

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Numerické analýzy odpojovače vysokého napětí 22kV

Autor práce: **Bc. David Machatý**  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**

---

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David MACHATÝ**  
Osobní číslo: **E21N0010P**  
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**  
Specializace: **Elektroenergetika**  
Téma práce: **Numerické analýzy odpojovače vysokého napětí 22kV**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

## Zásady pro vypracování

1. Zpracujte teoretický úvod zaměřený na odpojovače vysokého napětí, včetně rozboru jejich parametrů a požadavků typové zkoušky.
2. Sestavte geometrický a výpočetní model zadaného odpojovače vysokého napětí.
3. Realizujte vybrané numerické výpočetní analýzy pro definované provozní stavy a zatížení odpojovače.
4. Zhodnotte vypočtené výsledky a přínos realizovaných analýz.


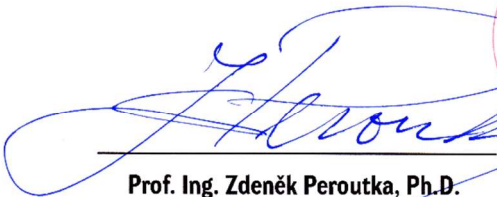
Rozsah diplomové práce: **40 – 60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. Havelka, O., Vávra, Z., Svoboda, D.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů. Skriptata VUT Brno, 1985.
2. Příslušné normy, zejména ČSN EN IEC 62271-102 ED.2 (354210).
3. Uživatelský manuál a dokumentace použitého výpočetního software.

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

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

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

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

V Plzni dne 7. října 2022

## **Abstrakt**

Předložená diplomová práce se zabývá numerickými analýzami odpojovače vysokého napětí 25 kV určeného pro distribuční síť na hladině 22 kV. Analýzy se zaměřují na vybrané disciplíny typové zkoušky. Práce je tak směřována na možnosti virtuálního testování odpojovače využitelné zejména při návrhu a optimalizaci zařízení. K vytvoření geometrického modelu odpojovače byl použit program AutoCAD, pro vlastní numerické analýzy pak programy COMSOL Multiphysics a Ansys Maxwell. V těchto programech byly realizovány analýzy rozložení elektrostatického pole a analýzy silových účinků proudu a tepelného pole z hlediska izolační, zkratové a oteplovací zkoušky.

## **Klíčová slova**

Odpojovač, numerická analýza, normované zkoušky, elektrostatické pole, teplotní pole, silové působení, výpočet sil, COMSOL Multiphysics, Ansys Maxwell

## **Abstract**

Submitted diploma thesis is about the numerical analyzes of medium voltage disconnecter 25 kV made for the distribution network of medium voltage 22 kV. The analyzes are focused on the selected disciplines of the type tests. The thesis is leaded up to the options of virtual testing of the disconnecter that can be used especially in the proposal and optimatization of the device. For the construction of the geometrical model was used program AutoCAD and for the numerical analyzes were used programs COMSOL Multiphysics and Ansys Maxwell. In these programs were realised the analyzes of electrostatic field distribution and analyzes of the force effect of electric current and thermal field from a view of insulating, short circuit and warming test.

## **Key Words**

Disconnecter, numerical analysis, standardized tests, electrostatic field, thermal field, force action, force calculation, COMSOL Multiphysics, Ansys Maxwell

## **Poděkování**

Rád bych tímto stylem poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Janu Sedláčkovi Ph.D. za vhléd a cenné znalosti do problematiky, kterou se tato diplomová práce zabývá. Také děkuji za jeho strávený čas a ochotu pomoci mi při vytváření této práce.

# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Odpojovač.....	- 2 -
1.1 Popis odpojovačů .....	- 3 -
1.2 Dělení odpojovačů.....	- 4 -
1.3 Provedení odpojovačů vysokého napětí .....	- 6 -
2 Typové zkoušky.....	- 7 -
2.1 Seznam typových zkoušek .....	- 7 -
2.2 Zkouška výdržným střídavým napětím .....	- 8 -
2.3 Zkouška trvalým proudem .....	- 9 -
2.3.1 Poloha zařízení při zkoušce .....	- 9 -
2.3.2 Velikost proudu a doba trvání zkoušky .....	- 9 -
2.3.3 Teplota vzduchu v okolí zařízení .....	- 10 -
2.3.4 Vyhodnocení zkoušky.....	- 10 -
2.4 Zkouška krátkodobým a dynamickým výdržným proudem.....	- 12 -
2.4.1 Uspořádání zkoušeného zařízení a zkušebního obvodu.....	- 12 -
2.4.2 Vlastnosti zkušebního proudu a trvání zkoušky .....	- 12 -
2.4.3 Zkoušený objekt po zkoušce.....	- 13 -
3 Použité výpočetní metody .....	- 14 -
3.1 COMSOL Multiphysics .....	- 14 -
3.2 Ansys Maxwell.....	- 15 -
3.3 Analytické metody .....	- 15 -
4 Vybrané problémy pro numerické analýzy .....	- 16 -
4.1 Teplotní pole .....	- 16 -
4.2 Silové působení proudu.....	- 18 -
4.3 Elektrostatické pole .....	- 18 -
5 Realizované výpočetní analýzy .....	- 21 -
5.1 Odpojovač vysokého napětí 25 kV .....	- 21 -
5.2 Materiály jednotlivých komponent .....	- 23 -
5.2.1 Proudová dráha .....	- 23 -

5.2.2	Ostatní kovové části.....	- 23 -
5.2.3	Izolátory .....	- 23 -
5.3	Elektrostatické pole .....	- 24 -
5.3.1	Model pro normálové zatížení (běžný provoz).....	- 24 -
5.3.2	Počáteční a okrajové podmínky pro normálové zatížení .....	- 25 -
5.3.3	Citlivostní analýza vzduchové obálky .....	- 26 -
5.3.4	Výsledky z numerické analýzy pro jmenovité napětí – Ansys.....	- 27 -
5.3.5	Výsledky z numerické analýzy pro jmenovité napětí – COMSOL .....	- 28 -
5.3.6	Výsledky numerické analýzy pro zkoušku výdržným napětím .....	- 29 -
5.4	Tepelné pole .....	- 33 -
5.4.1	Model pro teplotní pole.....	- 33 -
5.4.2	Počáteční a okrajové podmínky .....	- 33 -
5.4.3	Výsledky teplotního pole (jmenovitý proud) – Ansys.....	- 39 -
5.4.4	Výsledky teplotního pole (jmenovitý proud) – COMSOL .....	- 41 -
5.4.5	Výsledky teplotního pole (jmenovitý krátkodobý výdržný proud) – COMSOL -	- 42 -
5.5	Silové účinky proudu .....	- 45 -
5.5.1	Model pro silové účinky proudu.....	- 45 -
5.5.2	Analytický výpočet sil – pravoúhlý záhyb.....	- 45 -
5.5.3	Analytický výpočet sil na nožích odpojovacího ramene .....	- 46 -
5.5.4	Analytický výpočet sil pro ustálený zkratový proud jedné fáze .....	- 48 -
5.5.5	Analytický výpočet sil pro ustálený třífázový symetrický zkratový proud ... .....	- 49 -
5.5.6	Výpočet sil pro třífázový asymetrický zkrat.....	- 51 -
5.5.7	Výsledky numerické analýzy .....	- 53 -
	Závěr .....	- 56 -
	Zdroje.....	- 57 -



## Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
$W_k$	Kinetická energie částic	[J]
$m$	Hmotnost tělesa (látky)	[kg]
$v_i$	Rychlost makroskopického pohybu částic	[m·s <sup>-1</sup> ]
$Q$	Předaná energie mezi dvěma systémy	[J]
$c_{sp}$	Měrná tepelná kapacita látky	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\Delta T$	Rozdíl teplot mezi dvěma systémy	[°C]
$q$	Hustota tepelného toku	[W·m <sup>-2</sup> ]
$\alpha$	Koeficient přestupu tepla	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$T$	Termodynamická teplota	[K]
$T_{ext}$	Termodynamická teplota okolního proudícího média	[K]
$\lambda$	Tepelná vodivost	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$F_2$	Síla působící na vodič	[N]
$l_2$	Délka vodiče	[m]
$I_2$	Proud protékající vodičem	[A]
$B_1$	Magnetická indukce vodiče	[T]
$E$	Intenzita elektrického pole	[V·m <sup>-1</sup> ]
$D$	Elektrická indukce	[C·m <sup>-2</sup> ]
$Q$	Velikost elektrického náboje	[C]
$q$	Velikost prostorové hustoty náboje	[C·m <sup>-3</sup> ]
$U_n$	Jmenovité napětí	[V]
$U_p$	Výdržná hodnota napětí	[V]
$I_n$	Jmenovitý proud	[A]
$I_k$	Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	[A]
$t_k$	Doba působení jmenovitého krátkodobého výdržného proudu	[s]
$R'_s$	Hodnota kontaktního odporu pro jmenovitý proud	[Ω]
$R''_s$	Hodnota kontaktního odporu pro dynamický zkratový proud	[Ω]
$R'''_s$	Hodnota kontaktního odporu pro krátkodobý zkratový proud	[Ω]
$\Delta U_s$	Úbytek napětí v kontaktním místě	[V]
$I_{ri}$	Část jmenovitého proudu přístroje	[A]
$n$	Počet kontaktních palců	[-]
$I_{pi}$	Část dynamického proudu přístroje	[A]
$k_r$	Empirická konstanta zohledňující velikost kontaktních těles	[-]
$\Delta E$	Jouleovy ztráty v kontaktním místě	[J]
$I_{kti}$	Část jmenovitého krátkodobého zkratového proudu přístroje	[A]
$\sigma$	Vodivost	[S·m <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Rezistivita	[Ω·m]
$S$	Styková plocha kontaktu	[m <sup>2</sup> ]
$l$	Šířka kvádru	[m]
$F_k$	Přítlačná síla	[N]
$k$	Koeficient rezistivity materiálu	[-]
$m$	Koeficient styku kontaktů	[-]
$\alpha_k$	Koeficient přestupu tepla prouděním	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_z$	Koeficient přestupu tepla sáláním	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$E_z$	Relativní činitel sálání	[-]
$T$	Teplota povrchu vyzařujícího energii	[°C]
$T_0$	Teplota okolního vzduchu	[°C]
$k_{z,l}$	Korekční činitel	[-]

