

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Aplikace numerických metod při návrhu a analýze
elektrického odpojovače**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jakub KOPECKÝ
Osobní číslo:	E18N0051P
Studijní program:	N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Elektroenergetika
Téma práce:	Aplikace numerických metod při návrhu a analýze elektrického odpojovače
Zadávací katedra:	Katedra elektroenergetiky a ekologie

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte teoretický úvod orientovaný na elektrické odpojovače a numerické výpočetní analýzy využitelné při návrhu a analýze odpojovačů.
2. Proveďte základní konstrukční návrh odpojovače zadaných parametrů.
3. Aplikujte vybrané numerické výpočetní analýzy na navržený elektrický odpojovač.
4. Zhodnoťte vypočtené výsledky a přínos realizovaných analýz.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**
Nové technologie – výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



L.S.


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

Abstrakt

Překládaná diplomová práce je zaměřena na aplikaci numerických metod při návrhu a analýze elektrického odpojovače. V úvodní části se práce zabývá teoretickým rozбором odpojovačů, vysvětlení jejich funkce a seznámením s normativními požadavky na odpojovače. Další část práce představuje vybrané numerické metody pro řešení návrhu a analýz odpojovačů. V poslední části práce je proveden výpočet konstrukčního návrhu modelu a rozbor provedených simulací v programu COMSOL.

Klíčová slova

Elektrický odpojovač, numerická analýza, tepelná analýza, mechanická analýza, elektrostatická analýza

Theme:

Application of numerical methods in design and analysis of electrical disconnecter

Abstract

The diploma thesis is focused on the application of numerical methods in design and analysis of electrical disconnecter. In the first part the thesis deals with the theoretical analysis of disconnectors, explanation of their function and inform with the normative requirements for disconnectors. The next part of the work present selected numerical methods for solving the design and analysis of disconnectors. The last part of the work is calculation of the structural design of the model and the analysis of the simulations performed in the COMSOL program.

Key words

Electrical disconnecter, numerical method, thermal analysis, mechanical analysis, electrostatic analysis

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 16.6.2020

Jakub Kopecký

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za cenné rady při zpracování této práce, připomínky a metodické vedení.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
SEZNAM OBRÁZKŮ	12
ÚVOD	13
1 ODPOJOVAČE	14
1.1 DEFINICE	14
1.2 ROZDĚLENÍ	14
1.3 KONSTRUKCE ODPOJOVAČŮ	15
1.3.1 Nosná konstrukce	15
1.3.2 Izolační podpěry.....	15
1.3.3 Proudová dráha	15
1.4 JMENOVITÉ CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY	15
1.4.1 Jmenovité napětí	15
1.4.2 Jmenovitá izolační hladina	16
1.4.3 Jmenovitý kmitočet.....	16
1.4.4 Jmenovitý proud.....	16
1.4.5 Oteplení.....	16
1.4.6 Jmenovitý krátkodobý výdržný proud.....	16
1.4.7 Jmenovitý dynamický výdržný proud	16
1.4.8 Jmenovitá doba zkratu	16
1.5 PRACOVNÍ PODMÍNKY ODPOJOVAČŮ	17
1.5.1 Normální podmínky odpojovačů vnitřního provedení.....	17
1.5.2 Normální podmínky odpojovačů venkovního provedení	17
1.5.3 Zvláštní podmínky odpojovačů.....	17
1.6 TYPOVÉ ZKOUŠKY	18
1.6.1 Zkoušky elektrické pevnosti izolace	18
1.6.2 Zkouška rádiového rušení	18
1.6.3 Měření elektrického odporu	19
1.6.4 Zkoušky oteplení.....	19
1.6.5 Zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem.....	19
2 NUMERICKÉ ANALÝZY ODPOJOVAČE	20
2.1 MOŽNOST UPLATNĚNÍ NUMERICKÝCH ANALÝZ U ODPOJOVAČŮ	20
2.2 TEPelná ANALÝZA.....	20

2.2.1	<i>Termodynamické zákony</i>	20
2.2.2	<i>Šíření tepla</i>	21
2.2.3	<i>Tepelné účinky proudu</i>	25
2.2.4	<i>Metoda tepelné sítě</i>	26
2.3	ANALÝZY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE A JEHO ÚČINKŮ.....	30
2.3.1	<i>Síly v magnetickém poli</i>	30
2.3.2	<i>Elektrostatické pole</i>	34
2.4	PEVNOSTNÍ ANALÝZA.....	34
3	VÝPOČET A KONSTRUKČNÍ NÁVRH MODELU ODPOJOVAČE.....	38
3.1	IZOLAČNÍ VZDÁLENOST PROTI ZEMI A V ODPOJOVACÍ DRÁZE.....	38
3.2	PROUDOVÁ DRÁHA.....	40
3.2.1	<i>Oteplení proudové dráhy</i>	40
3.2.2	<i>Oteplení kontaktních palců</i>	42
3.3	MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ PROUDOVÉ DRÁHY.....	45
3.3.1	<i>Tíha ramene a kontaktní hlavice</i>	45
3.3.2	<i>Elektrodynamická síla</i>	46
3.3.3	<i>Námraza</i>	46
3.3.4	<i>Tlak větru</i>	47
4	APLIKACE VYBRANÝCH NUMERICKÝCH ANALÝZ NA MODEL ODPOJOVAČE.....	49
4.1	TVORBA MODELU.....	49
4.1.1	<i>Přívodní hlavice</i>	49
4.1.2	<i>Ramena odpojovače</i>	49
4.1.3	<i>Noha odpojovače</i>	50
4.1.4	<i>Kontaktní ústrojí</i>	50
4.1.5	<i>Celkový model odpojovače</i>	51
4.2	COMSOL.....	52
4.3	TEPELNÁ ANALÝZA.....	52
4.3.1	<i>Vstupní parametry</i>	53
4.3.2	<i>Výpočetní síť</i>	53
4.3.3	<i>Výsledky analýzy</i>	54
4.4	PEVNOSTNÍ ANALÝZA.....	57
4.4.1	<i>Vstupní parametry</i>	57
4.4.2	<i>Výpočetní síť</i>	59
4.4.3	<i>Výsledky analýzy</i>	60
4.5	ELEKTROSTATICKÁ ANALÝZA.....	62
4.5.1	<i>Vstupní parametry</i>	63

4.5.2	<i>Výpočetní síť</i>	63
4.5.3	<i>Výsledky analýzy</i>	63
4.6	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZ	65
5	ZÁVĚR	67
6	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	68

Seznam symbolů a zkratk

B.....	Magnetická indukce	T
c.....	Měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
F.....	Síla	N
f_r	Jmenovitý kmitočet	Hz
g.....	Tíhové zrychlení	$m \cdot s^{-1}$
H.....	Intenzita magnetického pole	$A \cdot m^{-1}$
I_k	Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	A
I_p	Jmenovitý dynamický výdržný proud	A
I_r	Jmenovitý proud	A
J.....	Proudová hustota	$A \cdot m^{-2}$
K_t	Korekční činitel	-
l.....	Délka	m
P_z	Ztrátový výkon	W
Q.....	Elektrický náboj	C
T.....	Teplota	K
t_k	Jmenovitá doba zkratu	s
U_r	Jmenovité napětí	V
α_0	Součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\Delta\vartheta$	Oteplení	K
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ	Objemová hmotnost	$kg \cdot m^{-3}$

Seznam obrázků

OBRÁZEK 2.1 - OTEPLOVACÍ A OCHLAZOVACÍ CHARAKTERISTIKA [1].....	26
OBRÁZEK 2.2 - NÁHRADNÍ SCHÉMA TYČE BEZE ZTRÁT [1]	27
OBRÁZEK 2.3 - NÁHRADNÍ SCHÉMA TEPELNĚ DLOUHÉ TYČE [1]	29
OBRÁZEK 4.1 - PŘÍVODNÍ HLAVICE.....	49
OBRÁZEK 4.2 - RAMENA ODPOJOVAČE	50
OBRÁZEK 4.3 - NOHA ODPOJOVAČE.....	50
OBRÁZEK 4.4 - KONTAKTNÍ ÚSTROJÍ	51
OBRÁZEK 4.5 - MODEL ODPOJOVAČE	51
OBRÁZEK 4.6 - ZJEDNODUŠENÝ MODEL	52
OBRÁZEK 4.7 - DETAIL VÝPOČETNÍ SÍTĚ – TEPELNÁ ANALÝZA	54
OBRÁZEK 4.8 – ZOBRAZENÍ PROUDOVÉ HUSTOTY - V ŘEZU CELÉHO MODELU	55
OBRÁZEK 4.9 – ZOBRAZENÍ PROUDOVÉ HUSTOTY - V DETAILU KONTAKTNÍHO ÚSTROJÍ.....	55
OBRÁZEK 4.10 – ZOBRAZENÍ PROUDOVÉ HUSTOTY - V DETAILU PŘÍVODNÍ HLAVICE.....	55
OBRÁZEK 4.11 - ROZLOŽENÍ TEPLoty NA ODPOJOVAČI - POHLED SHORA.....	56
OBRÁZEK 4.12 - ROZLOŽENÍ TEPLoty NA ODPOJOVAČI - POHLED ZDOLA.....	56
OBRÁZEK 4.13 - ROZLOŽENÍ TEPLoty NA ODPOJOVAČI - DETAIL KONTAKTNÍHO ÚSTROJÍ.....	57
OBRÁZEK 4.14 - OKRAJOVÁ PODMÍNKA - PEVNÝ KONTAKT	58
OBRÁZEK 4.15 - OKRAJOVÁ PODMÍNKA - NÁMRAZA RAMENE	58
OBRÁZEK 4.16 - OKRAJOVÁ PODMÍNKA - NÁMRAZA PŘÍVODNÍ HLAVICE.....	58
OBRÁZEK 4.17 - OKRAJOVÁ PODMÍNKA - PŮSOBENÍ BOČNÍHO VĚTRU	59
OBRÁZEK 4.18 - DETAIL VÝPOČETNÍ SÍTĚ - PEVNOSTNÍ ANALÝZA	59
OBRÁZEK 4.19 - ROZLOŽENÍ MECHANICKÉHO NAPĚTÍ.....	60
OBRÁZEK 4.20 - DETAIL ROZLOŽENÍ MECHANICKÉHO NAPĚTÍ NA NOZE ODPOJOVAČE	60
OBRÁZEK 4.21 - VÝSLEDNÉ POSUNUTÍ ODPOJOVAČE VLIVEM ZATĚŽUJÍCÍCH SIL.....	61
OBRÁZEK 4.22 - VÝSLEDNÁ DEFORMACE ODPOJOVAČE – POHLED Z BOKU.....	62
OBRÁZEK 4.23 - VÝSLEDNÁ DEFORMACE ODPOJOVAČE - POHLED SHORA	62
OBRÁZEK 4.24 - MODEL ODPOJOVAČE PRO ELEKTROSTATICKOU ÚLOHU	63
OBRÁZEK 4.25 - ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POTENCIÁLU – ŘEZ V OSE X	64
OBRÁZEK 4.26 - ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POTENCIÁLU VE VÝŠCE VODIČŮ.....	64
OBRÁZEK 4.27 - ROZLOŽENÍ INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE	65
OBRÁZEK 4.28 - ROZLOŽENÍ INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE V OBLASTI PROUDOVÉ DRÁHY	65

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na aplikaci numerických metod při návrhu a analýze elektrického odpojovače. Využití těchto metod nám poskytuje získání důležitých informací o funkci, bezpečnosti, spolehlivosti a také životnosti elektrického odpojovače.

První část této diplomové práce se zabývá seznámením s odpojovači, vysvětlením jejich funkce, základním rozdělení a konstrukčním řešením odpojovačů. Zmíněné jsou také normativní požadavky a typové zkoušky odpojovačů.

Druhá část práce se zabývá numerickými analýzami, které se uplatní při návrhu a analýze odpojovače. Nejdříve je zpracován rozbor tepelné analýzy, ve které jsem uvedl základní zákony tepla, metody šíření tepla a tepelné účinky proudu. Následuje analýza elektromagnetického pole zabývající se silovými účinky elektromagnetického pole a rozložení intenzity elektrického pole. Poslední z analýz popisuje vyšetřování mechanické pevnosti odpojovače.

V třetí části této práce se zabývám výpočtem parametrů předloženého elektrického odpojovače. Vypočtené hodnoty oteplení a mechanického namáhání pak následně aplikuji v další části této diplomové práce.

V poslední části se zabývám tvorbou modelu elektrického odpojovače a aplikací zvolených numerických analýz. Na elektrický odpojovač byly aplikovány tři druhy analýz v programu COMSOL. Tepelná, pevnostní a elektrostatická. Výsledky analýz jsou následně zhodnoceny.

1 Odpojovače

1.1 Definice

Odpojovače se řadí mezi spínací přístroje, které slouží ke spojení nebo rozpojení nezatíženého elektrického obvodu. Jejich funkcí je bezpečné izolační oddělení částí elektrické sítě. Nejčastěji při její rekonfiguraci a dále při potřebě provedení revize nebo opravy elektrického zařízení. Jsou navrhovány tak aby při jmenovitém napětí na živých částech a i při spínacích nebo atmosférických přepětí nedošlo k přeskoku napětí na neživou část. Pokud dojde k přepětí, jsou odpojovače navrženy tak aby velikost přeskokového napětí byla nižší mezi odpojovačem a zemí než mezi vzduchovou dráhou mezi kontakty. Nejčastěji se s nimi setkáme na hladině vysokého až zvláště vysokého napětí. Na hladině nízkého napětí je jejich použití méně časté. [1]

1.2 Rozdělení

Pro energetické účely se odpojovače vyrábějí a dělí podle různých parametrů. Například podle způsobu odpojení proudové dráhy, počtu pólů, umístění odpojovače a také podle druhu pohonu. [1]

Rozdělení odpojovačů podle provedení

- pantografový
- nožový
- vyklápěcí
- posuvný

Rozdělení podle počtu pólů

- jednopólový
- třípólový

Rozdělení podle použitého pohonu

- ruční
- elektromotor
- tlakovzdušný

Rozdělení podle umístění odpojovače

- přípojnicový
- vývodový

1.3 Konstrukce odpojovačů

Odpojovač se skládá z tří základních součástí. Nosné konstrukce, izolační podpěry a proudové dráhy.

1.3.1 Nosná konstrukce

Nosná konstrukce nese váhu celého odpojovače. Na nosné konstrukci je kromě izolátorů a proudové dráhy i většinou osazen jeho pohon. Konstrukce je pro venkovní použití vyrobena z oceli a uzemněna na dvou místech. [2]

1.3.2 Izolační podpěry

Oddělují od sebe části odpojovače s různým potenciálem. Nejčastěji jsou vyrobeny porcelánu, ale můžeme se setkat i jinými materiály. Počet izolačních podpěr a jejich rozměrů závisí na typu odpojovače a na jmenovitém napětí. Čím vyšší napětí, tím jsou větší rozměry odpojovače. Pro venkovní použití mají tvar stříšek, aby byla zajištěna izolační schopnost i při dešti. [2]

1.3.3 Proudová dráha

Je navržena na trvalý jmenovitý proud a na krátkodobé působení zkratového proudu. Musí tedy vydržet tepelné a silové účinky proudu. Proudová dráha je umístěna na potenciálu sítě a posazena na izolátorech oddělující proudovou část od uzemněné nosné konstrukce odpojovače. Nejčastěji je vyrobena z hliníku nebo mědi. [2]

1.4 Jmenovité charakteristické hodnoty

Jmenovité hodnoty odpojovačů se volí ze společných charakteristických hodnot definovaných normou ČSN EN 62771-1. [3]

1.4.1 Jmenovité napětí

Značí se U_r a toto napětí označuje nejvyšší napětí sítě, pro které může být odpojovač použit. Hodnoty jsou udány v normalizovaných řadách. [3]

1.4.2 Jmenovitá izolační hladina

Jmenovitá izolační hladina je určena výdržným napětím při přivedení atmosférického impulsu. Hodnoty jsou udány v tabulkách normy při normálních klimatických podmínkách. [3]

1.4.3 Jmenovitý kmitočet

Značí se f_r a normalizované hodnoty dány normou jsou 16 a 2/3 Hz, 25 Hz, 50 Hz a 60 Hz. V České republice se elektrizační soustava provozuje s frekvencí 50 Hz. [3]

1.4.4 Jmenovitý proud

Značí se I_r a je definován jako proud, který za normálních provozních podmínek musí být odpojovač schopen přenést. [3]

1.4.5 Oteplení

Teplota jakékoliv části odpojovače nesmí při maximální okolní teplotě +40 °C přesáhnout dovolené hodnoty oteplení uvedené v tabulce 3 normy ČSN EN 62271-1. [3]

1.4.6 Jmenovitý krátkodobý výdržný proud

Značí se I_k a vyjadřuje efektivní hodnotu proudu, kterou může přenášet odpojovač v zapnuté poloze za předepsaných podmínek výrobcem. [3]

1.4.7 Jmenovitý dynamický výdržný proud

Značí se I_p a definuje jak velkou hodnotu první půlvlny zkratového proudu je schopen odpojovač v zapnuté poloze přenést za předepsaných podmínek výrobcem. Tato hodnota je definována velikostí stejnosměrné časové konstanty 45 ms odpovídající 2,5 násobku jmenovitého krátkodobého výdržného proudu. [3]

1.4.8 Jmenovitá doba zkratu

Značí se t_k a označuje dobu po kterou je odpojovač schopen přenášet proud I_k . Normalizovaná doba zkratu je 1s, přičemž je možné volit kratší nebo delší dobu. [3]

1.5 Pracovní podmínky odpojovačů

Tyto podmínky jsou definovány normou ČSN EN 62771-1 pro vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení. Pracovní podmínky se obecně dělí na normální a zvláštní. [3]

1.5.1 Normální podmínky odpojovačů vnitřního provedení

- Průměr denní teploty okolního vzduchu nesmí za 24 hodin překročit 35 °C a okolní teplota nesmí překročit +40 °C. Nejnižší hodnota okolního vzduchu může dosahovat až -25 °C.
- Působení slunečního záření se neuvažuje.
- Odpojovač je instalován do maximální nadmořské výšky 1000 m.
- V okolí odpojovače je minimální znečištění vzduchu. Bez upřesnění zákazníka výrobce předpokládá, že vzduch neobsahuje kouř, prach nebo korozivní plyny.
- Průměrná relativní vlhkost vzduchu nesmí přesáhnout 95 % po dobu 24 hodin a po dobu jednoho měsíce 90 %, zároveň průměrná hodnota tlaku vodní páry nesmí přesáhnout 2,2 kPa po dobu 24 hodin a po dobu jednoho měsíce 1,8 kPa. [3]

