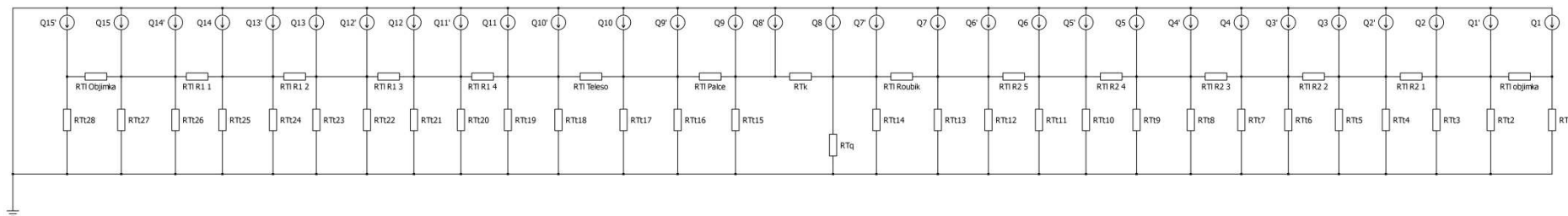
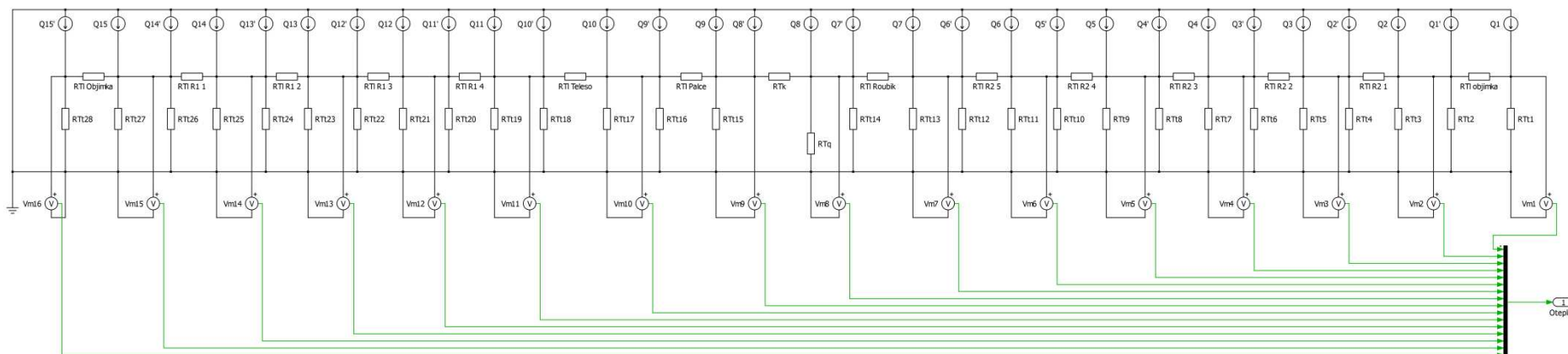


Schéma pro výpočet statické analýzy včetně přístrojů



Příloha 3

Schéma pro výpočet dynamické analýzy pro konstantní hodnotu proudu

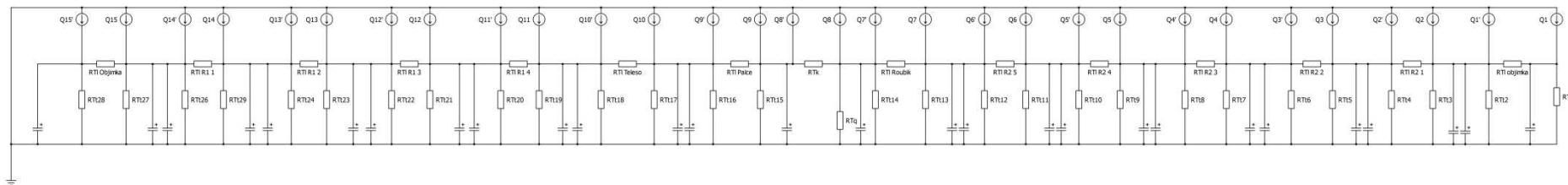


Schéma pro výpočet dynamické analýzy pro proměnou hodnotu proudu včetně přístrojů