$\alpha_{zv}$	Výsledný koeficient přestupu tepla sáláním	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
$\theta$	Činitel oteplení	$[\text{°C}]$
$h$	Výška stěny (kratší délka obdélníkové stěny)	$[\text{m}]$
$\varphi$	Úhel odklonu od vvislice	$[\text{°}]$
$J$	Proudová husota	$[\text{A}\cdot\text{m}^{-2}]$
$S$	Průřez vodiče	$[\text{m}^2]$
$\varepsilon_r$	Relativní permitivita	$[-]$
$\rho$	Hustota	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
$\mu_r$	Relativní permeabilita	$[-]$
$F_i$	Amplituda síly působící na pravoúhlý záhyb	$[\text{N}]$
$I_m$	Amplituda procházejícího proudu	$[\text{A}]$
$l$	Šířka obdélníkového vodiče	$[\text{m}]$
$h$	Délka vodiče	$[\text{m}]$
$r$	Tloušťka vodiče	$[\text{m}]$
$k_d$	Činitel uspořádání vodičů	$[-]$
$k_p$	Činitel tvaru průřezu	$[-]$
$a$	Vzájemná středová vzdálenost vodičů	$[\text{m}]$
$b$	Šířka vodiče	$[\text{m}]$
$i$	Okamžitá hodnota ustáleného zkratového proudu	$[\text{A}]$
$I$	Efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu	$[\text{A}]$
$\omega$	Úhlová rychlost	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$
$t$	Čas	$[\text{s}]$
$F$	Síla působící na jednotlivé fáze	$[\text{N}]$
$\tau$	Časová konstanta	$[\text{s}]$

## Úvod

Numerické výpočetní analýzy jsou v průmyslové praxi stále více využívány při návrhu a optimalizaci konstrukce a funkčních parametrů elektrických strojů, přístrojů a dalších prvků elektrizační soustavy. Intenzivně se rozvíjí uplatnění složitých matematicko - fyzikálních modelů a virtuálních dvojčat systémů, které přinášejí detailní informace o zkoumaných zařízeních i finanční úspory při jejich návrhu nebo i následovném provozu.

Cílem práce byla aplikace numerických analýz k vyšetření elektrostatického pole, teplotního pole a silového působení proudu na modelu odpojovače 25 kV s následnou analýzou výsledků. Jednalo se o virtuální ověření parametrů daného přístroje pro vybrané disciplíny typové zkoušky. Výsledkem práce je tak podklad pro posouzení, zda by přístroj v dané zkoušce obstál.

Zároveň práce ukazuje výhody využívání výpočetních analýz pro praxi – detailní posouzení daného problému a možnost řešení komplexních úloh více fyzikálních polí. Výsledky ze simulace silového působení na proudovou dráhu jsou zároveň porovnány i s výsledky z analytického výpočtu provedeného na stejné proudové dráze.

Pro vytvoření modelu byl použit program AutoCAD. K vlastním simulacím byly použity dva výpočetní programy: COMSOL Multiphysics a Ansys Maxwell. Díky tomu se nabízí možnost porovnání výsledků z obou programů i zhodnocení jejich využitelnosti pro dané simulace

# 1 Odpojovač

Odpojovač je dle mezinárodní elektrotechnické komise (IEC) definován jako mechanické spínací zařízení, které poskytuje v otevřené pozici izolační vzdálenost v souladu se specifikovanými požadavky. [1]

Norma ČSN EN IEC 62271-102 ed.2 (354210) ho definuje jako spínací mechanický přístroj, u kterého jeho odpojovací vzdálenost ve vypnutém stavu vyhovuje podmínkám určeným pro odpojení.

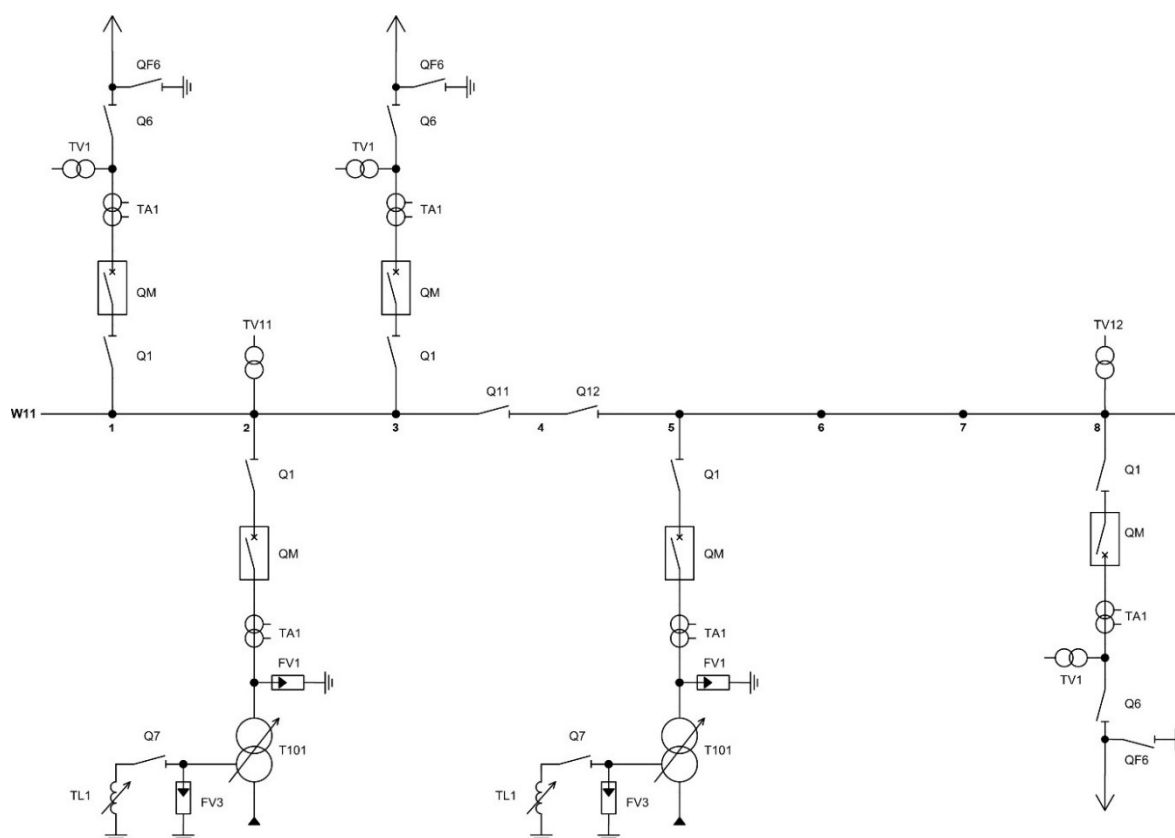
S odpojovačem je možno zapínat a vypínat obvod jen v případě, zapínají-li se nebo vypínají-li se nepatrné proudy nebo dojde-li k nepatrnému rozdílu napětí mezi svorkami téhož pólu. Odborný výraz „nepatrný proud“ se týká proudů, jako jsou například: kapacitní proudy přípojníc, spojek, průchodek, proudy trvale připojených vyrovnávacích impedancí vypínačů, velmi krátkých délek kabelů, a proudy napěťových transformátorů a děličů. Odpojovač dokáže přenášet proud za jmenovitých provozních podmínek i v poruchových stavech, kdy po stanovenou dobu zvládne přenášet vzniklé nadproudy.

Dále norma definuje základní druhy odpojovačů:

- Dělený odpojovač (dělený uzemňovač): Odpojovač (uzemňovač) u kterého se nenachází pevné a pohyblivé kontakty každého pólu umístěny na společné konstrukci nebo rámu.
  - Takové odpojovače jsou například pantografické nebo polopantografické odpojovače uzemňovače)
- Otočný odpojovač: Odpojovač, který má oba kontakty na každém pólu pohyblivé, které se spojí přibližně uprostřed mezi jejich podpěrami.
  - Tento název je používán pouze u odpojovačů na hladině vysokého napětí a vyšších.
- Odpojovač s dvojitou odpojovací drahou: Odpojovač, u kterého dochází k rozpojení proudové dráhy ve dvou bodech.
- Odpojovač s rezistorem: Odpojovač, který má zapojený v sérii nebo paralelně zapojený rezistor ke spínacím kontaktům, což umožňuje zmírnění rychlých přechodných napětí při zapínání a vypínání v kovově krytých rozvaděčích izolovaných plynem. [2]

## 1.1 Popis odpojovačů

Odpojovače se uplatňují k odpojování částí vedení, zařízení, strojů a sítí z důvodu revize, změny řazení nebo opravy. Nejméně jsou odpojovače využívány v sítích nízkého napětí, naopak v sítích vysokého, velmi vysokého a zvláště vysokého napětí jsou nutností. U těchto napěťových hladin je právě důležité, kromě vypnutí obvodu vypínačem, ještě odpojit obvod pomocí odpojovače (viz Obrázek číslo 1). Odpojovače v těchto obvodech mají za úkol zajistit ochranu pracovníků pracujících na odpojených částech zařízení. Je tedy nutné zamezit přestupu napětí z živé části zařízení na odpojenou část i v případě, kdy dojde k nebezpečnému navýšení napětí na živé části zařízení (ať už třeba atmosférickým přepětím anebo spínacími ději). Z toho důvodu musí při vzniku přepětí, které přesahuje izolační pevnost přístroje dojít k přeskoku k zemi, a ne k přeskoku v odpojovací dráze odpojovače.



Obrázek 1: Zapojení odpojovačů v rozvodně (W11 - přípojnice, Q1 - přípojnicový odpojovač, QM - vypínač, Q6 - vývodový odpojovač, QF6 - uzemňovač).

Dle umístění a využití na rozvodně lze rozlišit přípojnicové odpojovače, vývodové odpojovače a odpojovače pomocných přípojníc. Dle zapojení a požadavků zajištění bezpečnosti bývají tyto odpojovače doplněny i o uzemňovače se kterými obvykle tvoří jeden konstrukční celek.