1.5.2 Normální podmínky odpojovačů venkovního provedení

- Průměr denní teploty okolního vzduchu nesmí za 24 hodin překročit 35 °C a okolní teplota nesmí překročit +40 °C. Nejnižší hodnota okolního vzduchu může dosahovat až -40 °C.
- Působení slunečního záření se uvažuje s hodnotou 1000 W·m⁻²
- Odpojovač je instalován do maximální nadmořské výšky 1000 m.
- V okolí odpojovače se předpokládá znečištění vzduchu prachem, kouřem nebo korozivními plyny.
- Na odpojovači je povolena maximální tloušťka ledu nebo námrazy do 20 mm
- Tlak způsobený rychlostí větru nesmí překročit 700 Pa
- Vliv deště nebo kondenzace na odpojovač se uvažuje [3]

1.5.3 Zvláštní podmínky odpojovačů

Zvláštní podmínky nabývají platnosti, pokud se odpojovač provozuje v jiných než normálních podmínkách definovaných výše. Mezi základní podmínky se řadí korekce nadmořské výšky pro odpojovače umístěné v nadmořské výšce nad 1000 m, dále pak stupeň znečištění, teplota, vlhkost vzduchu, rychlost větru a také vibrace. [3]

1.6 Typové zkoušky

Typové zkoušky mají za úkol odzkoušet dodaný odpojovač, zda jeho vlastnosti odpovídají požadavkům. Testuje se na maximálně čtyřech kusech odpojovačů, pokud není stanoveno jinak normou IEC. Všechny dodané odpojovače na typové zkoušky musí být plně smontovány a funkční. [3]

1.6.1 Zkoušky elektrické pevnosti izolace

Zkouška elektrické pevnosti izolace se provádí za normálních klimatických podmínek. Korekční činitel K_t se uvažuje, pokud je vnější izolace odpojovače na volném vzduchu. Pro venkovní provedení se odpojovač musí podrobit výdržnou zkouškou za deště. Před zkouškou musí být povrch izolačních částí očištěn. Odpojovač se pak smontuje do minimální výšky stanovenou výrobcem. Odpojovače se zkouší na střídavé výdržné napětí a zkoušky impulzním napětím. První ze zkoušek je považována za úspěšnou pokud nedojde k žádnému průraznému výboji. Kdyby se za deště objevil průrazný výboj tak v případě samostatně obnovující izolace se zkouška opakuje. Druhá ze zkoušek se provádí sérií 15 zkoušek přiložením impulsního výdržného napětí na část odpojovače a během jedné série nesmí dojít k více než dvěma výbojům. [3]

1.6.2 Zkouška rádiového rušení

Zkouška rádiového rušení se řadí mezi zkoušky elektromagnetické kompatibility. Kvůli nízkému vlivu rádiového rušení se zkouška provádí na odpojovačích se jmenovitým napětím 123 kV a vyšší. Odpojovač je před zkouškou očištěn a jeho normálně uzemněné části se uzemní. Zkušební napětí se pak přikládá dvěma způsoby. První způsob je přiložení zkušebního napětí mezi svorku a uzemněnou kostru v zapnuté poloze odpojovače. Druhý způsob přiložení zkušebního napětí se provádí ve vypnuté poloze odpojovače a napětí se přivádí mezi svorku a ostatní svorky připojené na uzemněnou kostru. Přiložené napětí je o velikosti $1,1 \cdot U_r / \sqrt{3}$, po dané době 5 minut se jeho velikost postupně sníží na $0,3 \cdot U_r / \sqrt{3}$ a poté opětovně zvýší na původní hodnotu a opět poklesne na $0,3 \cdot U_r / \sqrt{3}$. Tento postup nám získá křivku rádiového rušení. Dovolená maximální hodnota rušení je $2500 \mu V$. [3]

1.6.3 Měření elektrického odporu

Měření se provádí celkem dvakrát. Před zkouškou oteplení a po ní. Cílem této zkoušky je pomocí stejnosměrného proudu změřit úbytek napětí nebo elektrický odpor pólu. Do odpojovače se přivede proud I o velikost $I > 50A$ a zároveň $I < I_r$. Naměřené hodnoty odporů se mezi těmito dvěma zkouškami nesmí lišit o více než 20 %. [3]

1.6.4 Zkoušky oteplení

Zkoušky oteplení se provádějí v uzavřené místnosti na smontovaných odpojovačích. V okolí odpojovače nesmí docházet k proudění vzduchu. Přípustné je pouze vzniklé proudění teplem zkoušeného odpojovače. Pokud je k odpojovači provedeno dočasné připojení nějakého zařízení je potřeba zajistit, aby nedocházelo k ochlazení nebo oteplení přes toto připojení. Zkouška se provádí při jmenovitém proudu sinusového průběhu do doby, než se teplota odpojovače ustálí. O ustáleném stavu se hovoří, pokud za 1 hodinu nevzroste teplota o 1 K. K měření se používají teploměry nebo termoelektrické články a pro měření cívek se používá metoda měření teplotní změny elektrického odporu. Pokud oteplení žádné části odpojovače nepřesáhne dovolené hodnoty daného materiálu, pak zařízení vyhovuje. [3]

1.6.5 Zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem

Při této zkoušce se odpojovač uvede čistý do sepnuté polohy a na rám se nasadí motor. Odpojovač se zkouší proudem, jehož střídavá složka se rovná I_k a velikost nesmí být nižší než velikost jmenovitého dynamického výdržného proudu I_p . Doba působení zkušebním proudem je stejná jako jmenovitá doba zkratu t_k . Při krátkodobé zkoušce výdržným proudem se neuvažuje omezení dána oteplením materiálů. Odpojovač po provedené zkoušce nesmí být významně poškozen. Musí tedy být schopen normálního provozu při jmenovitém proudu, odolat zkouškám elektrické pevnosti izolace a oteplení částí nesmí přesáhnout hodnoty uvedené v tabulce 3 normy ČSN EN 62271-1. [3]

2 Numerické analýzy odpojovače

2.1 Možnost uplatnění numerických analýz u odpojovačů

V předchozí kapitole jsme si shrnuli parametry a normativní požadavky na provozní vlastnosti, které jsou stanoveny v typové zkoušce. Z těchto požadavků na typové zkoušky lze pak následně vyvodit, jaké numerické analýzy se mohou u odpojovačů uplatnit. Vybrané numerické metody lze uplatnit při návrhu, inovaci a také k rozboru zjištěných problematických míst nebo k analýze poruch. Z předchozí kapitoly se především jedná o:

- Oteplení odpojovače
- Silové účinky proudu
- Elektrickou pevnost
- Mechanické vlastnosti
- EMC

Matematický popis těchto analýz obvykle vede na soustavu parciálních diferenciálních rovnic. Při znalostech fyzikálních principů a jevů jsme schopni si v některých případech úlohy zjednodušit a můžeme docílit popisu obyčejnými sledovanými jevy diferenciálními rovnicemi nebo i nalézt analytické řešení. Pro numerický výpočet parciálních diferenciálních rovnic se používá metoda konečných diferencí, metoda konečných prvků nebo metoda konečných objemů. Metody jsou založeny na diskretizaci dané oblasti, na kterou jsou následně aplikovány odpovídající okrajové podmínky. Tyto metody jsou součástí výpočetní programů pro řešení fyzikálních polí jako je COMSOL, ANSYS nebo Agros2D.

2.2 Tepelná analýza

Tepelná analýza se zabývá tepelnými účinky proudu na odpojovač. Při návrhu odpojovače z hlediska bezpečnosti, spolehlivosti a také životnosti je důležité sledovat oteplení proudové dráhy. Velikost oteplení je u řady zařízení limitující faktor, který pokud by nebyl dodržen, mohlo by dojít například k degradaci vodičů, izolací a vzniku poruchových stavů. V této kapitole si uvedeme termodynamické zákony, druhy šíření tepla, tepelné účinky proudu a metodu tepelné sítě.

2.2.1 Termodynamické zákony

1. věta termodynamiky

vyjadřuje také zákon zachování energie termodynamické soustavy. Slovně vyjadřuje, že přírůstek vnitřní energie U je roven dodávanému teplu Q a zároveň snížen o velikost vykonané práce A . V diferenciálním tvaru vypadá rovnice takto

$$dU = dQ - dA \quad (2.1)$$

Uvažujeme jak kladné tak i záporné hodnoty těchto veličin. [4]

2. věta termodynamiky

Formulace této věty se liší, ale význam zůstává stejný. Existuje Clausiova, Thomsonova a Planckova, Thomsonova a Ostwaldoa a Carnotova formulace druhé termodynamické věty. A právě Clausiova formulace, ve které definoval, že samovolný přechod tepla mezi dvěma tělesy je možný pouze z teplejšího na studenější, je obecně nejnámější. [5]

3. věta termodynamiky

Třetí věta termodynamiky souvisí s teplotou absolutní nuly. Ta je definována hodnotou 0 K a v okolí této teploty vlastnosti, které původně závisely na teplotě, přestávají záviset a stávají se konstantami. Teploty absolutní nuly není možné dosáhnout ale pouze se přiblížit. [6]

2.2.2 Šíření tepla

Základní mechanismy, pomocí kterých se teplo šíří z předmětu nebo prostředí teplejšího na studenější jsou tyto tři:

- Vedení (kondukce)
- Proudění (konvekce)
- Sálání (radiace)

Šíření tepla vedením je způsobeno kmitavým pohybem atomů a elektronů. V části, kde je teplota vyšší, je vyšší také energie těchto částic a jejich kmity dosahují vyšší amplitudy, než částice v chladnější části. Během srážek mezi těmito částicemi dochází k předávání energie. Matematický popis šíření tepla vedením je velmi složitý, proto se využívá několika zjednodušujících předpokladů.

- Teplotní pole je spojitě a skalární

- Prostředí, ve kterém se vyšetřuje šíření tepla, je stejnorodé

Jednou ze základních rovnic pro řešení vedení tepla v obecném tvaru je rovnice Fourier-Kirchhofova

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) = a \cdot \Delta \vartheta \quad (2.2)$$

kde $\Delta \vartheta$ je Laplaceův diferenciální operátor teploty, a ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) je součinitel teplotní vodivosti vypočítaný dle

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (2.3)$$

obsahující tři fyzikální konstanty. Součinitele tepelné vodivosti λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), objemovou hmotnost ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a měrnou tepelnou kapacitu c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Šíření tepla prouděním se uplatňuje pouze u tekutin. Máme-li předmět o vyšší teplotě než je tekutina, začne se tato tekutina vlivem předmětu ohřívat a roztahovat. Zbytek tekutiny, který není ve styku s předmětem, je chladnější a její hustota je vyšší než teplejší část tekutiny. Teplá část tekutiny tedy stoupá vzhůru a na její místo se dostává chladnější část a proces se opakuje. Malá část tekutiny, která je ve styku na povrchu s předmětem, se neúčastní šíření tepla prouděním, ale uplatňuje se zde šíření tepla vedením. Šíření tepla prouděním můžeme rozdělit do dvou základních kategorií dle způsobu vzniku nebo podle způsobu přenosu. Vznik může být přirozený, vynucený nebo smíšený. Přenos může být laminární nebo turbulentní. Laminární proudění je takové, ve kterém se tekutina pohybuje kolem tělesa. Turbulentní proudění je takové, ve kterém vznikají víry a které napomáhají k intenzivnějšímu přenosu tepla vlivem většího promíchávání.

Pro jednoduché výpočty předávání tepla prouděním můžeme použít Newtonův vztah

$$\Phi = \alpha_k \cdot (T_1' - T_1) \cdot S \quad (2.4)$$

kde α_k ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je součinitel přestupu tepla konvekcí, T_1' (K) je teplota povrchu, T_1 (K) je teplota prostředí a S (m^2) je plocha povrchu. Součinitel přestupu tepla prouděním je velmi složité určit, závisí na mnoha faktorech. Patří do nich například rozměry, rozdíl teplot, rychlost proudění a další. Při vysoké rychlosti proudění mohou vznikat víry a tak turbulentní proudění.

K rozlišení zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění slouží bezrozměrné Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{v_k \cdot h}{\nu} \quad (2.5)$$

kde v_k ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) je rychlost pohybu částic, h (m) je rozměr tělesa a ν ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) je kinematická viskozita. Pomocí Nusseltova čísla můžeme vypočítat součinitel přestupu tepla konvekcí

$$Nu = \frac{a_k \cdot h}{\lambda} \quad (2.6)$$

Pro zjištění Nusseltova čísla je dále potřeba znát Grasshoffovo a Prandtlovo číslo

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta\vartheta \cdot h^3}{\nu^2} \quad (2.7)$$

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_j}{\lambda} \quad (2.8)$$

kde g ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) je tíhové zrychlení, β (K^{-1}) je teplotní součinitel objemové roztažnosti, 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. Nusseltovo číslo je závislé na druhu proudění, zdali se jedná o přirozené nebo o nucené. Pro přirozené proudění uvažujeme pouze Grasshoffovo a Prandtlovo číslo. Pro nucené proudění uvažujeme Reynoldsovo číslo a Prandtlovo číslo.

$$Nu = f(Gr \cdot Pr) \quad (2.9)$$

$$Nu = f(Pr \cdot Re) \quad (2.10)$$

Pro složitější výpočty se používá počítačová mechanika tekutin. Znamější je její anglický název Computational Fluid Dynamics, zkráceně CFD. Pro tyto výpočty se vychází z fyzikálních vlastností tekutin popsané soustavou nelineárních parciálních diferenciálních rovnic. Rovnice přenosu energie a přenosu hybnosti se označují jako N-S rovnice (Navier-Stokes rovnice). Pokud při výpočtu uvažujeme i fluktuaci tlaku a rychlosti dostaneme rovnice

označené jako RANS rovnice (Reynolds-Average Navier-Stokes rovnice). Pro výpočet N-S rovnic se používá například metoda konečných objemů.

Přenos tepla radiací je přenos pomocí elektromagnetických vln. Elektromagnetické vlnění rozdělujeme do skupin o různých vlnových délkách. Od nejmenší po největší vlnovou délku to jsou paprsky gama, paprsky X, ultrafialové záření, viditelné záření, infračervené záření a mikrovlny. Pro šíření tepla má největší význam infračervené záření. Těleso o teplotě větší než absolutní nula vyzařuje v průzračném prostředí svým povrchem tepelnou energii přímočaře všemi směry. Tato energie se pak při dopadu na těleso odrazí, projde tělesem nebo se pohltí a přemění na teplo. Pokud se veškerá energie dopadající na povrch tělesa odrazí, nazýváme toto těleso jako absolutně bílé. A opačně, pokud se veškerá energie dopadající na povrch tělesa pohltí, označujeme toto těleso jako absolutně černé. Ve skutečnosti jsou povrchy označovány jako šedé. Pomocí Kirchhofova zákona

$$\frac{E_{\xi}}{A_{\xi}} = f(\theta) \quad (2.11)$$

můžeme určit poměr mezi úhrnnou zářivostí E_{ξ} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) a pohltivostí A_{ξ} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) v závislosti na absolutní teplotě tělesa θ (K). Z tohoto zákona vyplývá, že černé předměty nejlépe emitují záření. Při zvyšování absolutní teploty tělesa se zvyšuje i úhrnná zářivost E_{ξ} a to na základě Stefan-Boltzmanova zákona

$$E_{\xi} = \sigma_{\xi} \cdot \theta^4 \quad (2.12)$$

kde $\sigma_{\xi} = 5,67 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) je Stefan-Boltzmanova konstanta. Se zvyšující teplotou také dochází k posouvání maxima záření ke kratším vlnovým délkám popsaného Wienovým posunovacím zákonem

$$\lambda_{max} = \frac{b}{\theta} \quad (2.13)$$

kde $b = 2,892 \cdot 10^{-3}$ (m·K) je Wienova konstanta. [7] [8]

2.2.3 Tepelné účinky proudu

Průchodem elektrického proudu I vodičem s odporem R vznikají tepelné ztráty Q v každém okamžiku času dt .

$$dQ = R \cdot I^2 \cdot dt \quad (2.14)$$

Z předchozí kapitoly o způsobech šíření tepla víme, že se tyto tepelné ztráty odvádí do okolí vodiče nebo zvyšují jeho vnitřní energii. Detailní popis šíření tepla pak vede na soustavu parciálních diferenciálních rovnic, jejichž řešení je výpočetně a časově velmi náročné. Proto se pro praktické analýzy uvažují zjednodušující předpoklady, které umožňují jednodušší a časově méně náročné řešení. Jedním z takových zjednodušujících předpokladů může být například využití součinitele přestupu tepla. Tento součinitel můžeme vypočítat nebo na základě zkušenosti zvolit a tím úlohu omezit fakticky jen na vedení tepla.

V případě uvedeném v následující rovnici se část tepla (první člen na pravé straně) se odvede do okolí a část (druhý člen na pravé straně) zůstane ve vodiči a zvyšuje jeho vnitřní energii a teplotu.

$$R \cdot I^2 \cdot dt = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot dt + c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (2.15)$$

kde α_0 je součinitel přestupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), A je ochlazovací plocha (m^2), $\Delta\vartheta$ je rozdíl mezi teplotou tělesa a okolím (K), c je objemová tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) a V (m^3) je objem tělesa. V obecném případě kdy v této rovnici obsahuje časově proměnné veličiny je pro řešení nutné použití složitějších numerických metod. Za předpokladu že uvažujeme odpor a proud v této rovnici za konstantu můžeme tuto rovnici vyřešit pomocí metody separace proměnných.

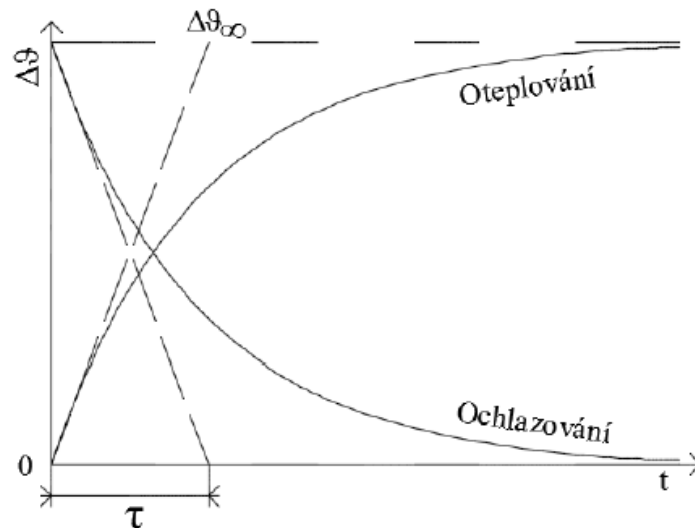
Řešením této rovnice pomocí separace proměnných, určení integrační konstanty a zbavením se logaritmů dostaneme předpis pro okamžitou rovnici oteplení.

$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \cdot \left[1 - e \cdot \left(\frac{\alpha_0 \cdot A \cdot t}{c \cdot V} \right) \right] = \Delta\vartheta_\infty \cdot \left[1 - e \cdot \left(-\frac{t}{\tau} \right) \right] \quad (2.16)$$

$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \quad (2.17)$$

$$\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \quad (2.18)$$

Z výsledných rovnic je patrné že průběh oteplení nebo ochlazení má exponenciální charakter.



Obrázek 2.1 - Oteplovací a ochlazovací charakteristika [1]

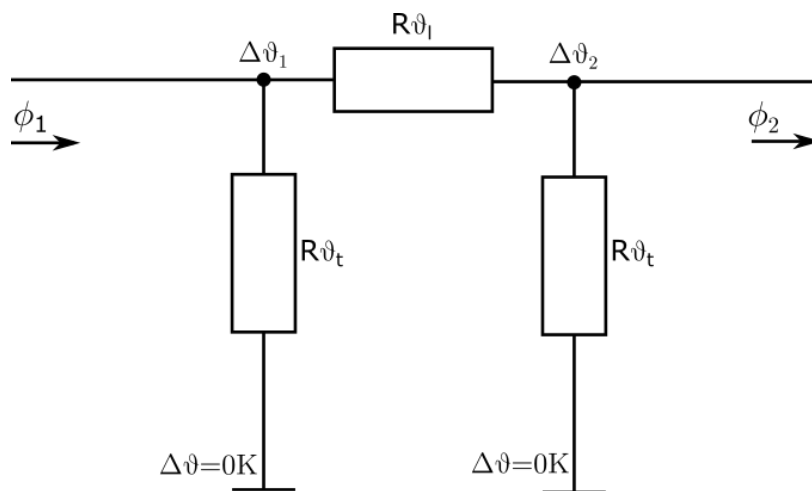
Analýza tepelného zatížení jednotlivých částí zařízení je z pohledu návrhu velmi důležitá. Základním vyšetřovaným stavem je zatížení zařízení jmenovitým proudem. Z poruchových stavů a z požadavků na typové zkoušky se dále zařízení vyšetřuje také na krátkodobé působení zkratového proudu. Vyšetřením oteplení zařízení při těchto stavech jsme případně schopni odhalit kritická místa. Jmenovitý proud je takový proud, který může zařízením procházet trvale bez překročení teplotních limitů částí zařízení. Při chybném návrhu tepelně zařízení přetěžujeme a mohlo by dojít k úplné tepelné destrukci nebo k rapidní snížení životnosti zařízení. [1] [2]

2.2.4 Metoda tepelné sítě

Metoda tepelné sítě využívá myšlenky, že každý elektrický přístroj lze rozdělit na jednotlivé části respektující jejich fyzikální vlastnosti a v určitých částech nám vzniká teplo. Tyto části považujeme za tepelné zdroje a části, ve kterých nevzniká teplo, ale jsou součástí elektrického přístroje, označujeme za tepelné odpory. Teplo se následně šíří přes ostatní části elektrického přístroje k částem, které jsou na rozhraní mezi částí elektrického přístroje a

okolního vzduchu. Výpočtově lze metodu tepelné sítě označit za analogii k řešení elektrických obvodů. Jednotlivé tepelné zdroje a odpory seřadíme a vytvoříme odpovídající tepelnou síť elektrického přístroje. Následně dostáváme řešení oteplení jednotlivých uzlů sítě. Uzly jsou body ve schématu, kde jsou spojena jednotlivá schémata a představují koncová místa mezi jednotlivými úseky. Při výpočtech více pólových přístrojů se často uvažuje střední fáze s tvarem jednořadové sítě.

Náhradní schéma pro bezeztrátovou tyč, o konstantním průřezu S a délce l kterou neprotéká žádný proud je v podobě π článku na následujícím obrázku



Obrázek 2.2 - Náhradní schéma tyče beze ztrát [1]

Pak se odpor podélné větve vypočítá podle rovnice

$$R_{\theta l} = \frac{\sinh(\beta \cdot l)}{\delta} \quad (2.19)$$

a odpor příčných větví dle

$$R_{\theta t} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta \cdot l}{2}\right)} \quad (2.20)$$

kde $R_{\theta l}$ ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) je odpor podélné větve náhradního π článku, β (m^{-1}) a δ ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$) jsou výpočetní činitele vypočítané podle následujících vztahů

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_{On} \cdot O}{\lambda \cdot S}} \quad (2.21)$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_{On} \cdot O \cdot \lambda \cdot S} \quad (2.22)$$

kde λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je součinitel tepelné vodivosti, O (m) představuje odvod povrchu vodiče, S (m^2) je průřez vodiče a α_{On} je náhradní součinitel přestupu tepla.

Pro tepelně krátkou tyč kde platí že argument hyperbolických funkcí ve vzorcích (2.6) a (2.7) $\beta l \ll 1$ (přibližně hodnota menší než 0,1) a tedy $\sinh \beta l \approx \tanh \beta l \approx \beta l$ můžeme rovnice přepsat do následujícího tvaru

$$R_{\theta l} \approx \frac{\beta \cdot l}{\delta} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} \quad (2.23)$$

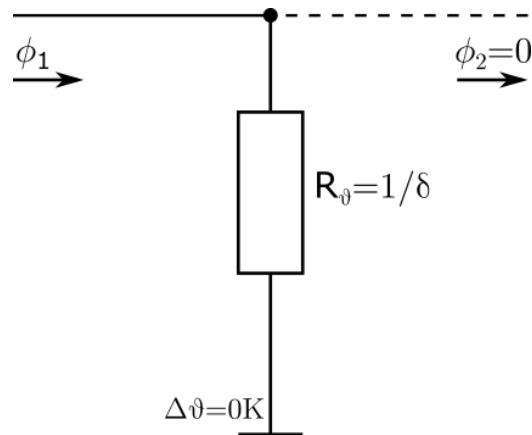
$$R_{\theta t} \approx \frac{2}{\delta \cdot \beta \cdot l} = \frac{2}{\alpha_{On} \cdot O \cdot l} = \frac{2}{\alpha_{On} \cdot A_V} \quad (2.24)$$

Pro opačný případ a to tepelně dlouhé tyče platí, že argument hyperbolických funkcí $\beta l \gg 1$ (přibližně hodnota větší než 10) platí $\sinh \beta l \approx \sinh \infty = \infty$; $\tanh \beta l \approx \tanh \infty = 1$. Pak mají rovnice (2.6) a (2.7) pro odpory náhradního schématu tento tvar

$$R_{\theta l} \rightarrow \infty \quad (2.25)$$

$$R_{\theta t} \approx \frac{1}{\delta} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_{On} \cdot O \cdot \lambda \cdot S}} \quad (2.26)$$

Tím nám ze schématu vypadne podélná větev, protože její odpor se blíží k ∞ a zůstane nám pouze vstupní příčný odpor.



Obrázek 2.3 - Náhradní schéma tepelně dlouhé tyče [1]

Schéma tyče pro nekonztantní průřez se liší pouze tím, že podle strmosti změny průřezu se tyč dělí na více celků a ty jsou pak spojovány do tepelné sítě v podobě π článku.

Dalším prvkem pro tepelnou síť jsou chladicí tyče, v nichž se veškeré přivedené teplo se v chladicí tyči odvede do okolí. Respektují tak součásti mimo proudovou dráhu odpojovače odvádějící teplo, například žebra. Náhradní schéma je tvořeno příčným tepelným odporem, jehož velikost se vypočítá podle

$$R_{\vartheta ch} \approx \frac{1}{\delta \cdot \tanh(\beta \cdot l)} \quad (2.27)$$

Při uvažování tyče se ztrátami se schéma oproti beze ztrátové tyči příliš neliší. Opět má podobu π článku ale oteplení na vnějších příčných odporech není nulové a vypočítá se vztahem

$$\Delta\vartheta_{\infty} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{on} \cdot O \cdot l} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{on} \cdot A_v} \quad (2.28)$$

Nenulové oteplení na vnějších příčných odporech vyjadřuje teplotní úbytek na tepelných odporech. Pokud je $\Delta\vartheta_{\infty} > \Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2$ pak teplo do příčných odporů nevstupuje, ale naopak teplo příčné odpory dodávají do podélné větve. Tento jev nastává, pokud není dostatečné vlastní chlazení. Teplo se následně šíří do dalších článků, ve kterých se odvede do okolí. [1] [2] [9]

2.3 Analýzy elektromagnetického pole a jeho účinků

2.3.1 Síly v magnetickém poli

Elektrodynamické analýzy jsou velmi důležité z pohledu návrhu odpojovače. Ty musejí být navrhovány tak aby vydržely působení sil při normálním provozu a zvláště při zkratových zkouškách a havarijních stavech v síti. Elektromagnetické síly jsou vyvolány průchodem proudu proudovou dráhou elektrického přístroje. Tyto síly způsobují mechanické namáhání a jejich velikost závisí na velikosti protékaného proudu a intenzity magnetického pole v blízkosti vodiče.

Pro analýzu elektromagnetického pole a jeho účinků vycházíme z diferenciální podoby Maxwellových rovnic.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.29)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.30)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (2.31)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.32)$$

kde \mathbf{H} je vektor intenzity magnetického pole, \mathbf{J} je proudová hustota, \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole, \mathbf{D} je vektor elektrické indukce, \mathbf{B} je vektor magnetické indukce, ρ je objemová hustota náboje a člen $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ označuje hustotu posuvného proudu. Řešení těchto rovnic vede na soustavu diferenciálních soustav rovnic. Ty se následně dají vypočítat například pomocí metody konečných prvků nebo objemů.

Pro výpočet sil můžeme vyjít z Lorentzova síly, která popisuje jak na bodový náboj Q v magnetickém poli \mathbf{B} pohybující se rychlostí \mathbf{v} působí síla

$$\mathbf{F}_m = Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.33)$$

Pokud do tohoto pole umístíme masivní vodič o objemu V ve kterém protéká proud o hustotě J , působí na tento vodič pak síla

$$\mathbf{F}_m = \int_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \quad (2.34)$$

na tenký vodič pak působí síla

$$\mathbf{F}_m = I \int_l d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (2.35)$$

Obecně je tato síla popsána vztahem vztaženým na element délky tenkého vodiče jako

$$d\mathbf{F} = I l_1 d\mathbf{l} \times \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.36)$$

kde I (A) je proud procházející vodičem, l_1 (m) vyjadřuje jednotkový vektor ve směru vodiče, $d\mathbf{l}$ je element vodiče, μ_0 ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$) je permeabilita vakua, H ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$) je intenzita magnetického pole a $d\mathbf{F}$ (N) vyjadřuje výslednou působící sílu.

Častěji se setkáme s případem, kdy máme několik vodičů vedle sebe. Každý z nich vytváří sílu, která ovlivňuje další vodiče. Nejjednodušším případem jsou dva rovnoběžné vodiče. Síla působící na jeden vodič je pak dána rovnicí

$$d\mathbf{F}_2 = i_2 l_2 d\mathbf{l}_2 \times \mathbf{B}_1 \quad (2.37)$$

kde $\mathbf{B}_1 = \mu_0 \mathbf{H}_1$ (T) vyjadřuje vektor magnetické indukce vyvolané proudem i_1 .

Při průchodu střídavého proudu vzniká síla, která je závislá nejen na velikosti procházeného proudu ale také na jeho kmitočtu. Dosazením harmonického průběhu proudů posunutých o úhel φ (2.38) a (2.39) do rovnice (2.36) dostaneme rovnici (2.40) pro sílu střídavého proudu

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin \omega t \quad (2.38)$$

$$i_2 = \sqrt{2} I_2 \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.39)$$

$$F = 4I_1 I_2 \frac{l_1}{a} \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) * 10^{-7} \quad (2.40)$$

úpravou získáme rovnici obsahující časově nezávislou a závislou složku síly

$$F = 2I_1 I_2 \frac{l_1}{a} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] * 10^{-7} \quad (2.41)$$

Odpojovače se dimenzují nejen proti síle způsobené průchodem jmenovitého proudu ale také proti síle zkratového proudu. Během zkratového proudu se vytvoří stejnosměrná složka o velikosti

$$i = \sqrt{2} I_\infty (e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos \omega t) \quad (2.42)$$

kde I_∞ (A) je ustálená hodnota proudu a τ je časová konstanta přechodné složky respektující tlumení obvodu. Pokud uvažujeme, že oběma vodiči prochází stejný proud, dosazením stejnosměrné složky do rovnice (2.40) získáme velikost síly způsobené zkratovým proudem vztahem

$$F = 4I^2 \frac{l_1}{a} (e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos \omega t)^2 * 10^{-7} \quad (2.43)$$

Při výpočtu sil lze také vycházet z energie magnetického pole. Pokud máme lineární prostředí, ve kterém se nachází n smyček proudů I_n můžeme vypočítat energii soustavy W_m pomocí toků ϕ_i spřažených přes tyto smyčky. Tok ϕ_i prochází plochou S_i a s každým posunem i -té smyčky do nové plochy se vykoná mechanická práce

$$dA = F dx \quad (2.44)$$

a dosazením vztahu pro výpočet Lorentzovy síly (2.50) do této rovnice získáme

$$dA_i = F_i dx = I_i \oint_{c_i} [dl_i \times B] dx = I_i d\phi_i \quad (2.45)$$

Jsou-li tyto smyčkové proudy konstantní, můžeme napsat rovnici pro výpočet energie jako

$$dW_m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_i d\phi_i \quad (2.46)$$

Z této rovnice dosazením za výraz $I_i d\phi_i$ z rovnice (2.45) získáme vztah

$$A_v = 2 dW_m \quad (2.47)$$

a protože v soustavě platí zákon zachování energie

$$dA = dA_v - dW_m \quad (2.48)$$

kde dW_m je změna energie magnetické pole a dA_v vyjadřuje energii vnějších zdrojů. Tak po dosazení rovnice (2.47) do (2.48) a výslednou úpravou získáme vztah pro sílu v soustavě ve které je proud I konstatní

$$F_x = \frac{dW_m}{dx} \quad (2.49)$$

a pro soustavu s konstantním tokem ϕ o které se také hovoří jako o izolované soustavě a ve které je $dA_v = 0$. [1] [10]

$$F_x = -\frac{dW_m}{dx} \quad (2.50)$$

Další možností je výpočet sil pomocí Maxwellova magnetického tenzoru. Tenzor pnutí je vyjádřen pomocí prostředí μ a symetrickou maticí popisující pole o intenzitě $H(H_x, H_y, H_z)$

$$T = \frac{\mu}{2} \begin{bmatrix} H_x^2 + H_y^2 + H_z^2 & 2H_xH_y & 2H_xH_z \\ \cdot & H_y^2 + H_x^2 + H_z^2 & 2H_yH_z \\ \cdot & \cdot & H_z^2 + H_x^2 + H_y^2 \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

z tenzoru pnutí je pak možné zjistit objemovou hustotu síly f_m

$$f_m = \text{div } T \quad (2.52)$$

celková síla F_m která působí na těleso o objemu V umístěného v magnetickém poli se následně vypočítá dle vztahu

$$F_m = \int_V f_m dV \quad (2.53)$$

dosazením rovnice (2.52) do této rovnice a použitím Gaussovy věty získáme závislost síly na tenzoru pnutí

$$F_m = \int_V f_m dV = \int_V \operatorname{div} T dV = \oint_{\Gamma} f_m d\Gamma \quad (2.54)$$

kde Γ představuje uzavřenou oblast kolem tělesa. [1] [2] [10]

2.3.2 Elektrostatické pole

Při vyšetřování elektrostatického pole vycházíme z druhé a třetí Maxwellovy rovnice, které v diferenciálním tvaru mají tento tvar:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0 \quad (2.55)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (2.56)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.57)$$

Získání řešení \mathbf{E} a \mathbf{D} pomocí těchto rovnic lze pouze ve specifických případech. Proto se zavedla skalární veličina elektrický potenciál, která slouží k nepřímému řešení. Pomocí elektrického potenciálu je výpočet analyticky i numericky dobře řešitelný. Elektrický potenciál φ (V) je dán vztahem:

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad}\varphi \quad (2.58)$$

Při řešení pak postupujeme nejdříve odvozením φ z rovnice (2.56), dosazením výsledku do rovnice (2.58) a výsledným získáním \mathbf{E} . Získání rozložení elektrické intenzity nám umožňuje stanovit kritická místa s nejvyšší intenzitou, která by mohla způsobit překročení elektrické pevnosti daného materiálu. [10]

2.4 Pevnostní analýza

Pevnostní analýza je jednou z klíčových analýz při modelování a vyvíjení elektrického odpojovače. Je důležité navrhnout jeho součásti tak aby odolaly provoznímu mechanickému namáhání. U odpojovače působí namáhání ohybem, krutem nebo tahem. Vlivem vlastní

hmotnosti ramen a ostatních součástí umístěných na nich působí svisle gravitační síla a namáhá tak odpojovač na ohyb. Dále na odpojovač může působit síla větru, tíha námrazy a elektrodynamické síly. Při vyšetřování se vychází ze zvolených materiálů a jejich limitních parametrů, které nesmí být překročeny.

Při výpočtu pružnosti a pevnosti v tahu vycházíme z rovnice popisující rovnováhu vnějších a vnitřních účinků

$$\sum_i F_{ix} = 0 : F - N = 0 \quad (2.59)$$

$$\sum_i F_{iy} = 0 : T_y = 0 \quad (2.60)$$

$$\sum_i F_{iz} = 0 : T_z = 0 \quad (2.61)$$

kde N (N) je normálová složka síly a T_y, T_z jsou smykové složky síly. Pomocí normálové síly působící rovnoměrně na průřez prutu A (m²) lze pomocí následujícího vzorce určit velikost normálového napětí σ (MPa)

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2.62)$$

vyjádřit normálové napětí lze také pomocí Hookova zákona pro jednoosý případ

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.63)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.64)$$

kde E (MPa) je Youngův modul pružnosti, ε (-) je poměrné prodloužení vyjádřené pomocí absolutní změny délky prutu Δl (m) a původní délky prutu l_0 (m). Při výpočtech je potřeba uvažovat i vliv teploty působící na prut.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \cdot \Delta T \quad (2.65)$$

kde α (K⁻¹) je součinitel teplotní délkové roztažnosti a ΔT (K⁻¹) je změna teploty. Dosazením rovnic (2.63) a (2.64) do rovnice (2.62) při $N = F$ získáme rovnici síly

$$F = \Delta l \cdot \frac{A \cdot E}{l_0} \quad (2.66)$$

Při vybírání materiálu patří mezi základní kritéria materiálová mez pevnosti a kluzu. Mez pevnosti definuje, jak velkou hodnotu napětí daný materiál vydrží, než dojde k jeho porušení a mez kluzu než dojde k jeho trvalé deformaci.