Pohyb zemnicích nožů musí být vázán s pohybem odpojovače takovým způsobem, aby bylo zamezeno situaci, kdy by byl sepnut jak odpojovač, tak zemnicí nůž. Používá se zdvojení tohoto opatření, kdy můžeme spínat a rozpínat odpojovač jen při odpojeném uzemňovači a naopak. U ručně spínaného odpojovače jsou tyto podmínky zajištěny mechanicky a u dálkově spínaných odpojovačů může být tato blokáce provedena elektricky, pneumaticky anebo kombinovaně. [3]

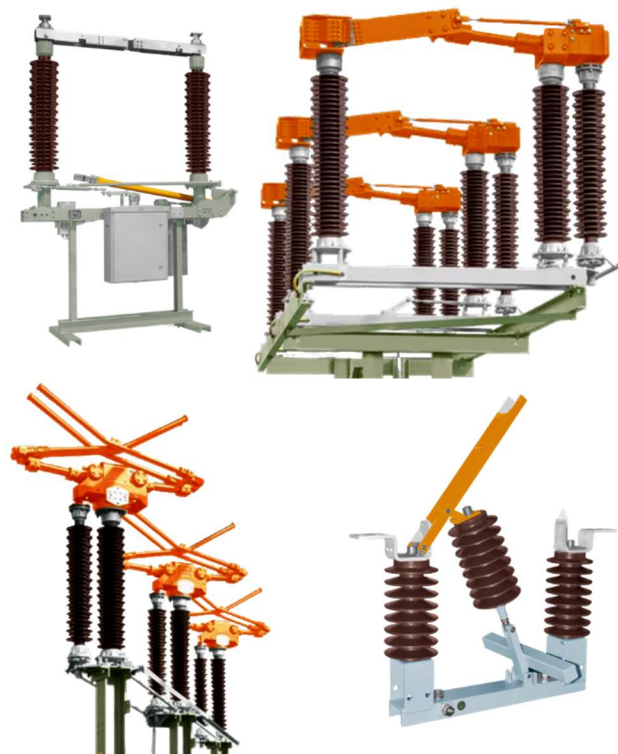
## 1.2 Dělení odpojovačů

Odpojovače dělíme dle:

- Pohybu kontaktů
  - Horizontální
    - Otočné
    - Posuvné
    - S dvojitým pohybem
  - Vertikální
    - Sklápěcí
    - Posuvné
    - Otočné
    - Nůžkové
    - S dvojitým pohybem
- Umístění
  - Venkovní
  - Vnitřní
- Řazení pólů
  - Jednólové
  - Dvoupólové
  - Trojpólové
  - Vícepólové
- Pohonu
  - Ruční pohon
  - Elektrický pohon
  - Pneumatický pohon

- Uzemnění obvodu – uzemňovače
  - Bez zemního nože
  - S jedním zemním nožem
  - Se dvěma zemními noži
- Počtu podpěr
  - Jednopoďerový
  - Dvupodpěrový (třípodpěrový)
- Podle koncepce provedení
  - Horizontální odpojovač
  - Horizontální odpojovač s dvojitou vypínací dráhou
  - Nožový odpojovač
  - Vertikální odpojovač
  - Vertikální sklápěcí odpojovač
  - Pantografický odpojovač

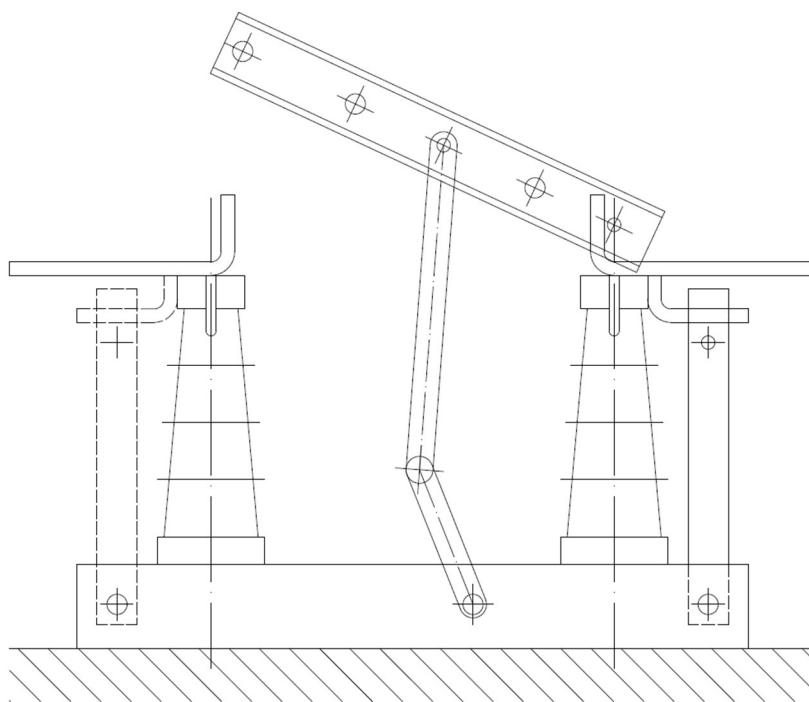
Dle koncepce provedení jsou v České republice nejpoužívanější na hladině vysokého napětí nožové odpojovače, na vyšších napětových hladinách pak odpojovače horizontální, vertikální sklápěcí a pantografické (zobrazené na obrázku 2). [4], [5], [6], [7]



Obrázek 2: Ukázky odpojovačů (zleva shora: horizontální, sklápěcí, pantografický, nožový). [8], [9]

### 1.3 Provedení odpojovačů vysokého napětí

Odpojovače na hladině vysokého napětí jsou nejčastěji konstruovány v provedení s nožovými kontakty dle obrázku 3. Z důvodů, že odpojovače jsou součástí obvodů, kterými mohou protékat nadproudy nebo i zkratové proudy, je nutné, aby dané odpojovače byly na tyto proudy dimenzované (tzn. aby odpojovač snesl tepelné a silové účinky těchto proudů). Proudové dráhy odpojovačů na této napěťové hladině jsou vyráběny především z mědi, která bývá ještě často galvanicky postříbřena. Proudové dráhy jsou upevňovány za pomoci podpěrných izolátorů na ocelovém svařovaném rámu, který je uzemněný. Pohyb kontaktních nožů je poté ovládán pomocí izolovaných táhel. Rozměry odpojovačů vychází z požadovaných izolačních vzdáleností a zatížení proudové dráhy. Vyššímu jmenovitému napětí proto odpovídají větší celkové rozměry.



Obrázek 3: Odpojovač s nožovými kontakty.

Odpojovače vysokého napětí do 12 kV se konstruují téměř výlučně pro vnitřní použití. Pro vysoké napětí nad 12 kV (22 a 35 kV) jsou pak odpojovače konstruovány jak pro vnitřní, tak pro venkovní použití. Pro tyto hodnoty napětí se uplatňují především nožové odpojovače, jejichž ramena se otáčejí ve vertikální rovině. V rozpojeném stavu se kontakty nacházejí nad izolátory, a ne vedle nich jako u horizontálních odpojovačů. V sepnutém stavu je nožový kontakt u těchto zařízení zasunut mezi dvěma a více pružnými lamelovými kontakty (dle velikosti proudu). [3]



## 2 Typové zkoušky

Dle normy ČSN EN IEC 62271-102 ED.2 (354210) je nutno ověřit zkouškami u odpojovačů jejich charakteristiky za takových podmínek, které jsou srovnatelné s podmínkami pro skutečný provoz včetně namontovaných všech součástí potřebných pro provoz tohoto zařízení z toho důvodu, že i tyto součásti mají vliv na jeho provoz.

### 2.1 Seznam typových zkoušek

- Zkoušky elektrické pevnosti izolace
  - Podmínka: Bezpodmínečně povinné pro daný přístroj
- Měření rezistence hlavního obvodu
  - Podmínka: Bezpodmínečně povinné pro daný přístroj
- Zkoušky trvalým proudem
  - Podmínka: Bezpodmínečně povinné pro daný přístroj
- Zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem
  - Podmínka: Bezpodmínečně povinné pro daný přístroj
- Zkoušky mechanické pevnosti
  - Podmínka: Bezpodmínečně povinné pro daný přístroj
- Ověření stupně ochrany krytem
  - Podmínka: Přiřazen IP a/nebo IK kód
- Zkouška rádiového rušení (RIV)
  - Podmínka:  $U_r \geq 245$  kV
- Zkouška těsnosti
  - Podmínka: Řízená, uzavřená nebo hermeticky uzavřená tlaková soustava
- Zkoušky EMC
  - Podmínka: Použití elektronických součástí
- Doplnující zkoušky pomocných a řídicích obvodů
  - Podmínka: Použití pomocných a řídicích obvodů
- Zkouška rentgenového záření
  - Podmínka: Použití vakuových zhášedel
- Zkouška kontaktní oblasti
  - Podmínka: Dělený rám
- Funkce při působení jmenovitého statického mechanického namáhání na svorkách

- Podmínka: Požadavek na mechanické zatížení svorek
- Rozšířené zkoušky mechanické trvanlivosti
  - Podmínka Třída M1 nebo M2
- Zkoušky mechanických blokovacích zařízení
  - Podmínka: použití blokování ovládacího hřídele nebo silového kinematického řetězce
- Funkce v obtížných podmínkách ledu nebo námrazy
  - Podmínka: 10 mm a více
- Zkoušky při nízké a vysoké teplotě
  - Podmínka: pokud nejvyšší okolní teplota  $> +40\text{ }^{\circ}\text{C}$  nebo pokud je nejnižší okolní teplota  $< -5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Zkouška pro ověření správné funkce ukazatele polohy
  - Podmínka: Použití ukazatele polohy
- Zkoušky spínání přenosového proudu přípojnic
  - Podmínka: Schopnost spínání přenosového proudu přípojnic
- Zkoušky spínání nezatížených přípojnic
  - Podmínka: Schopnost spínání nezatížených přípojnic

Tato práce je zaměřena na výpočetní analýzy spojené s vybranými testy typové zkoušky izolační, zkratové a zkoušky na oteplení. Z toho důvodu nejsou ostatní zkoušky již dále detailněji uvedeny. [2]

## 2.2 Zkouška výdržným střídavým napětím

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN IEC 60060-1:2010 (345640). Norma udává, že při vykonávání této zkoušky by se mělo napětí připojovat takové, aby zkouška začala na nízkých hodnotách z důvodu zamezení dopadu spínacího přechodového děje nebo zamezení vlivu v důsledku nekontrolovaných rezonančních podmínek. Zároveň by se v průběhu zkoušky mělo napětí zvyšovat pomalu z důvodu možného odečítání hodnot z měřících přístrojů, ale ne tak pomalu, aby docházelo k nadměrnému prodlužování namáhání zkoušeného přístroje (zejména u napětí blízkých zkušebními hodnotám). Splnění těchto požadavků je prakticky provedeno při navyšování napětí asi o 2 % za sekundu v případě, že je přiložené napětí vyšší než 75 % zkušebního napětí. Po dosažení zkušební hodnoty napětí na objektu se toto napětí musí působit předepsanou dobu a poté je nutné je rychle snížit, nikoliv však náhle odpojit, protože by znovu mohlo dojít ke vzniku spínacích přechodových

přepětí, která by mohla být destruktivní pro měřicí zařízení nebo by mohly znehodnotit výsledky zkoušek.

Délka zkoušky musí být garantována příslušnou technickou komisí a musí být nezávislá na kmitočtu, který se stanovuje v rozmezí 45 Hz až 65 Hz. Pokud komise neurčí jinak, trvání této zkoušky musí být 60 sekund.