Dalším druhem namáhání prutu může být krut. Za předpokladu že moment působí na kruhový prut v rovině řezu, vniká v něm smykové napětí τ ve vzdálenosti ρ od osy popsané vztahem

$$\tau(\rho) = \frac{M_k}{J_p} \cdot \rho \quad (2.67)$$

kde M_k je krouticí moment a J_p polární moment průřezu. Pak lze zkrut určit pomocí modulu pružnosti ve smyku G jako

$$\vartheta(\rho) = \frac{M_k}{G \cdot J_p} \quad (2.68)$$

a celé natočení prutu v určité jeho délce l vyjádřit

$$\varphi(\rho) = \frac{M_k \cdot l}{G \cdot J_p} \cdot \rho \quad (2.69)$$

Při dimenzování je potřeba dodržet několik podmínek a to pevnostní podmínku:

$$|\tau| \leq \tau_D \quad (2.70)$$

Tuhostní vyjádřenou pomocí zkrutu:

$$|\vartheta| \leq \vartheta_D \quad (2.71)$$

A tuhostní vyjádřenou pomocí úhlu zkroucení:

$$|\varphi| \leq \varphi_D \quad (2.72)$$

Posledním druhem je namáhání na ohyb. Při ohybu uvažujeme, že prut (nosník) se ohýbá málo, má konstantní průřez, který je výrazně menší než jeho délka a je z homogenního materiálu. Velikost průhybu se určuje velikostí prohnutí střednice nosníku. Střednice označuje neutrální osu procházející těžištěm nosníku. Délku nosníku umístíme do osy x a průřez do osy y pak deformace nosníku v závislosti na poloměru křivosti $r(x)$ je

$$\varepsilon_x(x, y) = \frac{y}{r(x)} \quad (2.73)$$

Velikost normálového napětí

$$\sigma_x(x, y) = E \cdot \frac{y}{r(x)} \quad (2.74)$$

Velikost průhybu

$$v''(x) = -\frac{M_z(x)}{E \cdot J_z} \quad (2.75)$$

Při dimenzování je opět potřeba dodržet několik podmínek a to pevnostní podmínku:

$$|\sigma_x| \leq \sigma_D \quad (2.76)$$

Tuhostní vyjádřenou pomocí deformace:

$$|\varepsilon_x| \leq \varepsilon_D \quad (2.77)$$

A tuhostní vyjádřenou pomocí průhybu:

$$|v| \leq v_D \quad (2.78)$$

Nejčastěji se setkáváme s kombinovaným namáháním, které je tvořeno kombinacemi výše zmíněnými druhy namáhání. [11] [12] [13] [14]

3 Výpočet a konstrukční návrh modelu odpojovače

Výpočet základních parametrů horizontálního odpojovače a jeho základní konstrukční návrh byl proveden ze zadaných hodnot v tabulce. Konstrukce byla odvozena z reálné předlohy, který je v laboratoři katedry. Předmětem návrhu a výpočetních analýz byla pouze proudová dráha odpojovače bez podpěrných izolátorů. Proto se při výpočtech nebudu zabývat stanovením jejich parametrů. Zpracováno dle literatury [15] [16].

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

Tab. 3.1 Zadané parametry odpojovače

3.1 Izolační vzdálenost proti zemi a v odpojovací dráze

Při určení izolační vzdálenosti vycházíme ze zkušebních napětí daná normou. Pro hladinu 123 kV se zkouší odpojovač přiloženým spínacím impulzem 200/2000 μ s a atmosférickým impulzem 1,2/50 μ s. Pro určení izolační vzdálenosti se vychází z následujících vztahů popisující vzdálenost doskoku d a přeskokového napětí U_p :

1) Střídavé výdržné napětí

$$U_p = 14 + 0,316 \cdot d \text{ (kV; mm) pro } d = 300 \text{ až } 2500 \text{ mm} \quad (3.1)$$

$$U_p = 10,6 + 0,36 \cdot d \text{ (kV; mm) pro } d = 80 \text{ až } 1400 \text{ mm} \quad (3.2)$$

2) Atmosférický impuls 1,2/50 μ s

$$U_p = 45 + 0,57 \cdot d \text{ (kV; mm) pro } d \geq 300 \text{ mm} \quad (3.3)$$

$$U_p = 0,505 \cdot d \text{ (kV; mm) pro } d = 80 \text{ až } 1500 \text{ mm} \quad (3.4)$$

$$U_p = 148 + 545 \cdot d \text{ (kV; m) pro } d = 2000 \text{ až } 4000 \text{ mm} \quad (3.5)$$

Velikosti výdržných napětí jsou uvedeny v tabulce 3.1. Tyto hodnoty je potřeba ještě pomocí konstant převést na hodnotu přeskokových napětí. Konstanta pro střídavé výdržné napětí $k_{ps} = 1,15$ a konstanta pro atmosférický impuls se pohybuje $k_{pa} = 1,2 - 1,25$. Zvolil jsem $k_{pa} = 1,25$. Velikost přeskokových napětí je po dosažení konstant:

$$U_{c_1} = U_c \cdot k_{ps} = 230 \cdot 1,15 = 264,5 \text{ kV} \quad (3.6)$$

$$U_{p_1} = U_p \cdot k_{pa} = 550 \cdot 1,25 = 687,5 \text{ kV} \quad (3.7)$$

$$U_{c_2} = U_c \cdot k_{ps} = 265 \cdot 1,15 = 304,75 \text{ kV} \quad (3.8)$$

$$U_{p_2} = U_p \cdot k_{pa} = 630 \cdot 1,25 = 787,5 \text{ kV} \quad (3.9)$$

Úpravou rovnic (3.1) až (3.5) a dosažení těchto napětí získáme hodnoty izolačních vzdáleností proti zemi b

$$b_1 = \frac{U_{c_1} - 14}{0,316} = \frac{264,5 - 14}{0,316} = 792,72 \text{ mm} \quad (3.10)$$

$$b_2 = \frac{U_{c_1} - 10,6}{0,36} = \frac{264,5 - 10,6}{0,36} = 705,28 \text{ mm} \quad (3.11)$$

$$b_3 = \frac{U_{p_1} - 45}{0,57} = \frac{687,5 - 45}{0,57} = 1127,19 \text{ mm} \quad (3.12)$$

$$b_4 = \frac{U_{p_1}}{0,505} = \frac{687,5}{0,505} = 1361,39 \text{ mm} \quad (3.13)$$

$$b_5 = \frac{U_{p_1} - 148}{545} = \frac{687,5 - 148}{545} = 989,9 \text{ mm} \quad (3.14)$$

a izolační vzdálenost v odpojovací dráze c

$$c_1 = \frac{U_{c_2} - 14}{0,316} = \frac{304,75 - 14}{0,316} = 920,09 \text{ mm} \quad (3.15)$$

$$c_2 = \frac{U_{c_2} - 10,6}{0,36} = \frac{304,75 - 10,6}{0,36} = 817,08 \text{ mm} \quad (3.16)$$

$$c_3 = \frac{U_{p_2} - 45}{0,57} = \frac{787,5 - 45}{0,57} = 1302,63 \text{ mm} \quad (3.17)$$

$$c_4 = \frac{U_{p_2}}{0,505} = \frac{787,5}{0,505} = 1559,41 \text{ mm} \quad (3.18)$$

$$c_5 = \frac{U_{p_2} - 148}{545} = \frac{787,5 - 148}{545} = 1173,39 \text{ mm} \quad (3.19)$$

Z těchto vypočítaných izolačních vzdáleností se provede kontrola, jestli tyto hodnoty patří do rozsahu který je definován v rovnicích (3.1) až (3.5) a pro každou izolačních vzdálenost b a c se zvolí nejvyšší vypočítaná hodnota, která označuje minimální izolačních vzdálenost. V izolační vzdálenosti b to je vzdálenost $b_4 = 1361,39 \text{ mm}$ a v izolačních vzdálenosti c to je vzdálenost $c_4 = 1559,41 \text{ mm}$. Obě vzdálenosti byli vypočítány z přeskokového napětí při atmosférickém impulzu. Z měření na reálném modelu byla zjištěna izolační vzdálenost $c = 1566 \text{ mm}$ tedy více než je minimální izolační vzdálenost.

3.2 Proudová dráha

Proudová dráha odpojovače je tvořena přívodními hlavicemi, které jsou umístěny na ramenech odpojovače. Přenos proudu z jednoho ramene na druhé zajišťuje kontaktní hlavice s kontaktními palci a pevný kontakt z pasoviny. Proudová dráha je umístěna na otočných podpěrných izolátorech zajišťujících izolační vzdálenost od nosné konstrukce odpojovače na zemním potenciálu. K přenosu proudu přes otočnou přívodní hlavici slouží kuželíkové ložisko. Rameno je vyrobeno z hliníku a kontaktní palce jsou vyrobeny z postříbřené mědi. Celkový počet palců odpojovače je osm, tedy čtyři páry.

3.2.1 Oteplení proudové dráhy

Tepelné účinky proudu jsme probrali v kapitole 2.2.3. Pro výpočet oteplení ramene procházejícím jmenovitým proudem vycházíme z následujících parametrů

Délka ramene:

$$l_r = 0,795 \text{ m} \quad (3.20)$$

Výpočet ochlazovací plochy ramene:

$$\begin{aligned} A_r &= (2 \cdot c + 2 \cdot b + 2 \cdot (b - c) + a + (a - 2 \cdot c)) \cdot l_r \\ &= (2 \cdot 0,006 + 2 \cdot 0,12 + 2 \cdot (0,12 - 0,006) + 0,013 \\ &\quad + (0,13 - 2 \cdot 0,006) \cdot 0,795 = 0,5788 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (3.21)$$

kde a, b, c jsou rozměry profilu ramene.

Výpočet průřezu profilu ramene:

$$\begin{aligned} S_r &= 2 \cdot ((b - c) \cdot c) + a \cdot c \\ &= 2 \cdot ((0,12 - 0,006) \cdot 0,006) + 0,13 \cdot 0,006 \\ &= 2,148 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (3.22)$$

Výpočet odporu hliníkového ramene:

$$R_r = \rho_{al} \cdot \frac{l_r}{S_r} = 3,5 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,795}{2,148 \cdot 10^{-3}} = 12,95 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (3.23)$$

kde ρ_{al} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) je měrný odpor hliníku při teplotě 60°C . Po dosazení do rovnice (2.17) pro výpočet oteplení a zvolení součinitele přestupu tepla $\alpha_0 = 12$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), který lze u odpojovačů uvažovat za ideálních podmínek získáme

$$\Delta\vartheta_{\infty r_1} = \frac{R_r \cdot I_n^2}{\alpha_0 \cdot A_r} = \frac{12,95 \cdot 10^{-6} \cdot 2000^2}{12 \cdot 0,5788} = 7,461 \text{ K} \quad (3.24)$$

a pro zvolený součinitel $\alpha_0 = 5$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) dostaneme

$$\Delta\vartheta_{\infty r_2} = \frac{12,95 \cdot 10^{-6} \cdot 2000^2}{5 \cdot 0,5788} = 17,906 \text{ K} \quad (3.25)$$

Z toho vyplývá, že stanovení součinitele přestupu tepla α_0 je pro výpočet zásadní. Součinitel lze vypočítat nebo odhadnout na základě zkušenosti. Při výpočtu oteplení způsobené zkratovým proudem se neuvažuje přestup tepla do okolí a vytvořené teplo se v rameni odpojovače akumuluje.

Výpočet objemu ramene:

$$V_r = S_r \cdot l_r = 2,148 \cdot 10^{-3} \cdot 0,795 = 1,708 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (3.26)$$

Výpočet oteplení způsobený zkratovým proudem:

$$\Delta\vartheta_{kr} = \frac{R_r \cdot l_{kt}^2 \cdot t}{C_{val} \cdot V_r} = \frac{12,95 \cdot 10^{-6} \cdot (40 \cdot 10^3)^2 \cdot 1}{2,4 \cdot 10^6 \cdot 1,708 \cdot 10^{-3}} = 5,057 \text{ K} \quad (3.27)$$

kde C_{val} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) je měrná objemová tepelná kapacita hliníku a t (s) jmenovitá doba zkratu.

3.2.2 Oteplení kontaktních palců

Kontrolu na oteplení je potřeba ještě provést na měděných kontaktních palcích s postříbřeným povrchem. Počet palců je $n = 8$. Šířka palce d je 9 mm a výška palce e je 20 mm. Výpočet plochy palce:

$$S_p = d \cdot e = 0,009 \cdot 0,02 = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (3.28)$$

Výpočet ochlazovací plochy palce

$$A_p = (d + e) \cdot l_{kh} = (0,009 + 0,02) \cdot 0,33 = 9,24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (3.29)$$

Výpočet odporu palce:

$$R_p = \rho_{cu} \cdot \frac{l_p}{S_p} = 2,1 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,248}{1,8 \cdot 10^{-4}} = 3,25 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (3.30)$$

Odvod tepla se uvažuje pouze polovinou plochy palce. Také se počítá s vlivem stykového odporu mezi palcem a hlavicí, který nám způsobí Joulovy ztráty. Po úpravě rovnice (2.17) za těchto předpokladů dostaneme rovnici

$$\Delta\vartheta \cdot \alpha_0 \cdot A_p = \frac{R_{smin} \cdot \left(\frac{I_n}{n}\right)^2}{2} + R_p \cdot \left(\frac{I_n}{n}\right)^2 \quad (3.31)$$

a úpravou této rovnice a vyjádřením oteplení v kontaktních palcích způsobené jmenovitým proudem dostaneme rovnici ve tvaru:

$$\Delta\vartheta_{\infty p} = \frac{R_{smin} \cdot \left(\frac{I_n}{n}\right)^2}{2} + R_p \cdot \left(\frac{I_n}{n}\right)^2}{\alpha_0 \cdot A_p} \quad (3.32)$$

kde R_{smin} (Ω) je minimální stykový odpor vypočítaný dle tří kritérií.

1) Kritérium pro jmenovitý proud

Při procházejícím jmenovitém proudu je potřeba dodržet maximální úbytek napětí $\Delta U_{s1} = 20$ (mV) na kontaktu.

$$R'_s = \frac{\Delta U_{s1}}{\frac{I_n}{n}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{\frac{2000}{8}} = 8 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (3.33)$$

2) Kritérium pro krátkodobý výdržný proud

$$R''_s = \frac{E \cdot k}{\left(\frac{I_{kt}}{n}\right)^2 \cdot t_k} = \frac{200 \cdot 10}{\left(\frac{40 \cdot 10^3}{8}\right)^2 \cdot 1} = 8 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (3.34)$$

kde $E = 200$ (J) je maximální energie ztracená na úžinovém odporu a k (-) je empirická konstanta.

3) Kritérium pro krátkodobý dynamický proud

$$R'''_s = \frac{\Delta U_{s2} \cdot k}{\frac{l_p}{n}} = \frac{350 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{\frac{100 \cdot 10^3}{8}} = 2,8 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (3.35)$$

kde maximální úbytek napětí na stykovém odporu je $\Delta U_{s2} = 350$ (mV).

Nejmenší hodnota z těchto tří kritérií je:

$$R_{smin} = \{R'_s; R''_s; R'''_s\}_{min} = R'_s = R''_s = 8 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Z minimální hodnoty stykového odporu se vypočítá přítlačná síla F_k (N) dle vztahu:

$$F_k = F_1 \cdot \sqrt[m]{\frac{k_n}{R_{smin}}} = 1 \cdot \sqrt[0,5]{\frac{8 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 10^{-5}}} = 100 \text{ N} \quad (3.36)$$

kde $F_1 = 1$ (N) je konstanta dosazena kvůli souhlasu jednotek, m (-) je konstanta volena v rozsahu $m = (0,5 - 0,7)$ dle druhu styku a k_n (Ω) je konstanta respektující v místě styku vlastnosti materiálu.

Dosazením vypočítaných hodnot do rovnice (3.32) pro $\alpha_0 = 12$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), dostaneme výsledné oteplení palce při jmenovitém proudu:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{\infty p_1} &= \frac{\frac{R_{smin} \cdot \left(\frac{I_n}{n}\right)^2}{2} + R_p \cdot \left(\frac{I_n}{n}\right)^2}{\alpha_0 \cdot A_p} \\ &= \frac{\frac{8 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{2000}{8}\right)^2}{2} + 3,25 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{2000}{8}\right)^2}{12 \cdot 9,24 \cdot 10^{-3}} \\ &= 40,857 \text{ K} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Za těchto podmínek odvodu tepla do okolí by bylo oteplení palce pod dovolenou hodnotou 65K. Pro srovnání je provedeno i ověření pro zhoršený odvod tepla do okolí, které zohledňuje omezené ochlazování kontaktů u této konstrukce odpojovače.

A pro $\alpha_0 = 5$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

$$\Delta\vartheta_{\infty p_2} = \frac{\frac{8 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{2000}{8}\right)^2}{2} + 3,25 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{2000}{8}\right)^2}{5 \cdot 9,24 \cdot 10^{-3}} = 98,058 \text{ K} \quad (3.38)$$

Tato výsledná hodnota by již dovolené oteplení významně překročila a toto jednoduché analytické ověření pouze kontaktního palce bez návaznosti na další části odpojovače by tak bylo nevyhovující. Pro výpočet oteplení způsobené zkratovým proudem potřebujeme vypočítat objem materiálu palce:

$$V_p = d \cdot e \cdot l_{kh} = 0,008 \cdot 0,02 \cdot 0,33 = 5,28 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (3.39)$$

Pak oteplení způsobené zkratovým proudem je:

$$\Delta\vartheta_{kp} = \frac{R_p \cdot \left(\frac{I_{kt}}{n}\right)^2 \cdot t}{C_{v_{cu}} \cdot V_p} = \frac{3,25 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{40 \cdot 10^3}{8}\right)^2 \cdot 1}{3,4 \cdot 10^6 \cdot 5,28 \cdot 10^{-5}} = 4,52 \text{ K} \quad (3.40)$$

kde $C_{v_{cu}}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) je měrná objemová tepelná kapacita mědi a t (s) jmenovitá doba zkratu.

3.3 Mechanické namáhání proudové dráhy

3.3.1 Tíha ramene a kontaktní hlavice

Tíhová síla působící na rameno:

$$F_{1a} = \rho_{al} \cdot g \cdot V_r = 2700 \cdot 9,81 \cdot 1,708 \cdot 10^{-3} = 45,23 \text{ N} \quad (3.41)$$

kde ρ_{al} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota hliníku. Pak moment působící na rameno je:

$$M_{1a} = F_{1a} \cdot \frac{l_r}{2} = 45,23 \cdot \frac{0,795}{2} = 17,98 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.42)$$

Hmotnost kontaktní hlavice:

$$m_{kh} = n \cdot V_p \cdot \rho_{al} = 8 \cdot 5,28 \cdot 10^{-5} \cdot 8930 = 3,77 \text{ kg} \quad (3.43)$$

Tíhová síla působící na kontaktní hlavici:

$$F_{1b} = 1,5 \cdot m_{kh} \cdot g = 1,5 \cdot 3,77 \cdot 9,81 = 55,51 \text{ N} \quad (3.44)$$

Moment působící na odpojovací rameno:

$$M_{1b} = F_{1b} \cdot (l_r + 0,5l_{kh}) = 55,51 \cdot (0,795 + 0,5 \cdot 0,33) = 53,59 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.45)$$

3.3.2 Elektrodynamická síla

Velikost elektrodynamické síly se v trojfázové soustavě, kdy jsou odpojovače v rozvodně umístěné vedle sebe, počítá pro nejhorší možný případ a to pro odpojovač umístěný uprostřed. Na tento odpojovač působí největší síla. Vzdálenost a mezi odpojovači se určí pomocí minimální izolační vzdálenosti b , délky kontaktní hlavice l_{kh} , délky ramene odpojovače l_r , délky objímky přívodní hlavice l_0 a průměrem příruby D_p

$$\begin{aligned} a &= b_4 + l_{kh} + l_r + l_0 + D_p = 1361,4 + 330 + 795 + 155 + 155 \\ &= 2796 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.46)$$

Elektrodynamická síla působící na střední odpojovač:

$$\begin{aligned} F_{2d} &= 3,464 \cdot \frac{l_r + \frac{3}{4} l_{kh}}{a} \cdot I_p^2 \cdot 10^{-7} \\ &= 3,464 \cdot \frac{0,795 + \frac{3}{4} \cdot 0,330}{2,796} \cdot 100000^2 \cdot 10^{-7} = 1291,4 \text{ N} \end{aligned} \quad (3.47)$$

Moment způsobený elektrodynamickou silou:

$$M_{2d} = F_{2d} \cdot \frac{l_r + \frac{3}{4} l_{kh}}{2} = 1291,4 \cdot \frac{0,795 + \frac{3}{4} \cdot 0,330}{2} = 673,1 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.48)$$

3.3.3 Námraza

Objem námrazy na rameni při maximální tloušťce ledu $t = 0,02 \text{ m}$:

$$\begin{aligned} V_{rled} &= l_r \cdot (2 \cdot ((b + t - c + t) \cdot (c + t)) + (a + t) \cdot (c + t) - S_r) \\ &= 0,795 \\ &\quad \cdot (2 \cdot ((0,12 + 0,02 - c + 0,02) \cdot (0,006 + 0,02)) \\ &\quad + (0,13 + 0,02) \cdot (c + 0,02) - 0,002) = 0,0078 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (3.49)$$

Síla působící na rameno vlivem námrazy:

$$F_{3a} = V_{rled} \cdot \rho_{led} \cdot g = 0,0078 \cdot 950 \cdot 9,81 = 72,31 \text{ N} \quad (3.50)$$

kde ρ_{led} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota ledu.

Moment působící na rameno vlivem námrazy:

$$M_{3a} = F_{3a} \cdot \frac{l_r}{2} = 72,31 \cdot \frac{0,795}{2} = 28,74 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.51)$$

Výška kontaktní hlavice:

$$V_{kh} = \frac{n}{2} \cdot e + \left(\frac{n}{2} - 1\right) \cdot 0,005 = \frac{8}{2} \cdot 0,02 + \left(\frac{8}{2} - 1\right) \cdot 0,005 = 0,095 \text{ m} \quad (3.52)$$

Objem námrazy na kontaktní hlavici:

$$\begin{aligned} V_{khled} &= (2 \cdot V_{kh} + 5 \cdot a) \cdot l_{kh} \cdot t = (2 \cdot 0,095 + 5 \cdot 0,13) \cdot 0,33 \cdot 0,02 \\ &= 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (3.53)$$

Hmotnost ledu na kontaktní hlavici:

$$m_{khled} = V_{khled} \cdot \rho_{led} = 5,5 \cdot 10^{-3} \cdot 950 = 5,27 \text{ kg} \quad (3.54)$$

Síla působící na kontaktní hlavici vlivem námrazy:

$$F_{3b} = m_{khled} \cdot g = 5,27 \cdot 9,81 = 51,67 \text{ N} \quad (3.55)$$

Moment působící na odpojovací rameno vlivem námrazy:

$$M_{3b} = F_{3b} \cdot \left(l_r + \frac{l_{kh}}{2}\right) = 51,67 \cdot \left(0,795 + \frac{0,33}{2}\right) = 49,6 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.56)$$

3.3.4 Tlak větru

Plocha ramene s kontaktní hlavici, na kterou působí boční vítr:

$$S_{vitr} = a \cdot l_r + l_{kh} \cdot V_{kh} = 0,13 \cdot 0,795 + 0,33 \cdot 0,095 = 0,138 \text{ m}^2 \quad (3.57)$$

Síla působící na rameno s kontaktní hlavici vlivem větru:

$$F_4 = p_v \cdot S_{vitr} = 700 \cdot 0,138 = 94,29 \text{ N} \quad (3.58)$$

kde p_v (Pa) je tlak větru o rychlosti přibližně 130 km/h.

Moment působící na rameno s kontaktní hlavicí vlivem větru:

$$M_4 = F_4 \cdot \frac{l_r + l_{kh}}{2} = 94,29 \cdot \frac{0,795 + 0,33}{2} = 53,04 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.59)$$

Provedený výpočet silového namáhání odpojovacího ramene je dále využit u numerické analýzy. Na základě stanovených ohybových momentů ramene by zároveň mohl být proveden základní analytický výpočet mechanického namáhání ramene. Navržené rameno má průřez ve tvaru obráceného U, pro který lze ve strojnických tabulkách dohledat odpovídající průřezový modul. S ohledem na upevnění ramene k přívodní hlavici však takový výpočet není postačující, v místech uchycení lze očekávat koncentraci mechanického napětí.

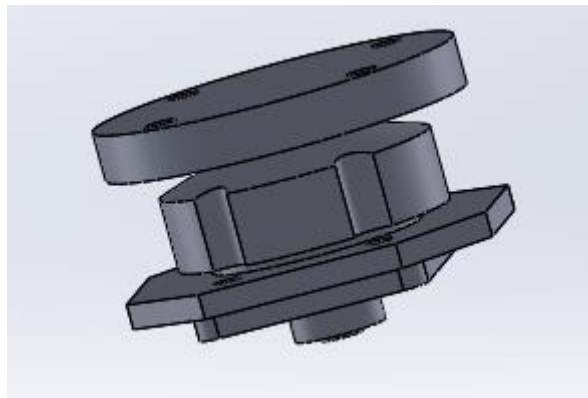
4 Aplikace vybraných numerických analýz na model odpojovače

4.1 Tvorba modelu

Model jsem namodeloval pomocí strojírenského 3D CAD softwaru SolidWorks. Vytvořen byl na základně reálného modelu odpojovače, který je umístěn v laboratoři katedry. Předmětem analýz byla proudová dráha, bez izolátorových podpěr. Model jsem rozdělil na několik dílů, které jsem následně spojil do soustavy a přiřadil jednotlivé vazby mezi nimi. Výsledný složený model odpojovače pak posloužil jako vstupní geometrie odpojovače pro software COMSOL, ve kterém byly realizovány vybrané analýzy.

4.1.1 Přívodní hlavice

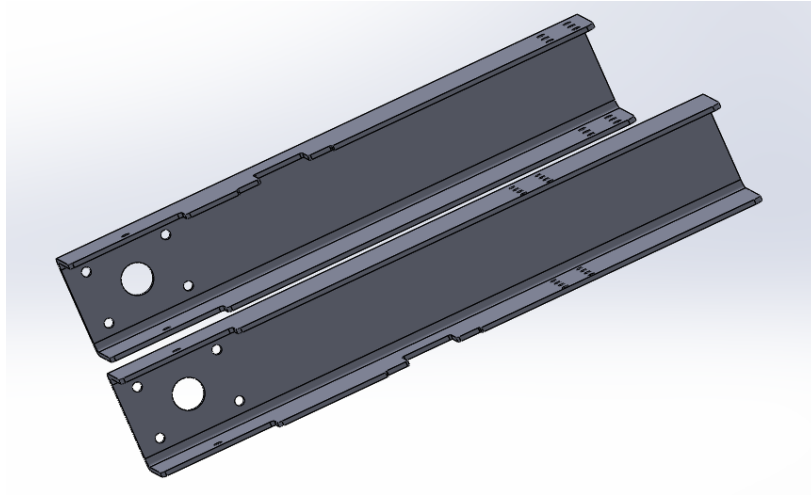
Přívodní hlavice je tvořena z pouzdra, ve kterém je uloženo kuželíkové ložisko. Model přívodní hlavice je zobrazen na obrázku (Obrázek 4.1).



Obrázek 4.1 - Přívodní hlavice

4.1.2 Ramena odpojovače

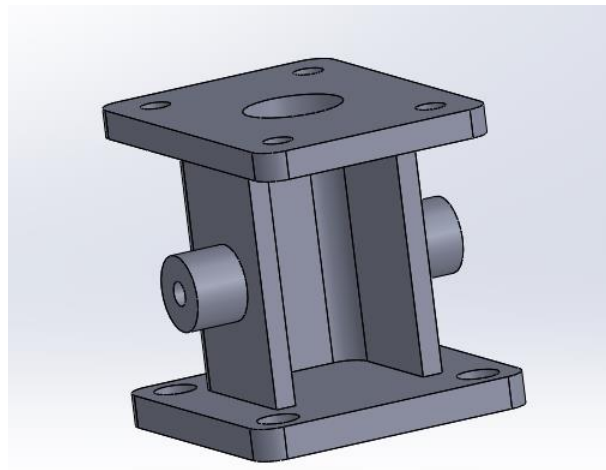
Rameno odpojovače je tvořeno z hliníkového plechu o tloušťce 6 mm. Na každém z ramen je výřez pro uzemňovací nůž. Na obrázku (Obrázek 4.2) jsou ramena odpojovače vedle sebe. Kratší pro pevný kontakt a delší pro kontaktní palce.



Obrázek 4.2 - Ramena odpojovače

4.1.3 Noha odpojovače

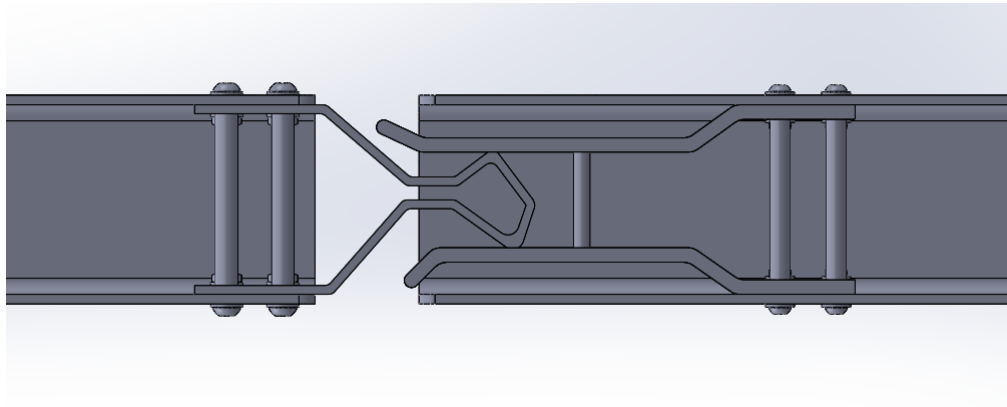
Noha odpojovače je umístěna na vrcholu izolátorů a zajišťuje rameni odpojovače podporu. Na obrázku (Obrázek 4.3) je zobrazen vytvořený model nohy.



Obrázek 4.3 - Noha odpojovače

4.1.4 Kontaktní ústrojí

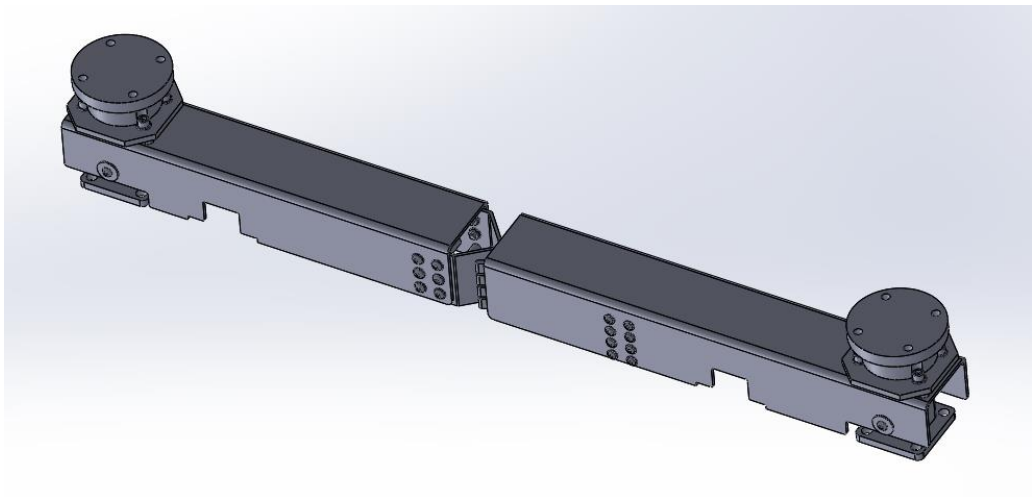
Kontaktní ústrojí se od reálné předlohy liší zanedbáním pružin u kontaktních palců. Provedení spojení kontaktních palců a pevného kontaktu je zobrazeno na obrázku (Obrázek 4.4) níže.



Obrázek 4.4 - Kontaktní ústrojí

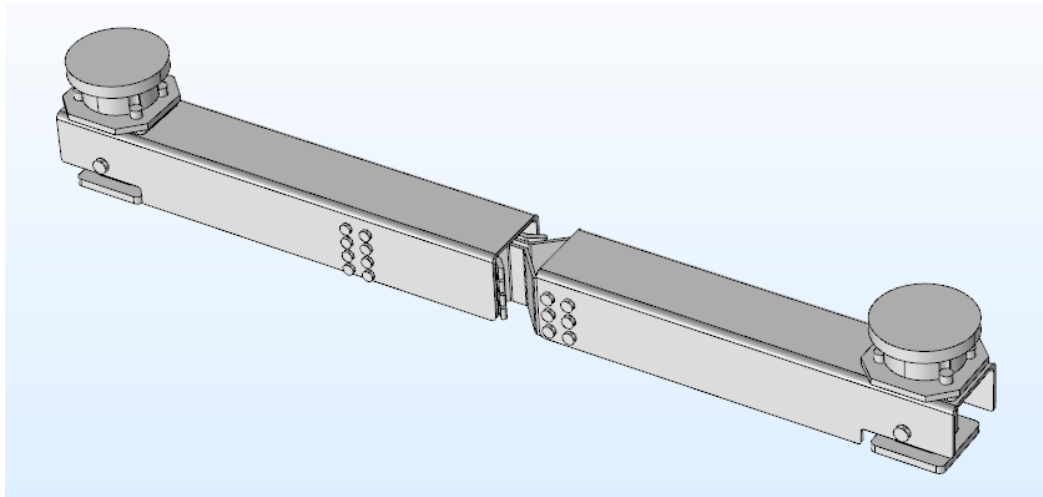
4.1.5 Celkový model odpojovače

Na následujícím obrázku (Obrázek 4.5) je zobrazen model proudové dráhy odpojovače po složení všech částí, přidání vazeb, šroubů, podložek a matic.



Obrázek 4.5 - Model odpojovače

Tento model byl následně zjednodušen a připraven jako vstupní geometrie do programu COMSOL. Zjednodušení geometrie proběhlo na šroubech, v kuželíkovém ložisku a také byl odstraněn výřez na ramenech pro uzemňovač. Tím se snížily požadavky na výpočetní výkon a doba výpočtu. Výsledný zjednodušený model v prostředí programu COMSOL je zobrazen na obrázku (Obrázek 4.6).



Obrázek 4.6 - Zjednodušený model

4.2 COMSOL

Jak jsem již dříve zmiňoval, vybrané analýzy byly provedeny v programu COMSOL. Tento program je výkonný nástroj používaný pro simulaci a modelování fyzikálních dějů. Prostředí je v angličtině a působí jednoduše a otevřeně. Tedy uživatel má velký stupeň volnosti a může zadávat například své materiály, matematické rovnice apod. Tvorba simulace probíhá v několika základních krocích. Nejdříve je potřeba definovat geometrii modelu. Ta může být vytvořena přímo v programu nebo může být naimportována z jiného programu v podporovaném formátu. Dalším krokem je zvolení analýzy, které se budou na modelu řešit. COMSOL obsahuje mnoho různých analýz od proudění tekutin po akustiku. V jednotlivých analýzách se definují okrajové podmínky a vlastnosti oblastí modelu. Pak následuje vytvoření výpočetní sítě na geometrii modelu a posledním krokem před výpočtem je zpravidla zvolení studie. Studie nám definuje typ úlohy. V mém případě se jedná o lineární úlohy, ale jsou zde i možnosti řešit nelineární, frekvenční nebo časové úlohy. Po vypočítání jednotlivé analýzy má uživatel možnost zobrazení výsledků vypočítané veličiny ve 2D nebo 3D grafech.

4.3 Tepelná analýza

První z vybraných analýz je teplotní analýza odpojovače při průchodu jmenovitého proudu. Úloha vychází z propojení fyzikálních analýz elektrického proudu a přenosu tepla v pevných tělesech. Cílem analýzy je zjistit velikost oteplení při průchodu jmenovitého proudu v odpojovači.

4.3.1 Vstupní parametry

Pro fyziku elektrického proudu je hlavním vstupním parametrem jmenovitý proud I_n který je uveden v tabulce (Tab. 3.1). Aplikován je pomocí okrajové podmínky proudové hustoty na jednu přívodní hlavici a na druhou přívodní hlavici je aplikována druhá okrajová podmínka nulového potenciálu. Velikost proudové hustoty je:

$$J_n = \frac{I_n}{S} = \frac{2000}{0,02006} = 99700,897 \text{ A/m}^2 \quad (4.1)$$

Fyzika přenosu tepla obsahuje několik podmínek. Počáteční hodnota teploty byla nastavena jako nevyšší přípustná pro pracovní podmínky a to 313,15 K (40 °C). Na plochy odpojovače byla zvolena velikost součinitele přestupu tepla $\alpha_0 = 5 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$. Pro jednotlivé plochy, které respektují spojení pevného kontaktu a kontaktní hlavice je potřeba uvažovat stykové odpory a jejich ztráty. Ztráty na jednom kontaktním palci při průchodu jmenovitého proudu jsou:

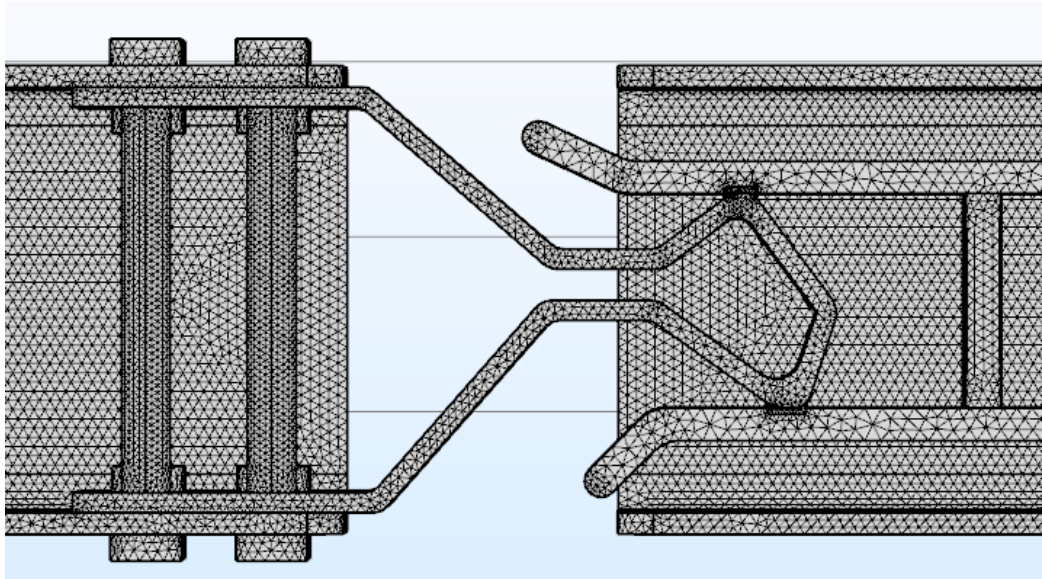
$$P_z = R_{smin} \cdot \left(\frac{I_n}{n}\right)^2 = 8 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{2000}{8}\right)^2 = 5W \quad (4.2)$$

Tyto ztráty jsou pro každý palec zadány pomocí proudové hustoty. Podobně je uvažován i vliv přechodových odporů v kuželíkovém ložisku. Pro každé kuželíkové ložisko je uvažováno 15 W ztrátového výkonu.