Zkoušený objekt projde zkouškou za předpokladu, že při zkoušce nedojde na objektu k průraznému výboji. [10]

### 2.3 Zkouška trvalým proudem

Norma ČSN EN IEC 62271-1:2017 stanovuje stav zkoušeného objektu v době zkoušky, který musí mít čisté kontakty a zároveň by měl být naplněn vhodnou izolační kapalinou nebo plynem, který je pro přístroj předepsán. Tato izolační náplň by měla být při nejmenším provozním tlaku (přetlaku) nebo hustotě pro izolaci.

#### 2.3.1 Poloha zařízení při zkoušce

Měřené zařízení se při zkoušce nachází v uzavřené místnosti bez proudění vzduchu (kromě samovolného proudění vyvolaného generovaným teplem zkoušeného objektu). Ke splnění této podmínky je zapotřebí, aby rychlost vzduchu nebyla větší než 0,5 m/s.

Jak již bylo uvedeno, je nutné, aby měřené zařízení bylo při zkoušce ve stavu odpovídajícímu očekávanému provozu, to je včetně veškerého příslušenství: krytů, řídicího zařízení a všech krytů jak spínacích, tak řídicích zařízení (jediná pomocná zařízení nemusejí být připevněna na zkoušeném objektu). Zároveň při této zkoušce musí být zařízení ochráněno proti přílišnému oteplení nebo ochlazení zvenku.

Pokud výrobce udává pro zkoušený objekt více instalačních poloh, pro účely zkoušky se bere taková poloha, kde by oteplení vyšlo nejnepríznivěji.

#### 2.3.2 Velikost proudu a doba trvání zkoušky

Pro správné provedení zkoušky je nutné, aby zkoušeným zařízením procházel trvalý sinusový jmenovitý proud spínacího a řídicího zařízení.

Tato podmínka je splněna za předpokladu, že efektivní hodnota vyšších harmonických nebude vyšší než 5 % efektivní hodnoty základního proudu. Pokud výrobce vydá souhlas, pak obsah vyšších harmonických může překročit tuhle hodnotu.

Kmitočet se od jmenovité hodnoty může při zkoušce lišit maximálně o +2 % a -5 %. Hodnoty kmitočtu jsou v průběhu zkoušky zaznamenávány do protokolu.

Zkouška se vykonává až do ustálení hodnoty teploty. Tuto podmínku můžeme považovat za splněnou, pokud oteplení měřeného zařízení vzroste o méně než 1 K za 1 hodinu. Splnění této podmínky je obvykle dosaženo při trvání zkoušky shodné s trváním pěti tepelných časových konstant testovaného zařízení.

Dobu trvání zkoušky lze zkrátit přehřátím obvodu vyšším proudem. To neplatí ve chvíli, kdy je nutné změření tepelné časové konstanty.

### 2.3.3 Teplota vzduchu v okolí zařízení

Teplota vzduchu v okolí zařízení při testu je vyjádřena jako průměrná teplota vzduchu v okolí spínacích a řídicích zařízení (u rozvaděčů je to teplota vzduchu na vnější straně krytu). Teplota je během zkoušky zaznamenávána pomocí minimálně tří teploměrů, termoelektrických článků nebo jiných zařízení využívaných pro měření teploty. Tyto přístroje musí být rovnoměrně rozmístěny kolem testovaného zařízení zhruba v místech průměrné výšky proudovodných částí a ve vzdálenosti jednoho metru od zkoušeného objektu. Použité zařízení pro měření teploty musí být ochráněno proti průvanu a sálání.

Aby nedocházelo při měření teploty k rychlým změnám a tím k chybě měření, mohou být tyto přístroje umístěny v menších nádobách s obsahem oleje přibližně 0,5 l.

V průběhu poslední čtvrtiny testování zařízení nesmí dojít k tepelné změně okolního vzduchu větší než 1 K za 1 hodinu. Pokud toto není možné splnit, z důvodu špatných teplotních podmínek zkušební místnosti, může být teplota změřena na stejném spínacím a řídicím zařízení ve stejných podmínkách, ale bez průchodu proudu a takto změřená teplota se bere jako teplota okolního vzduchu. Takovéto pomocné spínací a řídicí zařízení nesmí přijít do kontaktu s přílišným tepelným sáláním.

Teplota okolního vzduchu se v průběhu zkoušky musí pohybovat v rozmezí +10 °C a +40 °C. Pokud se okolní teplota nachází v tomto rozsahu, není nutné provádět žádné korekce hodnot oteplení.

### 2.3.4 Vyhodnocení zkoušky

Testované zařízení vyhovělo zkoušce, jestliže oteplení částí testovaného objektu, pro které jsou předepsány mezní hodnoty, nepřesáhne hodnoty, které určuje tabulka 1.

Tabulka 1: Meze teploty a oteplení pro různé části, materiály a izolace vysokonapěťových spínacích a řídicích zařízení.

Proudová dráha, materiál, izolace		Nejvyšší hodnota	
		Teplota °C	Oteplení při nejvyšší teplotě okolního vzduchu 40 °C K
Kontakty z mědi a slitin mědi bez pokovení	v OG (viz bod 1)	75	35
	v NOG (viz bod 1)	115	75
	v oleji	80	40
Izolanty a kovové části ve styku s izolanty následujících teplotních tříd (viz bod 2)	Y	90	50
	A	105	65
	E	120	80
	B	130	90
	F	155	115
	Email: olejový	100	60
	syntetický	120	80
H	180	140	
	C ostatní izolační materiály	(Viz bod 3)	(Viz bod 3)
Přístupné povrchy, s nimiž není během normálního provozu nutný dotyk	kovové pokovené	80	40
	kovové nepokovené	80	40
	nekovové	90	50

Vysvětlivky:

Bod 1 NOG (neoxidační plyny) jsou pro smysl této normy považovány za nereaktivní plyny, u kterých se na základě jejich provozních zkušeností a chemických charakteristik uvažuje, že nepřispívají k urychlenému stárnutí kontaktů vlivem oxidace nebo koroze.

Mezi NOG patří SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>. Lze je použít čisté nebo jako směs různých NOG.

OG (oxidační plyny) jsou pro smysl této normy považovány za reaktivní plyny, kvůli kterým může docházet k urychlenému stárnutí kontaktů vlivem koroze (přítomnost vlhkosti) nebo vlivem oxidace (z důvodu vlivu okolního vzduchu, který obsahuje kyslík). Mezi OG se řadí okolní vzduch, „suchý“ vzduch, libovolná směs plynů OG a libovolný plyn, který není klasifikován jako NOG.

Bod 2 Jsou používány teplotní třídy izolace podle normy IEC 60085.

Bod 3 Omezení pouze požadavkem k nezpůsobení poškození okolním částem.

## 2.4 Zkouška krátkodobým a dynamickým výdržným proudem

Při této zkoušce jsou testovány hlavní obvody, a u zařízení, kde to přichází v úvahu, tak i uzemňovací obvody testovaného zařízení. Všechny tyto komponenty musí dokázat, že mají schopnost odolat vlivu dynamického výdržného a jmenovitého krátkodobého výdržného proudu pro jmenovitou dobu zkratu.

V případě, že je již zařízení ověřeno na jmenovitý dynamický výdržný proud, mohou být zkoušky provedeny při jmenovitých kmitočtech jak 50 Hz, tak i 60 Hz.

Teplota okolí může být libovolně vhodná po této zkoušce.

### 2.4.1 Uspořádání zkoušeného zařízení a zkušebního obvodu

Předtím, než započnou jednotlivé zkoušky, je u odpojovačů testován jeden spínací cyklus naprázdno a je změřen elektrický odpor obvodu (neplatí pro uzemňovače). U strojně ovládaných přístrojů se vypnutí naprázdno provádí při jmenovité hodnotě napájecího napětí. U přístrojů, které jsou ovládány ručně se musí měřit síla (krotící moment) působící na zařízení.

### 2.4.2 Vlastnosti zkušebního proudu a trvání zkoušky

Velikost střídavé složky zkušebního proudu musí být rovna střídavé složce jmenovitého krátkodobého výdržného proudu  $I_k$  spínacího a řídicího zařízení s možnými tolerancemi a alternativami. Amplituda proudu (u trojfázových obvodů je tato hodnota ta největší z hodnot v jedné z vnějších fází) nesmí být nižší než udávaný jmenovitý dynamický výdržný proud  $I_p$  a zároveň ho nesmí překročit bez souhlasu výrobce o více než 5 %.

U zkoušek trojfázových přístrojů se střídavá složka zkušebního proudu v jakékoliv fázi nesmí lišit o více jak 10 % oproti průměrné hodnotě proudu ve všech třech fázích. Zároveň musí být dodrženo, že průměrná hodnota efektivních hodnot střídavých složek zkušebních proudů nesmí být menší než jmenovitá hodnota.

Pro potřebu testování odpojovače v případě této práce je dovolena následující odchylka z normy:

- Je povoleno oddělit zkoušku dynamickým výdržným proudem od zkoušky krátkodobým výdržným proudem za předpokladu, že:
  - Při zkoušce dynamickým výdržným proudem nesmí být testovací doba, v jejímž průběhu protéká zkratový proud, kratší než 0,3 sekundy.

- U zkoušky krátkodobým výdržným proudem musí být doba po kterou protéká zkratový proud rovna jmenovité době. U tohoto bodu je však dovolená odchylka popsána v normě ČSN EN IEC 62271-1:2017.

### 2.4.3 Zkoušený objekt po zkoušce

Při zkoušce zařízení u něho nesmí dojít k významným poškozením a zařízení musí být schopno dále normálního provozu a přenášet trvale jmenovitý proud.

U zařízení se jmenovitou zapínací anebo vypínací schopností nesmí být kontakty v takovém stavu, aby došlo k ovlivnění spínání u jakéhokoliv zapínacího nebo vypínacího proudu až do jeho jmenovité hodnoty.

Z důvodu ověření podmínek je nutné provést:

- 1) Ihned po zkoušce je u zkoušeného zařízení nutné vypnutí mechanického spínacího přístroje naprázdno. U tohoto děje se musí kontakty rozpojit na první pokus.
- 2) Vizuální kontrolu zkoušeného zařízení a jeho kontaktů.
- 3) Měření rezistence hlavního obvodu zařízení (mimo uzemňovačů). [11]

### 3 Použité výpočetní metody

Numerická analýza je oblast matematiky a počítačového inženýrství, která vytváří, analyzuje a implementuje algoritmy k získávání numerických řešení problémů, které jsou popsány spojitě proměnnými veličinami. Takové problémy jsou obsaženy v oborech jako jsou přírodní vědy, sociální vědy, inženýrství, medicína a ekonomika. Od poloviny dvacátého století, kdy byl velký nárůst ve výkonu a dostupnosti výpočetních zařízení, došlo k nárůstu využívání realistických matematických modelů ve vědě a inženýrství a z toho důvodu byl i rozmach sofistikovanosti numerické analýzy k řešení detailních modelů problémů světa. Působnost numerické analýzy v akademické sféře se vztahuje od teoretických matematických studií až po problémy v počítačové vědě.