Materiál pro ramena odpojovače a nohu odpojovače je hliník. Kontaktní hlavice a pevný kontakt jsou z mědi a pro ostatní části jako šrouby a matice byla použita ocel. COMSOL umožňuje zadání parametrů materiálu i pomocí funkce. Tato funkce byla využita při zadávání tepelné závislosti vodivosti materiálu.

4.3.2 Výpočetní síť

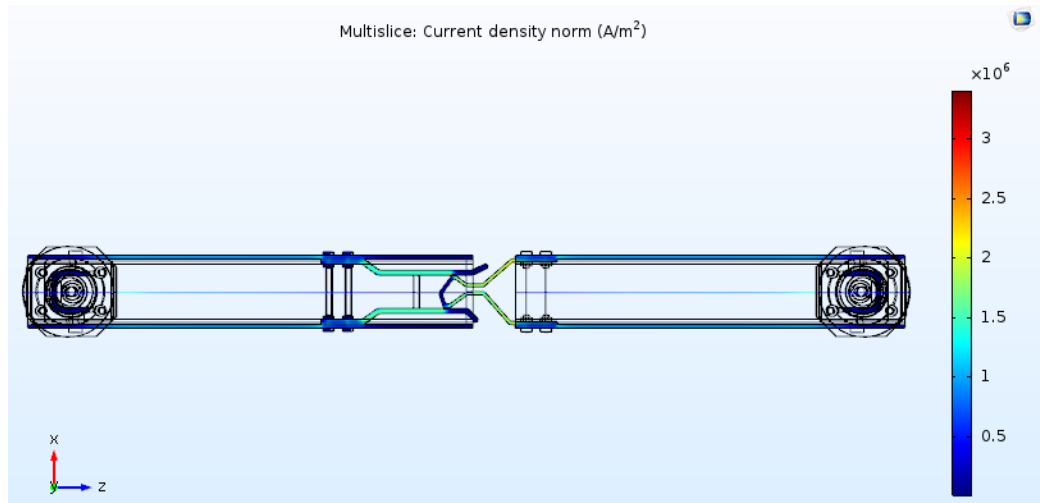
Na celý model jsem použil volnou čtyřbokou síť s úpravou její parametrů. Úprava se týkala maximální a minimální velikostí elementů výpočetní sítě tak aby bylo zajištěno vytvoření sítě i na velmi malých hranách geometrie. Protože celý model by na obrázku vypadal prakticky celý černě vzhledem k počtu elementů sítě, je na následujícím obrázku (Obrázek 4.7) zobrazen detail sítě na kontaktních palcích a pevném kontaktu.



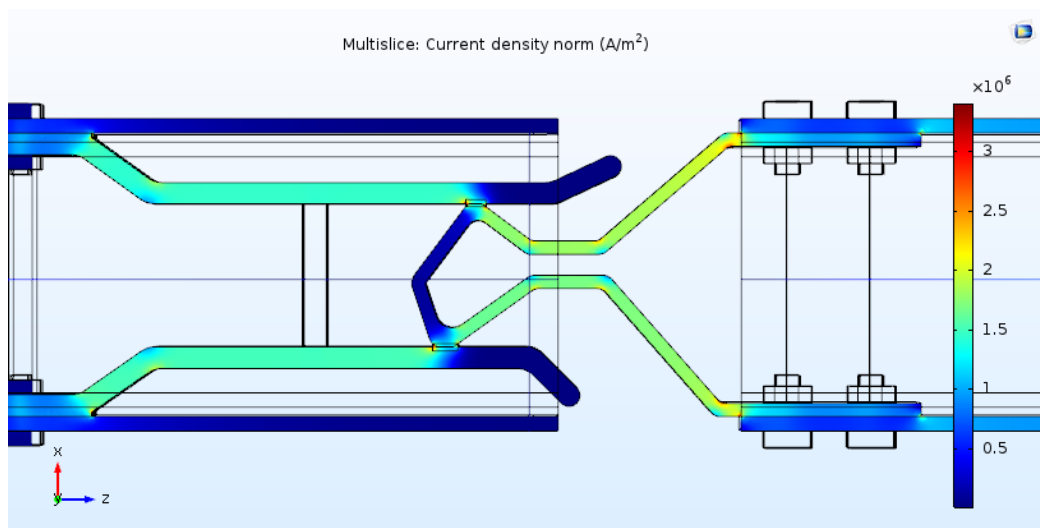
Obrázek 4.7 - Detail výpočetní sítě – tepelná analýza

4.3.3 Výsledky analýzy

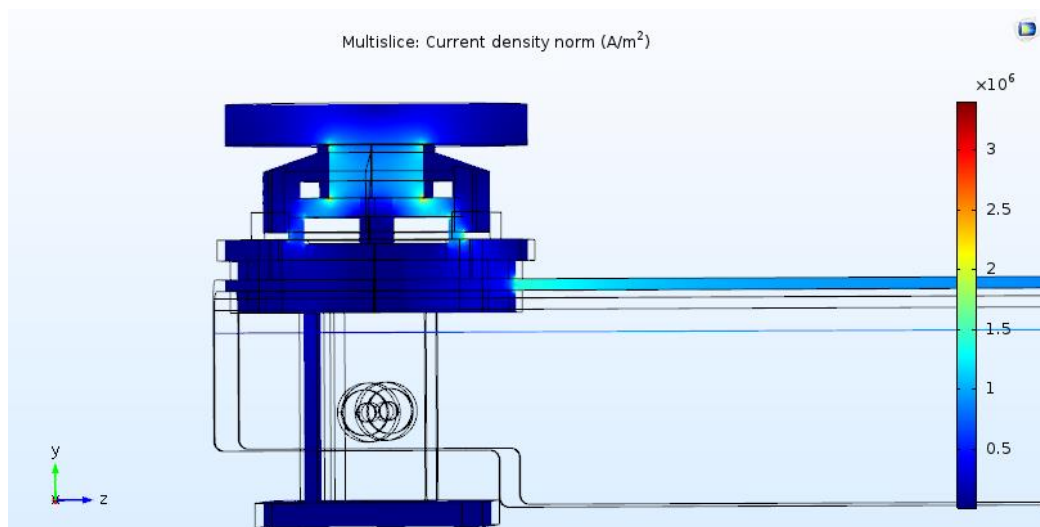
Na následujících obrázcích je zobrazen výsledek tepelné analýzy. V první části si nejdříve zobrazíme proudovou hustotu v průřezu odpojovače. Tu v řezu celého modelu můžeme vidět na obrázku (Obrázek 4.8). Z hlediska proudové hustoty nás nejvíce zajímá kontaktní ústrojí a přívodní hlavice. Kontaktní ústrojí je v detailu zobrazeno na obrázku (Obrázek 4.9). Na tomto obrázku je velmi dobře vidět jak proud vede z části prvního ramene do kontaktní hlavice a pak přes kontaktní místo do roubíku a z něho do druhého ramene. Na detailu přívodní hlavice (Obrázek 4.10) je vidět že proud neprochází krytem kuželíkového ložiska, ale prochází přes ložisko do ramene odpojovače. Na obou předchozích obrázcích si můžeme všimnout lokálních extrémů proudové hustoty, zvláště na ostrých hranách modelu. Tyto extrémů jsou způsobené generací výpočetní sítě, kdy při velmi malých oblastech je problém na tyto části správně vytvořit síť. Při zanedbání lokálních extrémů se v oblasti kontaktního ústrojí pohybuje proudová hustota okolo $2 \cdot 10^6$ ($A \cdot m^2$), v oblasti kuželíkového ložiska je tato hodnota přibližně poloviční. Z těchto výsledků můžeme předpokládat, že nejvyšší oteplení se bude nacházet v oblasti kontaktního ústrojí, kde je proudová hustota nejvyšší.



Obrázek 4.8 – Zobrazení proudové hustoty - v řezu celého modelu

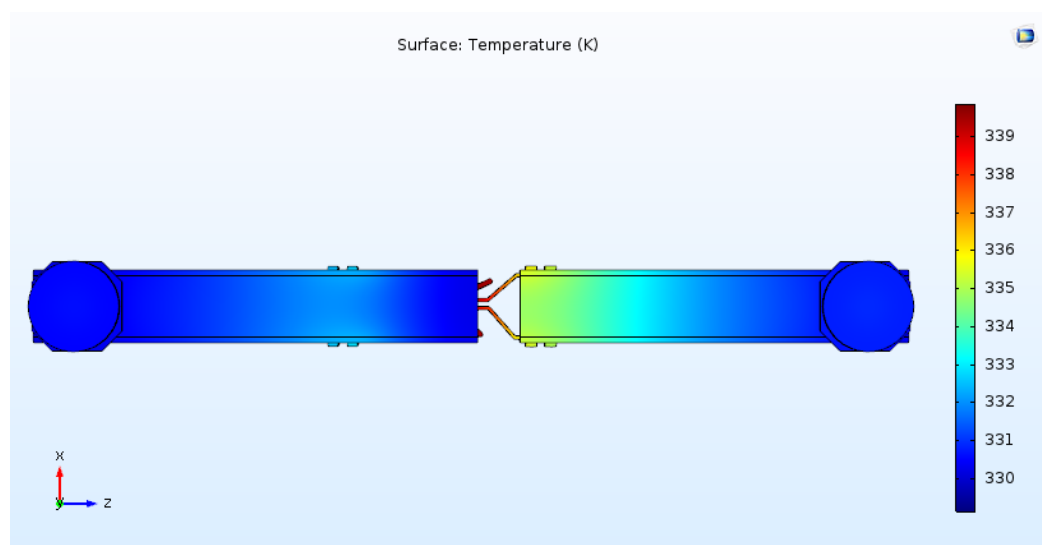


Obrázek 4.9 – Zobrazení proudové hustoty - v detailu kontaktního ústrojí

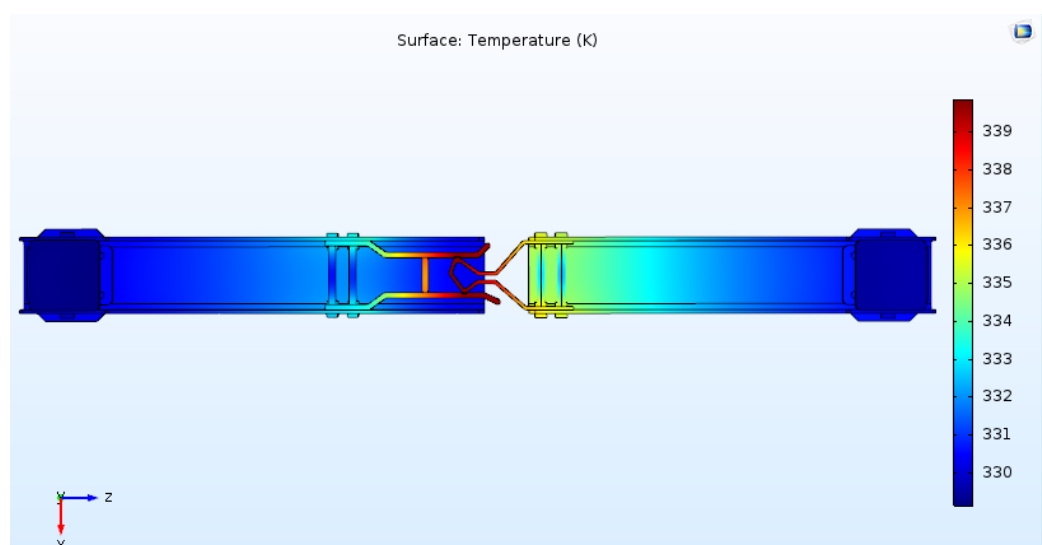


Obrázek 4.10 – Zobrazení proudové hustoty - v detailu přívodní hlavice

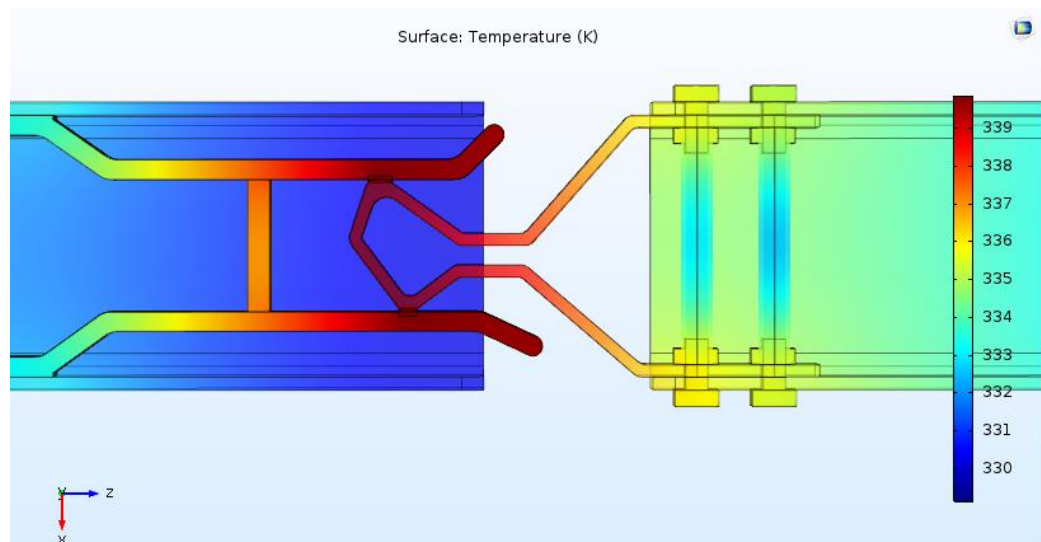
V druhé části tepelné analýzy se podíváme na zobrazení teploty na povrchu odpojovače. Na následujících obrázcích je zobrazení teploty na odpojovači z pohledu shora (Obrázek 4.11), pohledu ze zdola (Obrázek 4.12) a z detailního pohledu na kontaktní ústrojí odpojovače (Obrázek 4.13). Rozsah teplot na odpojovači po průchodu jmenovitého proudu se pohybuje přibližně v rozsahu 10 K. Nejnižší nasimulovaná teplota se nachází na spodní části nohy odpojovače a její hodnota je 329,12 K. Nejvyšší teplota je v místě dotyku kontaktní hlavy s kontaktním roubíkem a její hodnota je 339,84 K. Tato část je zřetelně viditelná na obrázku (Obrázek 4.13) detailu kontaktního ústrojí. Z obrázků je také patrné že pravé rameno se oteplilo více než levé rameno. Pravé rameno je totiž kratší a má tak menší chladící plochu.



Obrázek 4.11 - Rozložení teploty na odpojovači - pohled shora



Obrázek 4.12 - Rozložení teploty na odpojovači - pohled zdola



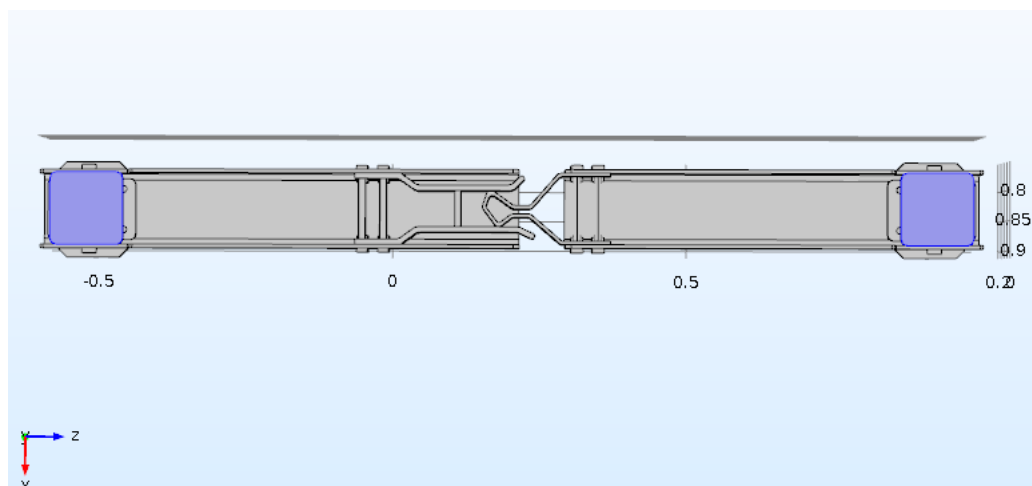
Obrázek 4.13 - Rozložení teploty na odpojovači - detail kontaktního ústrojí

4.4 Pevnostní analýza

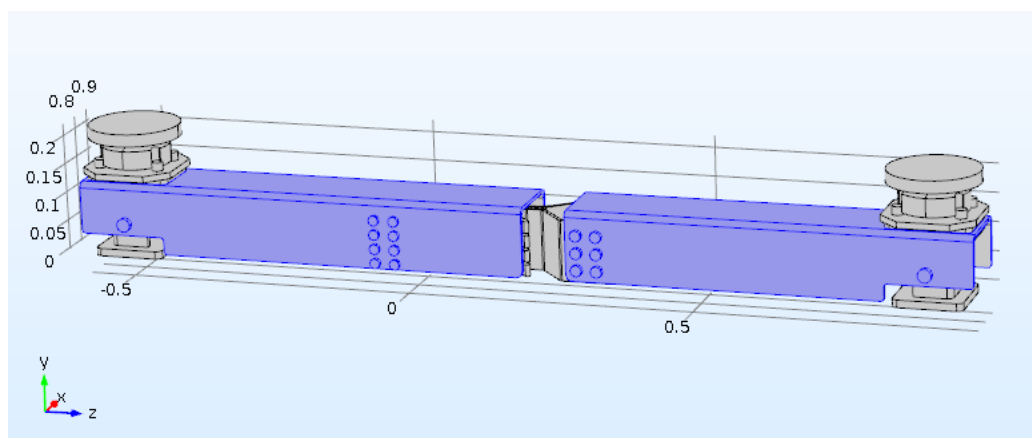
Druhá z vybraných analýz je pevnostní analýza odpojovače. Na odpojovač bude při simulaci působit více sil najednou. Cílem analýzy je zjistit velikost mechanického napětí a výsledného posunu odpojovače za těchto podmínek.

4.4.1 Vstupní parametry

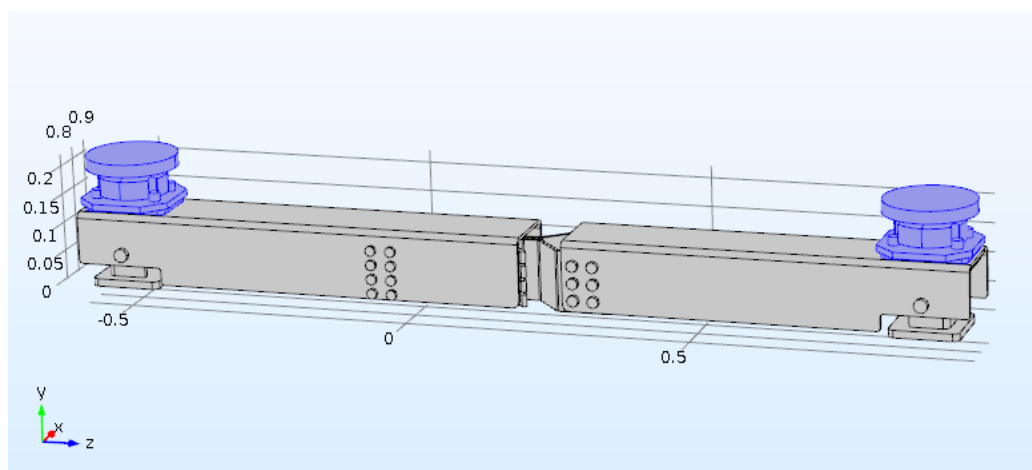
Vstupními parametry pro pevnostní analýzu jsou vypočtené hodnoty mechanického namáhání v kapitole 3.3. První podmínkou, která se musí definovat je určení pevné vazby. Tato vazba určuje, že daná plocha se při působení sil nepohne do žádného směru. V modelu je pevná vazba na spodní straně nohy a je zobrazena na obrázku (Obrázek 4.14). Na celý odpojovač, mimo přídavné síly, také působí gravitační síla ve směru osy $-y$. První přídavnou silou je působení námrazy na rameno a hlavici odpojovače ve směru osy $-y$. Aplikace okrajových podmínek je na geometrii zobrazena na obrázcích 4.15 a 4.16. Další přídavnou silou je působení bočního větru na odpojovač ve směru osy x , která je zobrazena na obrázku (Obrázek 4.17). Poslední silou je působení silových účinků zkratového proudu na celý odpojovač ve směru osy x .



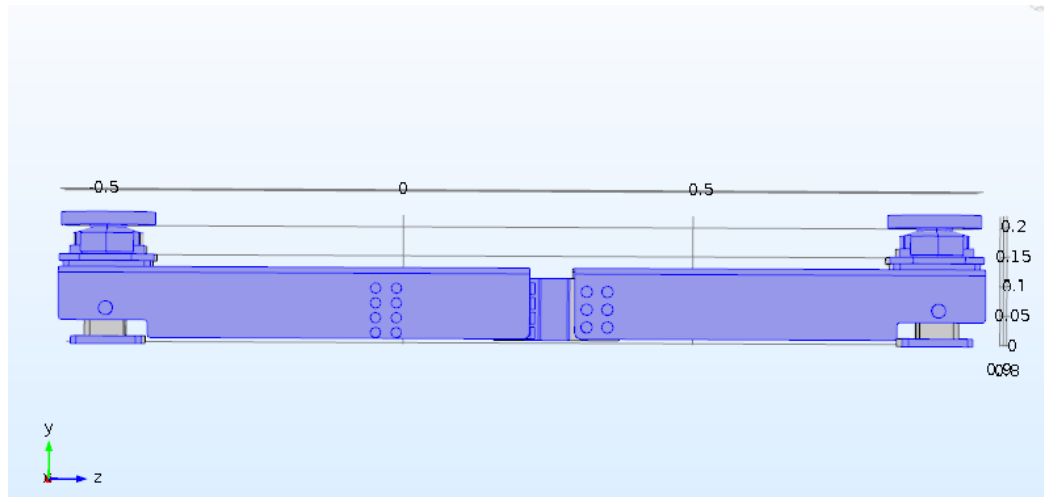
Obrázek 4.14 - Okrajová podmínka - pevný kontakt



Obrázek 4.15 - Okrajová podmínka - námraza ramene



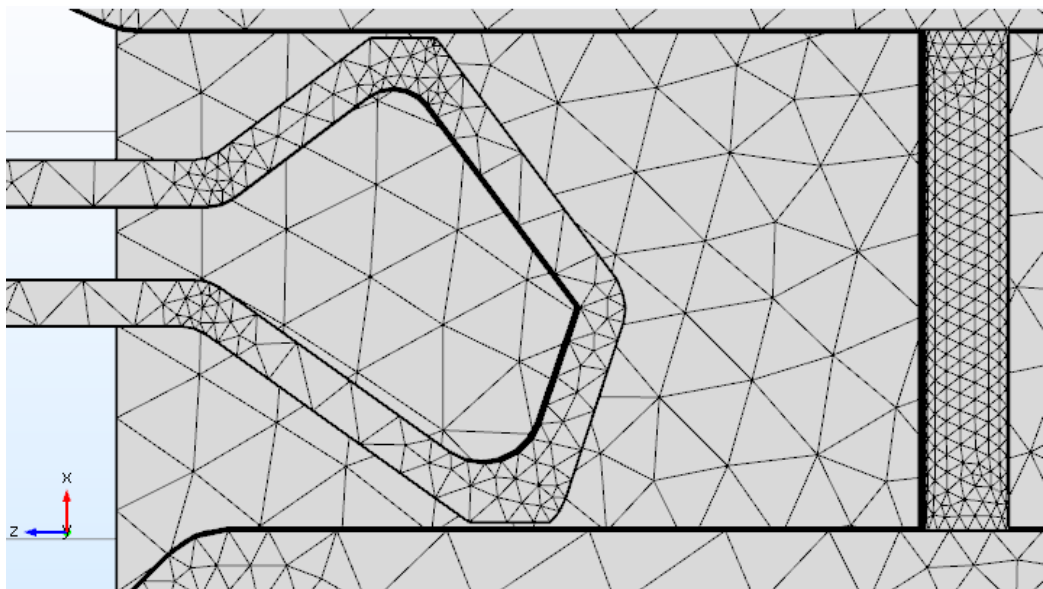
Obrázek 4.16 - Okrajová podmínka - námraza přívodní hlavice



Obrázek 4.17 - Okrajová podmínka - působení bočního větru

4.4.2 Výpočetní síť

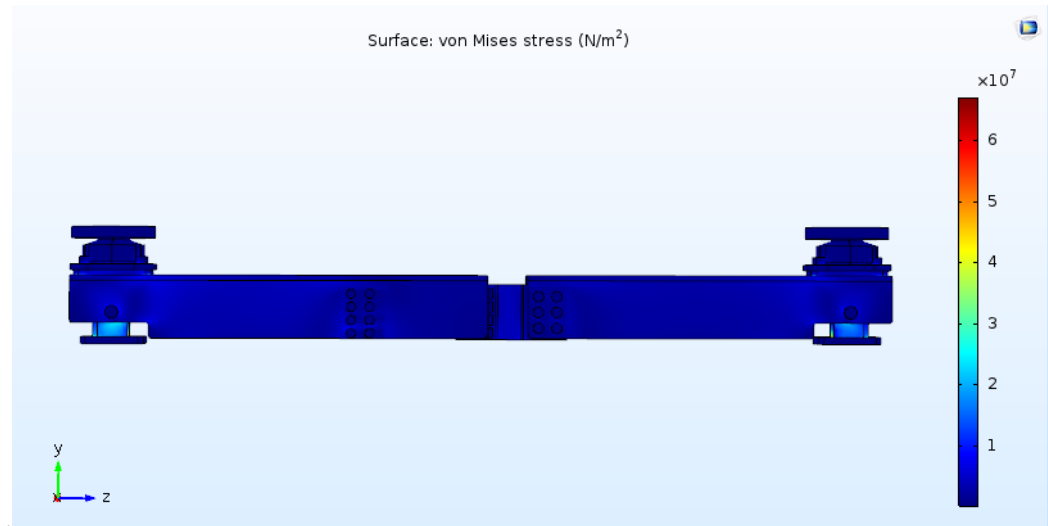
Výpočetní síť pro pevnostní analýzu je oproti síti použité pro tepelnou analýzu hrubší. Pro pevnostní analýzu bylo nutné odebrat objemy mezi kontaktními palci a pevným kontaktem. V detailu to je zobrazeno na obrázku (Obrázek 4.18), kde je mezera mezi kontaktními palci a pevným kontaktem 2 mm.



Obrázek 4.18 - Detail výpočetní sítě - pevnostní analýza

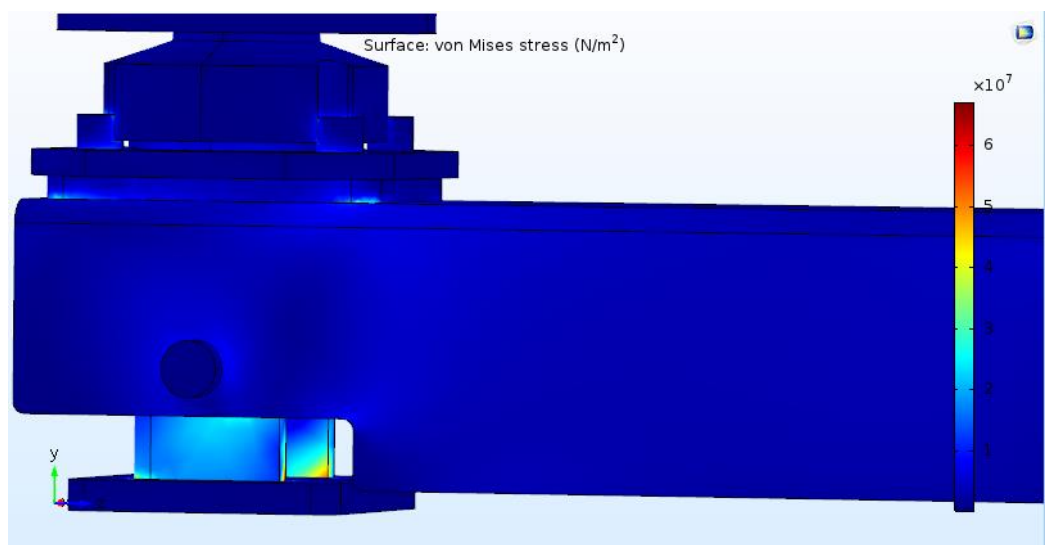
4.4.3 Výsledky analýzy

Výsledné rozložení mechanického napětí na modelu odpojovače je zobrazeno na následujícím obrázku (Obrázek 4.19).



Obrázek 4.19 - Rozložení mechanického napětí

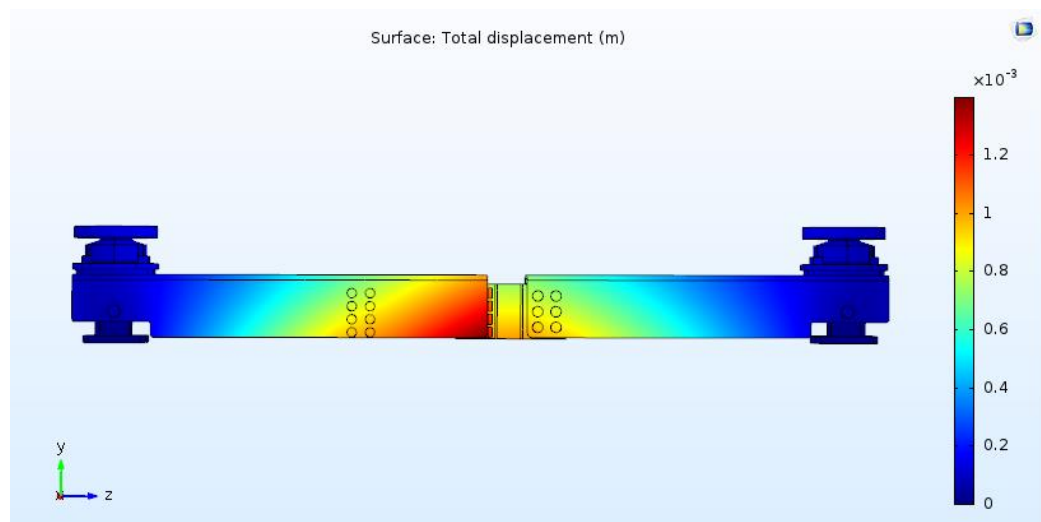
Nejvyšší mechanické napětí se nachází v místě spojení patky nohy odpojovače a jeho velikost je 67 MPa. Na obrázku (Obrázek 4.20) je vidět bližší pohled tohoto problematického místa.



Obrázek 4.20 - Detail rozložení mechanického napětí na noze odpojovače

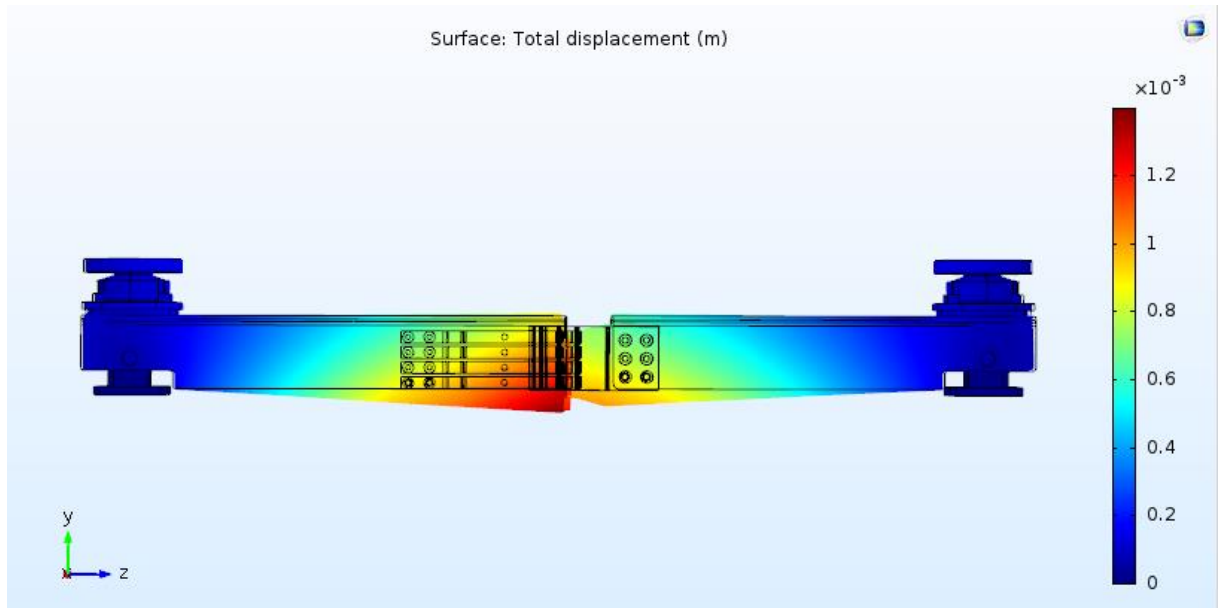
Na rameni vzniká nejvyšší mechanické napětí v místě spojení přívodní hlavy a ramene. Toto napětí má hodnotu přibližně 30 MPa. V oblasti kontaktního ústrojí je nejvyšší mechanické namáhání na výstužných trubičkách s hodnotou 22,3 MPa. Žádné z těchto mechanických napětí nepřekročilo maximální dovolenou hodnotu napětí pro daný materiál. Pro hliník, který je použit pro rameno a nohu odpojovače, má $\sigma_{dovAl} = 130$ MPa. Ocel, která byla použita pro výstužné trubičky má $\sigma_{dovocel} = 200$ MPa.

Výsledné posunutí vlivem zatěžujících sil je zobrazeno na obrázku 4.21. K největšímu posunu nastává v oblasti levého ramene na jeho konci u kontaktních hlavice. Maximální velikost posunutí v této oblasti je 1,4 mm.

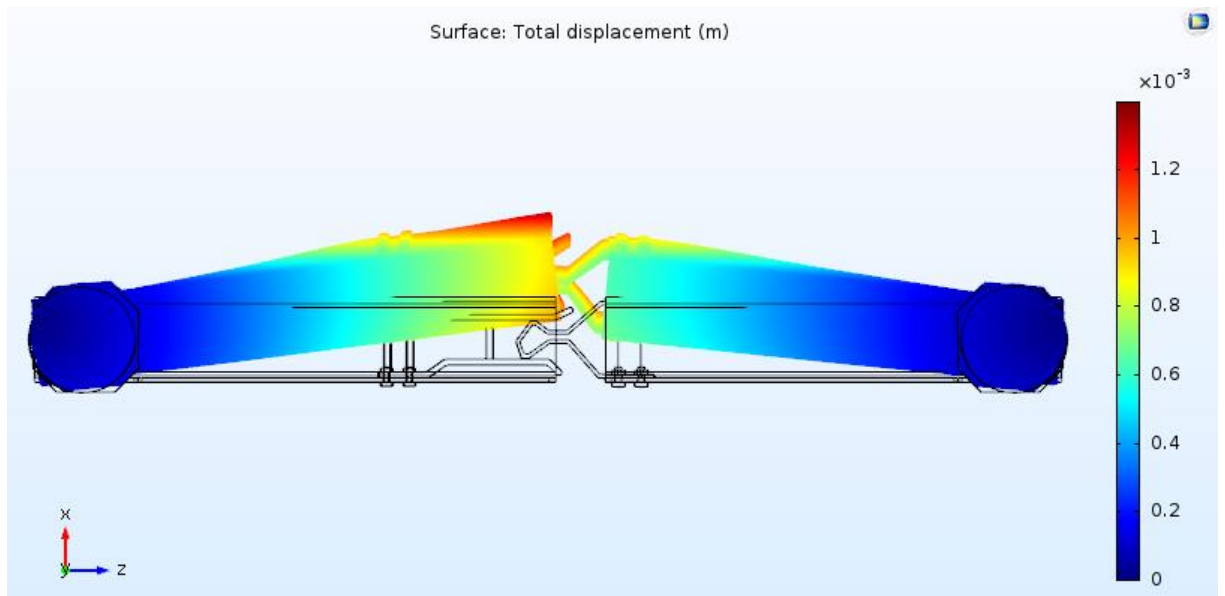


Obrázek 4.21 - Výsledné posunutí odpojovače vlivem zatěžujících sil

Jakým směrem se posunutí pohybuje, názorně ukazují následující obrázky, ve kterých je zobrazena deformace pomocí stonásobného měřítka aby se výsledné posunutí zřetelně projevilo. Na obrázku (Obrázek 4.22) je zobrazeno posunutí z bočního pohledu, ze kterého je patrné, že v oblasti kontaktního ústrojí odpojovač se prohýbá ve směru osy $-y$. Toto posunutí je způsobeno gravitační silou a působením námrazy na odpojovač. Z pohledu shora na obrázku (Obrázek 4.23) je v porovnání s přechodným pohledem výrazně větší výsledné posunutí. Model odpojovače se v porovnání s normálním stavem vytočil ve směru osy x vlivem působení bočního větru a elektrodynamické síly. Celkové posunutí je kombinací těchto dvou zmíněných směrů. Odpojovač se tedy vlivem působení gravitace, námrazy, větru a elektrodynamické síly mírně prohnul v oblasti kontaktního ústrojí a zároveň ve směru osy x vytočil. Tento posun je ale stále v milimetrovém měřítku.