Se zvětšující se dostupností počítačů se tento obor objevil v počítačové vědě mezi lety 1980 a 1990. Tato disciplína kombinovala numerickou analýzu, symbolické matematické počítání, počítačovou grafiku a další obory počítačové vědy, aby bylo ulehčeno vytvoření, řešení a interpretování komplikovaného matematického modelu reálnému světu.

Numerická analýza a matematické modelování jsou nezbytné v mnoha ohledech moderního života. Výpočetní softwary pro numerické analýzy jsou běžně používány v praxi, protože dovolují vypočítávat poměrně detailní modely i přes to, že uživatel nemusí znát matematiku v pozadí těchto problémů. Pro dosažení takové úrovně uživatelské transparentnosti je vyžadován spolehlivý, efektivní a přesný software na numerickou analýzu, který má takové uživatelské prostředí, ve kterém je relativně jednoduché namodelovat danou situaci. [12]

#### 3.1 COMSOL Multiphysics

Tento program byl vyvinut jako software pro simulace ve vědecké i inženýrské praxi, speciálně pak pro sdružené jevy a multifyzikální problémy. Software je založen na metodě konečných prvků. V jeho prostředí lze pracovat zejména s těmito fyzikálně založenými problémy: elektrickými, mechanickými, kapalnými, akustickými, tepelnými a chemickými. [13]

Výhodou tohoto programu, oproti dalším obdobným software, je jeho velká otevřenost. Uživatel má možnost vkládat vlastní obyčejné i parciální diferenciální rovnice a rozšiřovat soustavu řešených rovnic, resp. definovat vlastní matematické modely a jejich vazby.

Program má vlastní pestrou knihovnu materiálů pro všechny druhy fyzikálních problémů a zároveň je uživateli dovoleno vkládat materiály vlastní. Program umožňuje



definovat řadu vhodných okrajových a počátečních podmínek pro zajištění co nejpřesnější definice problému.

COMSOL umožňuje řešit úlohy stacionární i časově závislé, lineární i nelineární problémy. Vypočtené výsledky lze dále zpracovat a analyzovat, v programu lze vykreslit mnoho druhů grafů. [14]

### 3.2 Ansys Maxwell

Ansys Maxwell je druhým programem používaným v této práci pro numerické simulace. Primárním důvodem jeho použití bylo licenční omezení programu COMSOL, které neumožňovalo přímo řešit magnetické pole a jeho silové účinky. Následně v něm byly realizovány i další numerické analýzy. Díky tomu bylo možné srovnat jak způsob přípravy a realizace výpočetních úloh, tak získané výsledky a možnosti jejich vyhodnocení.

Stejně jako u COMSOLu se jedná o program pro numerickou analýzu založený na metodě konečných prvků. Program poskytuje řešení simulací jak v časové, tak i ve frekvenční doméně a řešení mohou být stacionární i nestacionární.

Simulace je možné řešit za pomoci přímých i iterativních řešičů. Výhodou tohoto programu je jeho široká knihovna materiálů. Při simulacích je respektována nelinearita materiálů, frekvenční i teplotní závislosti, skin efekt, efekt vířivých proudů, magnetostrikce, demagnetizace i amorfní vlastnosti materiálů.

Díky časově závislé doméně umožňuje program řešení i translačních a rotačních pohybů. [15]

### 3.3 Analytické metody

Analytický výpočet byl v práci proveden pro ukázkou a porovnání silového působení oproti výsledkům numerické analýzy. Síly byly vypočítány pro nože odpojovacího ramene, kde byly analyzovány síly působící na paralelní vodiče obdélníkového průřezu vyvolané protékajícím elektrickým proudem. Dále byly vypočítány síly působící na pravoúhlý záhyb přívodního vodiče a časový průběh sil při zkratovém proudu (symetrickém ustáleném a asymetrickém) na všech třech pólech odpojovače.

## 4 Vybrané problémy pro numerické analýzy

Práce se zabývá numerickou analýzou vybraného odpojovače 25 kV zaměřenou na teplotní a elektrostatické pole a silové účinky proudu.

### 4.1 Teplotní pole

Norma ČSN IEC 60050-841 definuje teplotní pole jako obecný prostor, uvnitř kterého může být přiřazena každému bodu teplota. [16]

Teplota se řadí mezi základní fyzikální veličiny, pomocí které lze určit množství energie obsažené v určitém bodě obecného prostoru. Teplotu lze také definovat jako makroskopické projevy mikroskopického pohybu.

Teplota a teplo jsou dvě různé veličiny, přestože jsou spolu úzce spjaty. Tepelnou energii látky je možné popsat skalární veličinou související s kinetickou energií jednotlivých částic látky a vychází v Joulech (rovnice platí pro energii v jednoatomovém plynu):

$$W_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_i^2 \text{ (J)} \quad (1)$$

Kde:  $W_k$  je kinetická energie částic

$m$  je hmotnost tělesa

$v_i$  je rychlost mikroskopického pohybu částic [17]

Ve světě je mnoho stupnic, které se využívají k označení teploty. Mezi ty nejpoužívanější v technice se řadí Celsiova a Kelvinova. Další používané jsou například Fahrenheitova nebo Réaumurůva.

Teplo je jako každou jinou energii možno přenést ať už v rámci jednoho prostředí nebo mezi prostředím navzájem. Tento jev přenosu energie nastává v případě, že v určitém prostoru existuje teplotní gradient. Z tohoto předpokladu, kdy je díky teplotnímu gradientu v prostředí rozdíl teplot dochází k přenosu (přestupu) energie z prostředí s vyšší teplotou (tepelnou energií) do prostředí s nižší teplotou (tepelnou energií). Tuto zákonitost popisuje druhý termodynamický zákon. Existují tři způsoby šíření tepla:

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

Přenos tepla vedením můžeme pozorovat u pevných těles, mezi kterými jsou nejlepšími vodiči elektrické a tepelné energie kovy. To je zapříčiněno kovovou vazbou, ve kterém

energii přenáší tzv. elektronový plyn (pohyb valenčních elektronů atomů). Elektrony jsou předávané mezi atomy v objektu a mohou se v krystalové mřížce volně pohybovat. Z toho důvodu jsou elektrony způsobilé k rychlému přenosu energie z jednoho místa na druhé. Tuto schopnost přenosu tepla charakterizujeme tepelnou vodivostí  $\lambda$  ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ), která je definována jako množství tepla  $Q$  (J) přenesené skrz stěnu jednotkové tloušťky  $\Delta l$  (m) za jednotku času  $\Delta t$  (s) vyvolané ve směru normály teplotním gradientem  $\Delta T$  (K).

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T \text{ (} Wm^{-2} \text{)} \quad (2)$$

Kde:  $q$  je hustota tepelného toku

$\lambda$  je tepelná vodivost

$T$  je termodynamická teplota

Přenos tepla prouděním se nejvíce projevuje u kapalin a plynů. Přenos tepla z pevného tělesa do plynu můžeme popsat rovnicí pro hustotu konvektivního tepelného toku. Tato rovnice se uplatňuje na rozhraní dvou látek o různém skupenství. Velikosti předávaného tepla je dána několika faktory jako jsou hustota chladícího média, přirozená nebo nucená konvekce média a teplota média. Protože kapalina může téci jak laminárně, tak turbulentně, je u tohoto jevu obtížné předurčit detailně, jak bude přenos tepla vypadat. Rovnice pro hustotu konvektivního tepelného toku lze zapsat jako:

$$q = \alpha \cdot (T - T_{ext}) \text{ (} Wm^{-2} \text{)} \quad (3)$$

Kde:  $q$  je hustota tepelného toku

$\alpha$  je koeficient přestupu tepla

$T$  je termodynamická teplota

$T_{ext}$  je teplota okolního proudícího média [17]

Udávaná rovnice pro hustotu konvektivního toku je zjednodušená z důvodu lehčího počítání přestupu tepla mezi dvěma systémy.

Přenos tepla sáláním je přenos tepla pomocí elektromagnetického záření do prostoru. Tato energie se nejvíce přenáší v plynech a může být přenášena i ve vakuu (z toho důvodu, že k přenosu nevyužívá vzájemné interakce částic).

V této diplomové práci jsou dominantní hlavně dva způsoby přenosu tepla, a to přenos tepla vedením, kdy se teplo přenáší zejména mezi kovovými částmi odpojovače (proudovou drahou) a přenos tepla prouděním, kdy dochází k ochlazení proudové dráhy okolním proudícím vzduchem.

## 4.2 Silové působení proudu

Mechaniku můžeme popsat jako přírodní vědu, která se zabývá vzájemným pohybem těles a jejich vzájemným působením v určené soustavě. [18]

Tato diplomová práce se zabývá silami vyvolanými elektrickým proudem, které působí na proudovou dráhu odpojovače. S ohledem na velké hodnoty proudu se výpočet omezuje pouze na silové účinky magnetického pole. Řešena je Ampérova síla, to je síla působící na dva vodorovně orientované vodiče, kterými prochází elektrický proud. U odpojovače tuto sílu můžeme pozorovat například na odpojovacím rameni nebo v kontaktní hlavici, kde je proud obvykle rozdělen do dvou či více paralelních drah, které na sebe vzájemně působí.

$$\vec{F}_2 = I_2 \cdot (\vec{l}_2 \times \vec{B}_1) \quad (N) \quad (4)$$

Kde:  $F_2$  je síla působící na druhý vodič

$l_2$  je délka druhého vodiče

$I_2$  je proud protékající druhým vodičem

$B_1$  je magnetická indukce prvního vodiče [19]

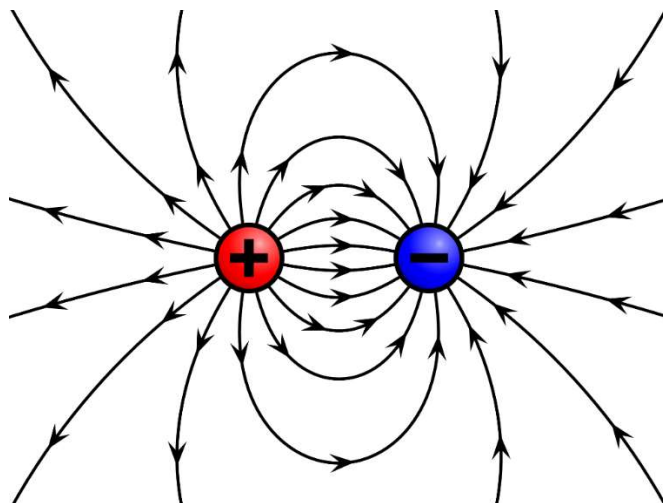
Zároveň je v práci uveden analytický výpočet pro stanovení sil působících na pravoúhlý záhyb, který se nachází na přívodním a vývodovém vodiči odpojovače.