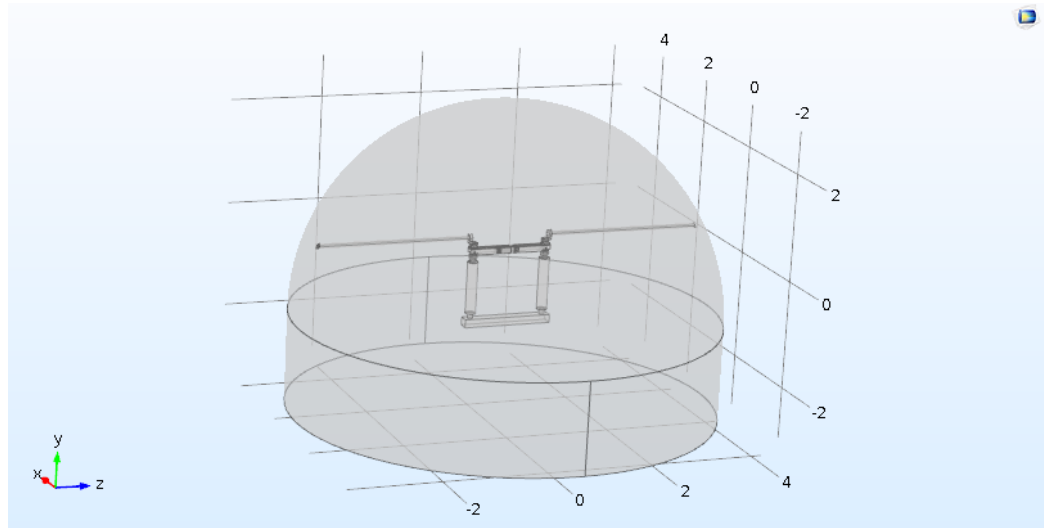
Obrázek 4.22 - Výsledná deformace odpojovače – pohled z boku



Obrázek 4.23 - Výsledná deformace odpojovače - pohled shora

4.5 Elektrostatická analýza

Poslední z vybraných analýz je elektrostatická analýza. Model odpojovače pro tuto úlohy je vytvořen z proudové dráhy, izolátorů, podpěrné konstrukce a obálky o průměru 8 m kolem odpojovače. Sestavu úlohy můžete vidět na obrázku 4.24. Cílem analýzy je zjistit rozložení elektrického potenciálu a intenzity elektrického pole na odpojovači a jeho okolí.



Obrázek 4.24 - Model odpojovače pro elektrostatickou úlohu

4.5.1 Vstupní parametry

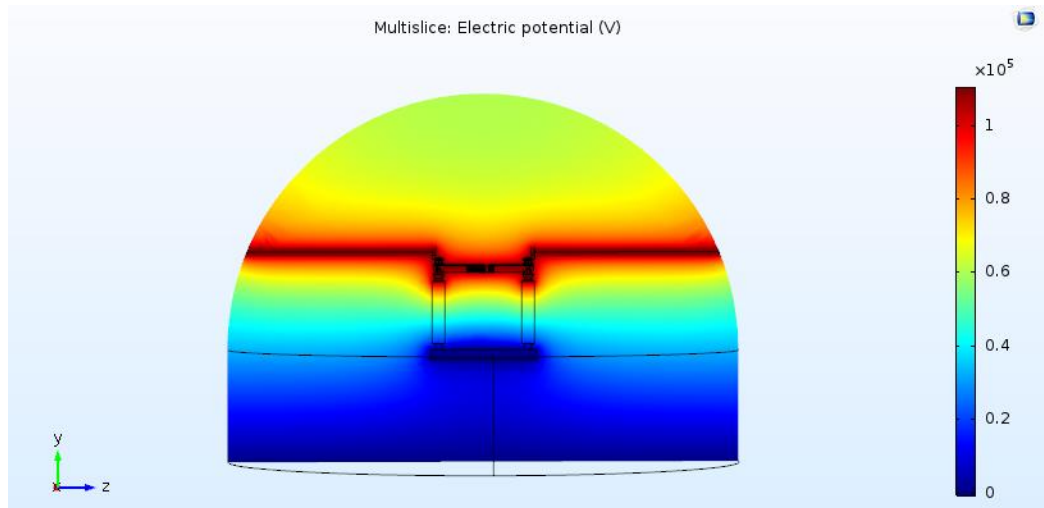
Elektrostatická analýza odpojovače obsahuje dvě základní podmínky. První podmínkou je definice nulového potenciálu na modelu, který se po dobu simulace nemění a zůstává stále nulový. Tento potenciál je umístěn na spodní kruhové části kupole. Druhá podmínka se týká definice velikosti elektrického potenciálu na geometrii modelu. Elektrický potenciál o velikosti $V_0 = 110 \text{ kV}$ je umístěn na proudové dráze. Ostatní části modelu v počátku simulace na sobě předpokládají nulový potenciál.

4.5.2 Výpočetní síť

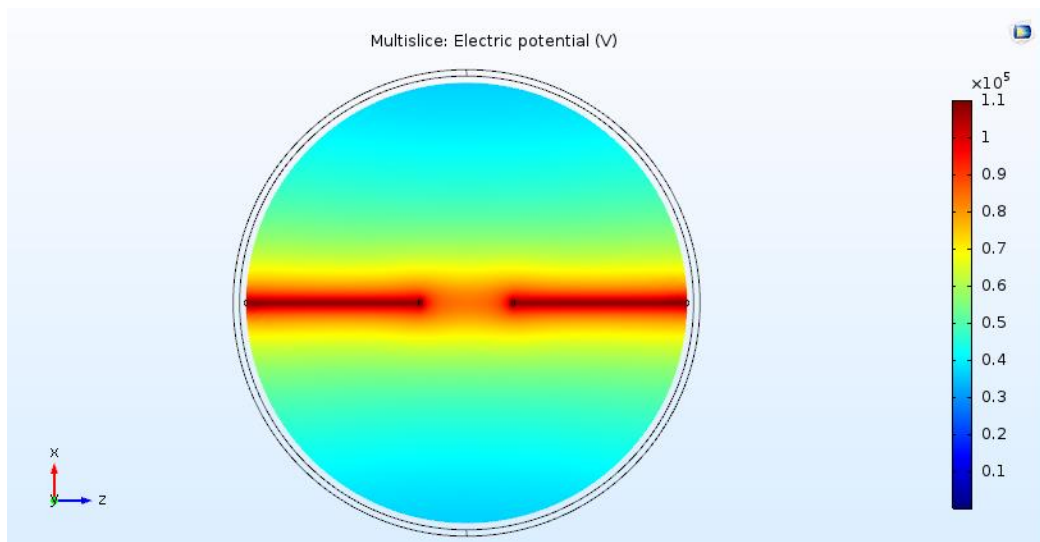
Vzhledem k velikosti geometrie modelu se při řešení této úlohy aplikují dvě výpočetní sítě o rozdílných velikostech prvků. Jemnější síť je generována na proudové dráze a hrubší síť na zbylých částech modelu. Tímto rozdělením snižujeme potřebný výpočetní výkon a také dobu simulace.

4.5.3 Výsledky analýzy

Výsledné rozložení elektrického potenciálu v řezu osy x je zobrazeno na obrázku 4.25. Z obrázku je patrné že v blízkém okolí proudové dráhy dosahuje elektrický potenciál největších hodnot. Proudová dráha je umístěna na izolátorech, které ji oddělují od podpěrné konstrukce. Na této konstrukci se elektrický potenciál blíží k nule. Na obrázku 4.26 je zobrazeno rozložení elektrického potenciálu v řezu osy y v maximální výšce části odpojovače, která je na potenciálu V_0 .

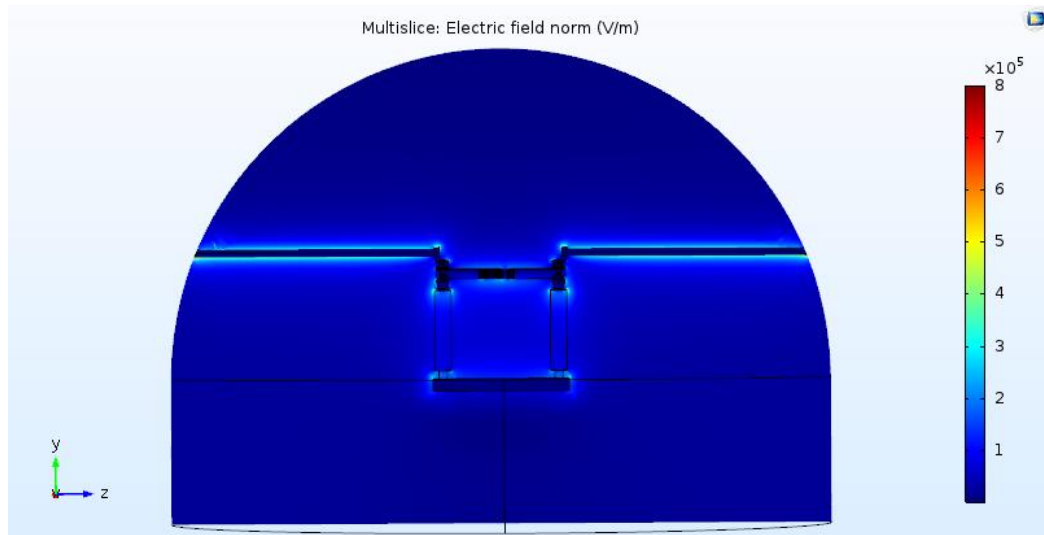


Obrázek 4.25 - Rozložení elektrického potenciálu – řez v ose x



Obrázek 4.26 - Rozložení elektrického potenciálu ve výšce vodičů

Na obrázku (Obrázek 4.27) je zobrazeno výsledné rozložení intenzity elektrického pole. Při přiblížení proudové dráhy, které je vidět na obrázku (Obrázek 4.28), jsou patrná nejvíce potenciálně problematická místa na odpojovači. Největší hodnota intenzity elektrického pole je na vrcholu izolátoru. Další místa se zvýšenou intenzitou elektrického pole se nachází na místě objímce trubkového vodiče, na přívodní hlavici a v oblasti kontaktní hlavice. Poslední problematické místo se nachází na hlavě izolátoru.



Obrázek 4.27 - Rozložení intenzity elektrického pole



Obrázek 4.28 - Rozložení intenzity elektrického pole v oblasti proudové dráhy

4.6 Zhodnocení výsledků analýz

V předchozí kapitole jsem provedl tři druhy simulací na modelu elektrického odpojovače. První z analýz byla tepelná analýza odpojovače při průchodu jmenovitého proudu. Teplota odpojovače vzrostla vlivem proudu z počátečních 313,15 K až na maximálních 339,84 K v oblasti kontaktu palce a roubíku. Teplotní rozdíl mezi počáteční a maximální hodnotou je 26,69 K. Ve výpočetní části v kapitole 3.2.1 vyšlo výsledné oteplení ramene 17,9 K. Výsledná teplota na profilu ramene odpojovače v jeho nejteplejší části je 335,2 K. Rameno se tedy ohřálo o 21,85 K. Rozdíl mezi vypočtenou a nasimulovanou hodnotou je v případě ramene 3,95 K. Maximální oteplení v oblasti palce je vychází 26,69 K. Vypočtená

hodnota vychází $\Delta\vartheta_{\infty p_2} = 98,06 \text{ K}$. Rozdíl mezi vypočítanou a nasimulovanou hodnotou je tedy více než 70 K. Tyto rozdíly jsou způsobeny především tím, že simulované analýzy se chovají jako téměř reálné fyzikální modely. Ve výpočtech počítáme hodnotu oteplení v samostatném tělesu jako je rameno nebo palec. V simulacích je ale palec spojen s ramenem, do kterého se teplo z palce odvádí. Tím je oteplení ramene v simulaci vyšší a oteplení palce nižší než ve výpočtech.

Druhá analýza se týkala vlivu působení zatěžujících sil na odpojovač. Na odpojovač působila gravitační síla, tíha námrazy, síla větru a také elektrodynamická síla. Síly byly zvoleny na základě výpočtu z kapitoly 3.3. Výsledky simulace nám ukázaly slabá místa konstrukce, která by se při působení větších sil mohla mechanicky poškodit nejdříve. Nejslabší místo se ukázalo být u patky nohy odpojovače, kde došlo k největšímu napětí v místě spojení. Zjištění nejslabšího místa může posloužit pro budoucí optimalizaci odpojovače. Odpojovač se dále kontroloval na výsledné posunutí částí. K největšímu posunu došlo v oblasti levého ramene na jeho konci u kontaktní hlavice. Tyto posuny neohrozili funkčnost odpojovače, protože maximální posun byl v těchto místech 1,4 mm.

Poslední z vybraných analýz se zabývala rozložením elektrického potenciálu a intenzity elektrického pole kolem odpojovače. Výsledky simulace ukázaly, jak se elektrický potenciál rozložil kolem proudové dráhy a také do okolního prostoru, který tvoří vzduch. Důležitým výsledkem analýzy pak bylo rozložení výsledné intenzity elektrického pole. Tato analýza ukázala místa, která byla nejvíce zatížena. Vlivem vysoké intenzity elektrického pole by na těchto částech mohlo například docházet k degradaci materiálu. Proto je rozložení elektrického potenciálu a intenzity elektrického pole důležité z hlediska konstrukčního návrhu zařízení. Volbou vhodného materiálu s odpovídající elektrickou pevností nebo změnou geometrie těles lze při znalostech těchto veličin optimálně dimenzovat elektrické zařízení pro plnění požadované funkce a také z hlediska bezpečnosti.

5 Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na aplikaci numerických metod při návrhu a analýze elektrického odpojovače. V úvodní kapitole jsem se zabýval teoretickým popisem odpojovačů, jejich rozdělení a také normativními požadavky a zkouškami odpojovačů.

V druhé části práce jsem se zaměřil na vybrané numerické analýzy, které se uplatní při analýze odpojovače. Nejdříve jsem se zabýval tepelnou analýzou. V té jsem shrnul základní termodynamické zákony, šíření tepla a tepelné účinky proudu. Další z analýz byla analýza elektromagnetického pole, který se zabývala působením sil v magnetickém poli a rozložení intenzity elektrického pole. Poslední z vybraných analýz byla pevnostní analýza, která se zabývala mechanickým namáháním.

Ve třetí části práce jsem provedl výpočet a základní konstrukční návrh odpojovače ze zadaných hodnot a také vytvořil 3D model odpojovače v programu SolidWorks. Vypočtené hodnoty následně posloužily jako vstupní parametry do simulace v následující části práce, která byla provedena v programu COMSOL.

V poslední části práce jsem provedl zvolené numerické analýzy na elektrickém odpojovači. První z analýz vyšetřovala velikost oteplení způsobené průchodem jmenovitého proudu odpojovače. Vypočtené hodnoty se zejména u kontaktů výrazně liší od jednoduché analytické kontroly oteplení. Důvodem je omezení analytické kontroly pouze na dílčí části proudové dráhy bez vazby na ostatní části odpojovače. Další ze zvolených analýz se zabývala působením sil na odpojovač. Výsledky analýzy ukázaly, že elektrický odpojovač je navržen dobře a působení sil odolal. Poslední z provedených analýz byla elektrostatická analýza. Ta ukázala kritická místa na odpojovači, ve kterých je nejvyšší intenzita elektrického pole a mohlo by případně docházet ke vzniku elektrických výbojů. Rozložení oteplení, mechanického namáhání nebo intenzity elektrického pole může odhalit problematická místa, která by mohla ohrozit funkčnost elektrického odpojovače. Všechny tyto analýzy tak hrají důležitou roli při návrhu a inovaci elektrického odpojovače.

6 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Havelka, Otto a kol. *Elektrické přístroje*. Praha : SNTL, 1985.
- [2] Bárta, Karel a Vostracký, Zdeněk. *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*. Praha : SNTL, ALFA, 1983.
- [3] ČSN EN 62271-1. *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 1: Společná ustanovení*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [4] Katedra fyziky. *Teplo, práce a 1. věta termodynamiky*. [Online] 2005. Dostupné z: <https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYI1/teplo.pr.1.veta.pdf>.
- [5] Katedra fyziky. *Tepelné stroje a 2. věta termodynamiky*. [Online] 2007. Dostupné z: <https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYI1/tepel.str.2.veta.pdf>.
- [6] Katedra fyziky. *Třetí věta termodynamiky*. [Online] 2008. Dostupné z: <https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYI1/3.veta.pdf>.
- [7] Rot, David. Přednášky z předmětu KEE/ZETP. *Vedení, proudění, sálání*.
- [8] Kovařík, Petr. Sdílení tepla. *Termomechanika*. [Online] Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~kovarikp/TM/cviceni/sdileni.pdf>.
- [9] Poláček, David. Diplomová práce. *Numerická analýza oteplení proudové dráhy – metoda tepelné sítě*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [10] Mayer, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus*. České Budějovice : Kopp, 2012. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [11] Plánička, F., Zajíček, M. a Adámek, V. Podpůrné materiály pro studium předmětu Pružnost a pevnost 1. *Tah-Tlak*. [Online] Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp/tah-tlak/shrnuti.pdf>.
- [12] —. Podpůrné materiály pro studium předmětu Pružnost a pevnost 1. *Ohyb (Napjatost)*. [Online] Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp/ohyb-a-napjatost/shrnuti.pdf>.
- [13] —. Podpůrné materiály pro studium předmětu Pružnost a pevnost 1. *Ohyb (Deformace)*. [Online] Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp/ohyb-a-deformace/shrnuti.pdf>.
- [14] —. Podpůrné materiály pro studium předmětu Pružnost a pevnost 1. *Krut a střih*. [Online] Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp/krut-a-strih/shrnuti.pdf>.
- [15] Balatka, Josef. Diplomová práce. *Konstrukční návrh a analýza elektrického odpojovače*.

Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2019.

[16] Sedláček, Jan. Přednášky z předmětu KEE/EPRE. *Návrh odpojovače*. 2017.