## 4.3 Elektrostatické pole

Elektrostatické pole je generováno v okolí nepohyblivých těles, které jsou nabitý elektrickým nábojem. Elektrický náboj vzniká mnoha způsoby, například přivedením elektrického napětí na vodivé elektrody (kondenzátor) nebo třením dvou různých nevodivých materiálů (klasickým příkladem je tření liščího ohonu o ebonitovou tyč), u kterých elektrony získali třením dostatek energie k tomu, aby přestoupily z povrchu jednoho materiálu na druhý. To zapříčiní navýšení záporného náboje na povrchu daného materiálu, zatímco na původním materiálu zbyly atomy bez elektronů s kladným nábojem tvořeným protony.

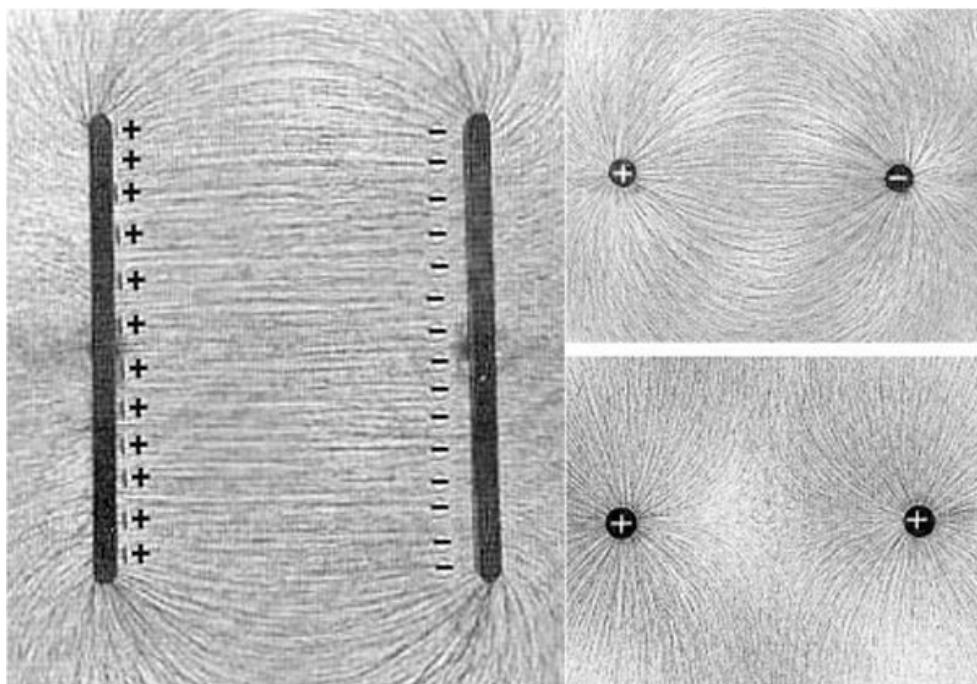
V nevodivém prostoru se mezi takto nabitými tělesy vytváří elektrostatické pole, které vykazuje silové účinky. Pro vizuální znázornění se siločáry tohoto pole zakreslují podle šípek (viz obrázek 4 níže).

Nejvyšší hodnotu elektrostatického pole můžeme pozorovat v blízkosti nabitých těles a tato hodnota poté se zvyšující se vzdáleností od tělesa slábne. Elektrostatické pole se nevytváří uvnitř těles z vodivých materiálů, nabitě částice se nacházejí pouze na povrchu těchto materiálů.



Obrázek 4: Elektrostatické pole mezi dvěma náboji. [20]

Siločáry lze pozorovat i v reálném světě (viz obrázek 5), kdy do prostoru, ve kterém se nachází elektrostatické pole vložíme malé částice dielektrika.



Obrázek 5: Elektrostatické pole znázorněné na reálném pokusu (pole mezi dvěma deskami vlevo a mezi dvěma náboji vpravo). [21]

Elektrický náboj je skalární veličina, která může nabývat jak kladných, tak záporných hodnot. Pro základní popis elektrického pole používáme Maxwellovy rovnice. Jako základní se pro toto pole řadí druhá a třetí Maxwellova rovnice.

Druhá Maxwellova rovnice – Faradayův indukční zákon v integrálním tvaru (kdy se uvažuje nulové indukované napětí – platí pro stacionární tvar):

$$\oint_c E dl = 0 \text{ (V} \cdot \text{m}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

Pro diferenciální tvar platí:

$$\text{rot } E = 0 \text{ (V} \cdot \text{m}^{-1}\text{)} \quad (6)$$

Kde:  $E$  je intenzita elektrického pole

Tato rovnice popisuje elektrické pole tak, že je nevírové.

Třetí Maxwellova rovnice – Gaussův zákon elektrostatiky v integrálním tvaru:

$$\oint_c D dS = Q \text{ (C} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} \quad (7)$$

Pro diferenciální tvar platí:

$$\text{rot } D = q \text{ (C} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} \quad (8)$$

Kde:  $D$  je elektrická indukce

$Q$  je velikost elektrického náboje

$q$  je velikost prostorové hustoty náboje

Tato rovnice říká, že elektrostatické pole je zřídlové, tzn. že zdrojem elektrického pole jsou elektrické náboje. [22]

## 5 Realizované výpočetní analýzy

Tato část práce je zaměřena na popis jednotlivých částí odpojovače, materiálových vlastností a výsledků jednotlivých analýz z výpočetních programů. Analýzy se zaměřují na tyto problémy:

- Síly působící při nárazovém zkratovém proudu
- Elektrostatické pole při jmenovité hodnotě napětí a dočasném přepětí
- Tepelné namáhání stacionární při jmenovitém proudu
- Tepelné namáhání nestacionární při zkratovém proudu

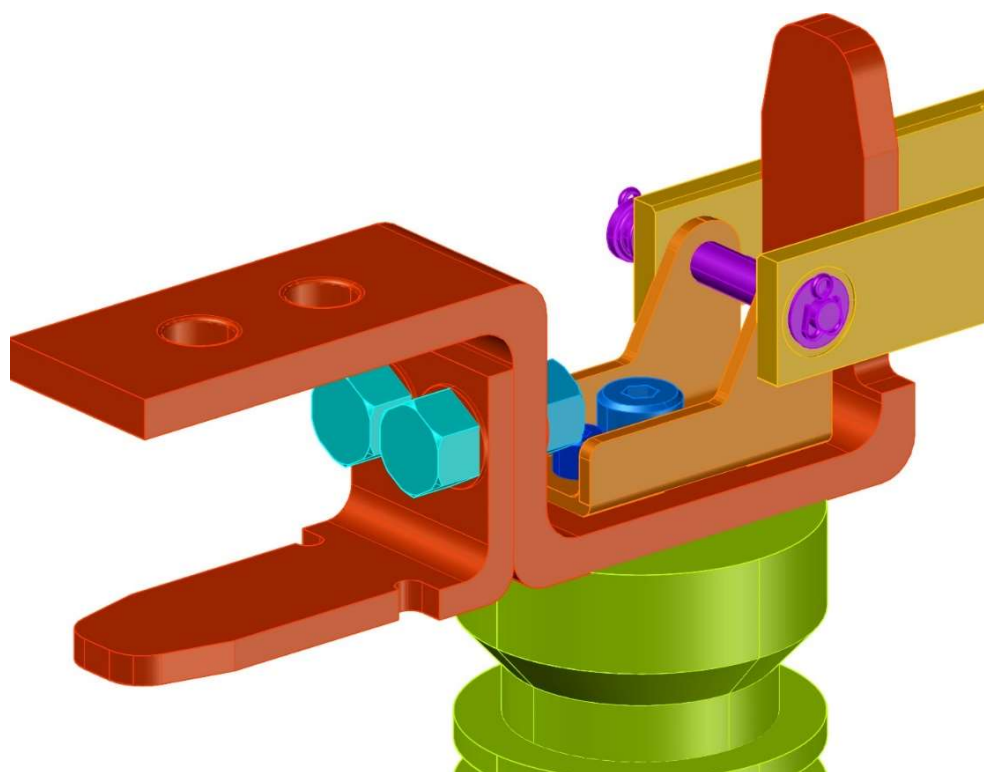
Z důvodu, že licence použitých programů neobsahují všechny potřebné výpočetní moduly, byly některé analýzy provedené jen v jednom z nich.

### 5.1 Odpojovač vysokého napětí 25 kV

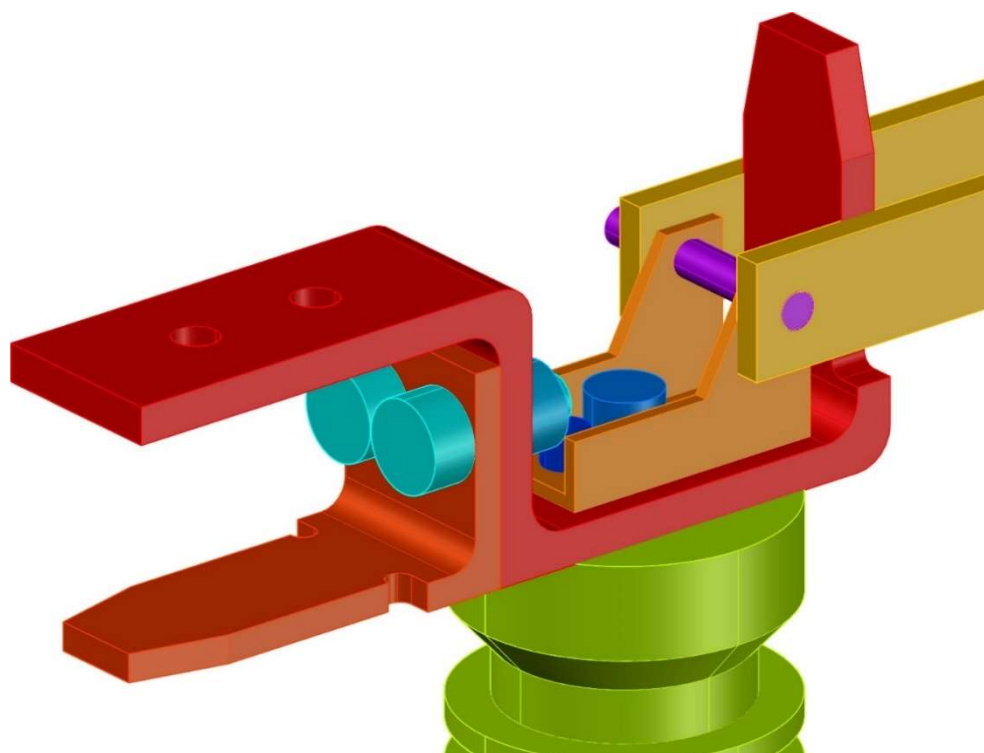
Tabulka 2: Šítkové hodnoty odpojovače.

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

Odpojovač 25 kV je namodelován dle reálné předlohy, která se nachází v laboratoři elektrických přístrojů na Fakultě elektrotechnické ZČU. Geometrický model byl zpracován v programu AutoCAD 2023. Model byl v první fázi vytvořen co nejrealističtější (viz obrázek 6). Pro vlastní výpočetní analýzy pak byla, s ohledem na řešený problém a nároky diskretizace problému - výpočetní síť, provedena nezbytná a vhodná zjednodušení (viz obrázek 7). Zjednodušení spočívá v omezení detailů geometrie šroubů, matic a spojek spojující proudovou dráhu (u spojek zejména k odstranění závlaček a jiných zbytečně složitých geometrických útvarů). Dále bylo potřeba se vyvarovat tangenciálně souběžným křivkám a plochám a mikroplochám, na kterých by se problematicky generovala výpočetní síť. Model je sestaven z jednotlivých dílů, které byly vytvořeny jednotlivě a poté složeny do sestavy. Daný geometrický model byl poté převeden do programu COMSOL a Ansys, kde byly připraveny a provedeny jednotlivé výpočetní analýzy.



Obrázek 6: Detail kontaktního místa odpojovače při realistickém modelování.



Obrázek 7: Detail kontaktního místa odpojovače po zjednodušeném modelování.



## 5.2 Materiály jednotlivých komponent

Jednotlivé části odpojovače jsou vyráběny z různých materiálů, aby měly správné funkční vlastnosti. Danými vlastnostmi jsou zejména elektrická vodivost, elektrická pevnost, korozivzdornost, mechanická odolnost, tepelná odolnost atd.

### 5.2.1 Proudová dráha

Proudová dráha je zhotovena z mědi, která je postříbřena z důvodu lepší kontaktní vodivosti a povrchové ochrany. Odpojovací rameno je tvořeno dvěma pasovými vodiči o délce 364 mm a průřezu 150 mm<sup>2</sup>. Připojovací i zemnicí části odpojovače jsou stejně jako proudová dráha vyrobeny z postříbřené mědi.

V numerických analýzách, zejména na kontaktech, byla uvažována pouze měď z toho důvodu, že v praxi se po vícenásobném sepnutí a rozepnutí odpojovače galvanicky nanesený povlak poruší.

### 5.2.2 Ostatní kovové části

Spojky a další montážní prvky spojující tyto dva pásové vodiče (i obecně spojující části odpojovače, včetně všech závlaček, podložek a pružin) se provádějí z oceli. V praxi jde o povrchově upravenou ocel (zinkování, niklování) nebo nerezovou ocel z důvodu zlepšení chemické odolnosti.

Z oceli je vyroben i nosný rám celého odpojovače u kterého je nejvíce důležitá právě mechanická odolnost. Obvykle je opět pozinkován z důvodu chemické odolnosti.

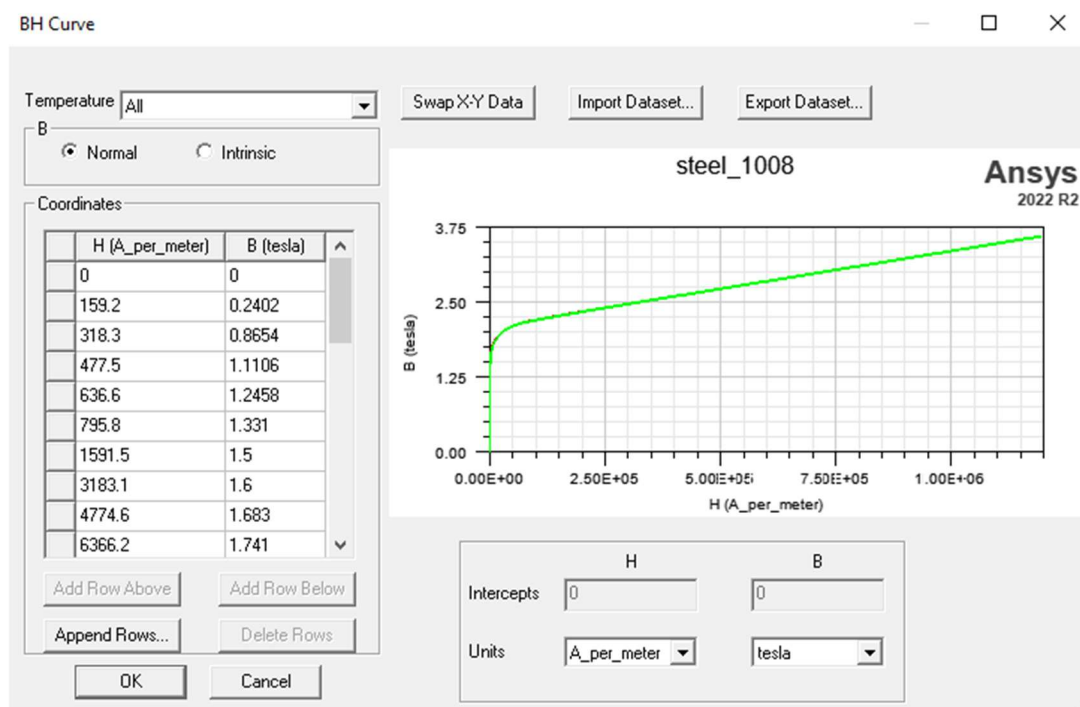
### 5.2.3 Izolátory

Izolátory jsou u odpojovače z epoxidu z důvodu dobré izolační schopnosti i mechanických vlastností. Izolátory obsahují zalité montážní kovové matice a prvky. Izolační ovládací táhla odpojovače jsou provedena z plastu.

Tabulka 3: Vlastnosti jednotlivých materiálů použitých v práci.

Materiál	Měrná tepelná kapacita (Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Tepelná vodivost (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Elektrická vodivost (Sm <sup>-1</sup> )	Relativní permitivita (-)	Hustota (kgm <sup>-3</sup> )	Relativní permeabilita (-)
Hliník	900	238	3,80E+07	Poznámka 1	2700	1
Měď	385	400	5,80E+07	Poznámka 1	8940	1
Epoxid	1,70E-03	0,23	9,87E-14	3	1,15E-03	x
Ocel	475	44,5	4,03E+06	Poznámka 1	7850	B-H char.
Vzduch	x	x	0	1	x	1

Poznámka 1: U simulace elektrostatického pole se pole nevyváří uvnitř vodičů.

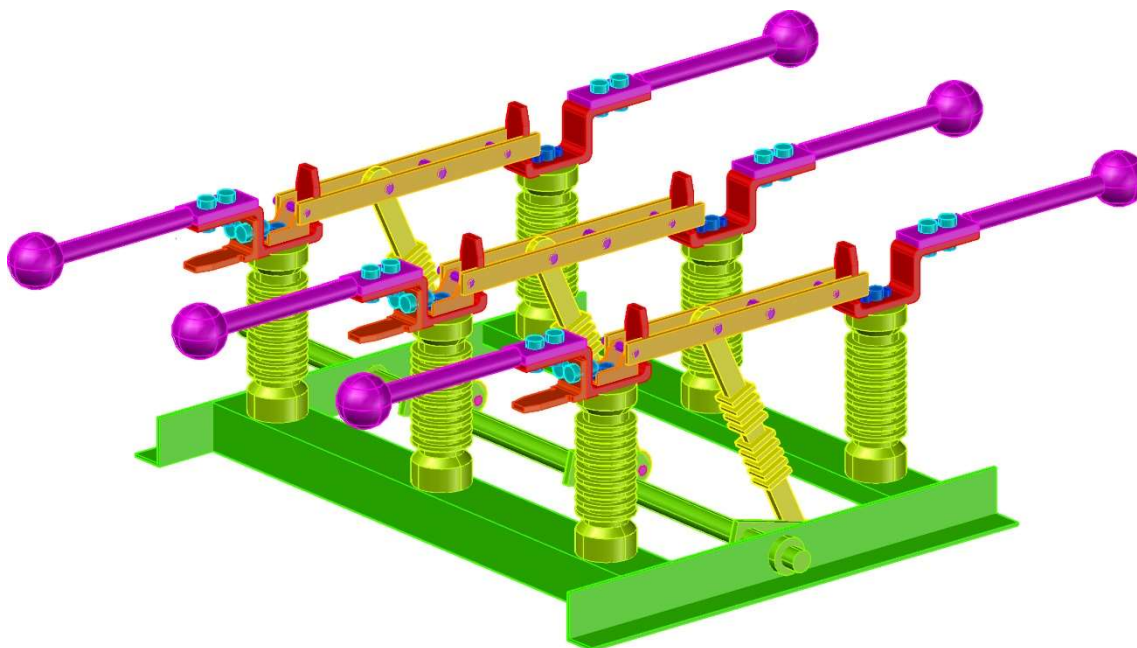


Obrázek 8: B-H charakteristika oceli v programu Ansys Maxwell.

### 5.3 Elektrostatické pole

#### 5.3.1 Model pro normálové zatížení (běžný provoz)

U elektrostatického pole je předpoklad vlivu všech prvků sestavy na výsledek simulace (svařovaný rám, izolátory i proudové dráhy). Z toho důvodu je pro tuto analýzu použit celý model (viz obrázek 9). K modelu byly přidány objekty simulující přívodní AlFe lana. Na konci AlFe lan jsou doplněny kulové elektrody pro omezení hodnot lokální intenzity elektrického pole, která by jinak na jednoduše ukončených přívodních lanech vznikla.



Obrázek 9: Kompletní zjednodušený model odpojovače pro elektrostatické pole.

### 5.3.2 Počáteční a okrajové podmínky pro normálové zatížení

Analýza byla provedena pro maximální amplitudu napětí jedné fáze (prostřední fáze 2) při jmenovitém napětí na napěťové hladině 22 kV. Průběh napětí na všech třech fázích lze vidět na obrázku 10.



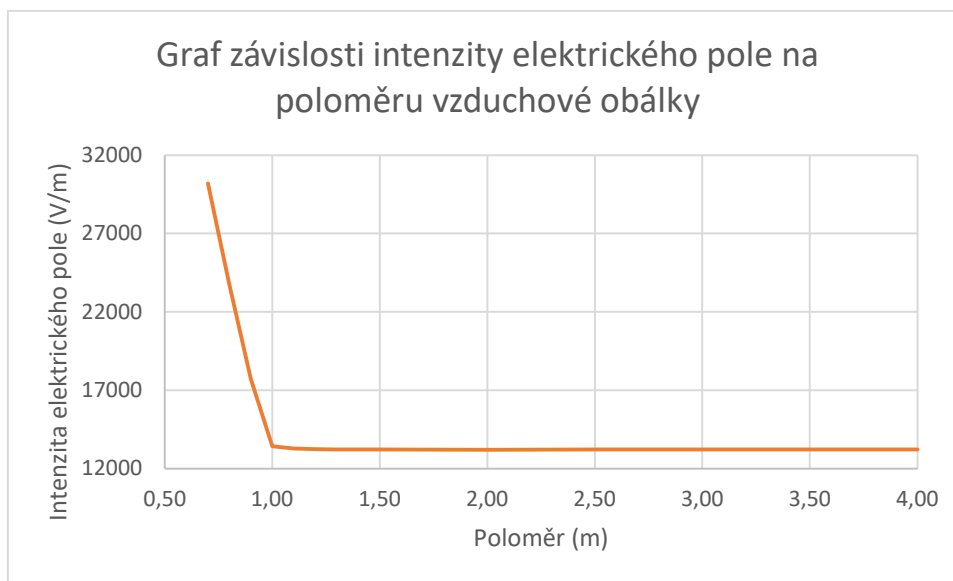
Obrázek 10: Průběh třífázových napětí v čase.

Na fázi 2 byla nadefinovaná okamžitá hodnota napětí 31,12 kV a na ostatní dvě přilehlé fáze -15,56 kV.

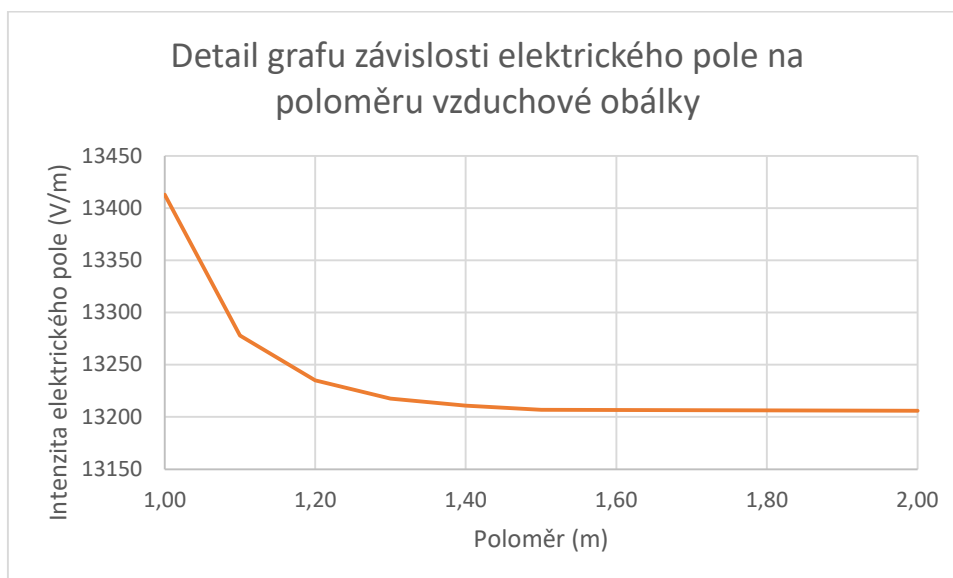
U nosného rámu byl nadefinován nulový potenciál z důvodu uzemnění (dle reálného zapojení v praxi).

### 5.3.3 Citlivostní analýza vzduchové obálky

Pro dosažení co největší přesnosti a zároveň omezení časové náročnosti navazujících dílčích výpočtů, byla v elektrostatické simulaci provedena citlivostní analýza na velikosti výpočetní oblasti. Tato analýza byla prováděna zvětšujícím se poloměrem kulové vzduchové obálky. V jednotlivých modelech se dopočetla velikost průměrné intenzity elektrického pole ve vybrané vnitřní oblasti odpojovače. Výslednou závislost této průměrné intenzity na velikosti modelu lze vidět na obrázku 11 a 12:



Obrázek 11: Graf závislosti průměrné hodnoty intenzity elektrického pole na poloměru vzduchové obálky.



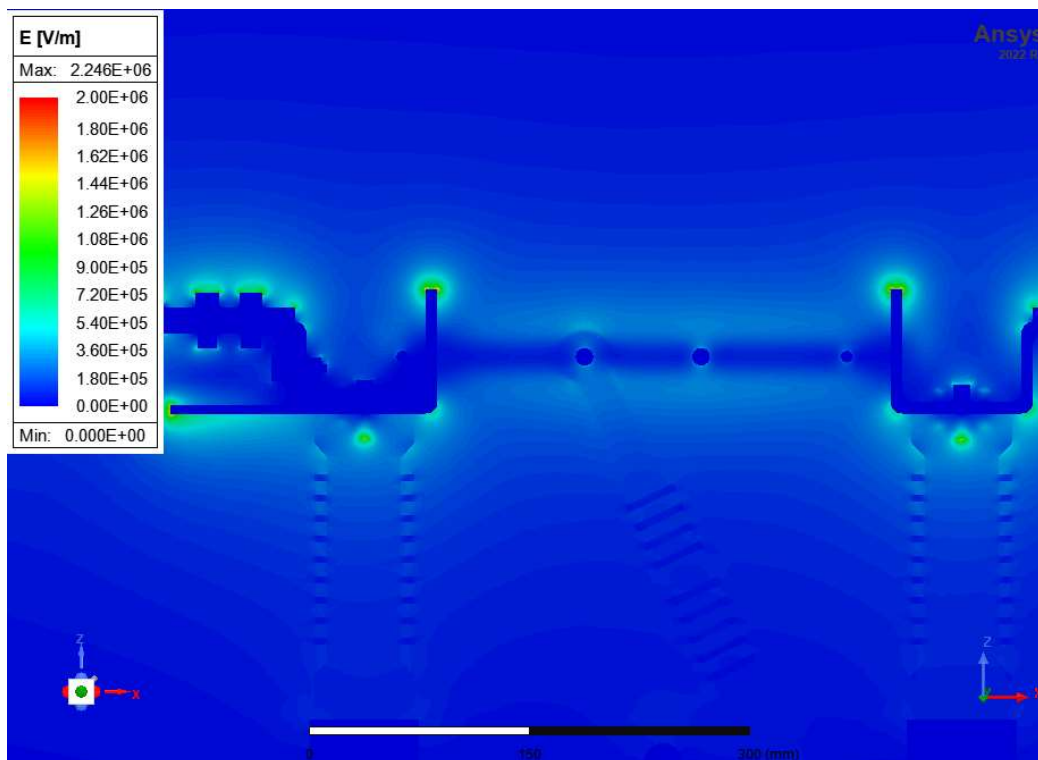
Obrázek 12: Detail grafu závislosti průměrné hodnoty intenzity elektrického pole na poloměru vzduchové obálky.

Velikost poloměru kulové vzduchové obálky byla dle obrázku 11 a 12 zvolena 1,5 metru.

### 5.3.4 Výsledky z numerické analýzy pro jmenovité napětí – Ansys

Analýza byl a provedena v obou výpočetních programech. Díky tomu mohou být výsledky mezi sebou porovnány.

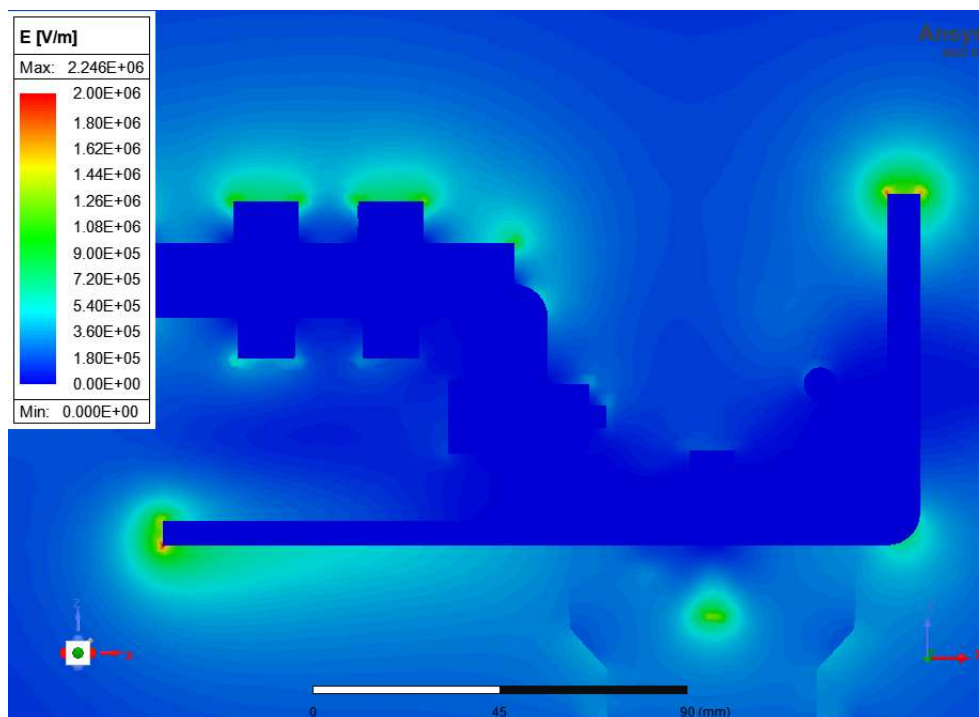
Předpokladem je, že největší hodnota intenzity elektrického potenciálu se objeví u části s největším napětím. Proto je tato část hlavně zaměřena na prostřední (druhou) fázi odpojovače. Rozložení intenzity elektrického pole lze vidět na obrázku 13:



Obrázek 13: Rozložení elektrického pole na prostřední fázi odpojovače.

Vysoké hodnoty intenzity elektrického pole se objevují na ostrých hranách pevných kontaktů přívodních a vývodních vodičů a také na hranách pevného kontaktu pro zemnicí nůž. Tyto intenzity dosahují hodnoty až 2 miliony V/m (největší hodnota 2,25 milionu V/m je na horních ploškách přívodního/vývodového vodiče).

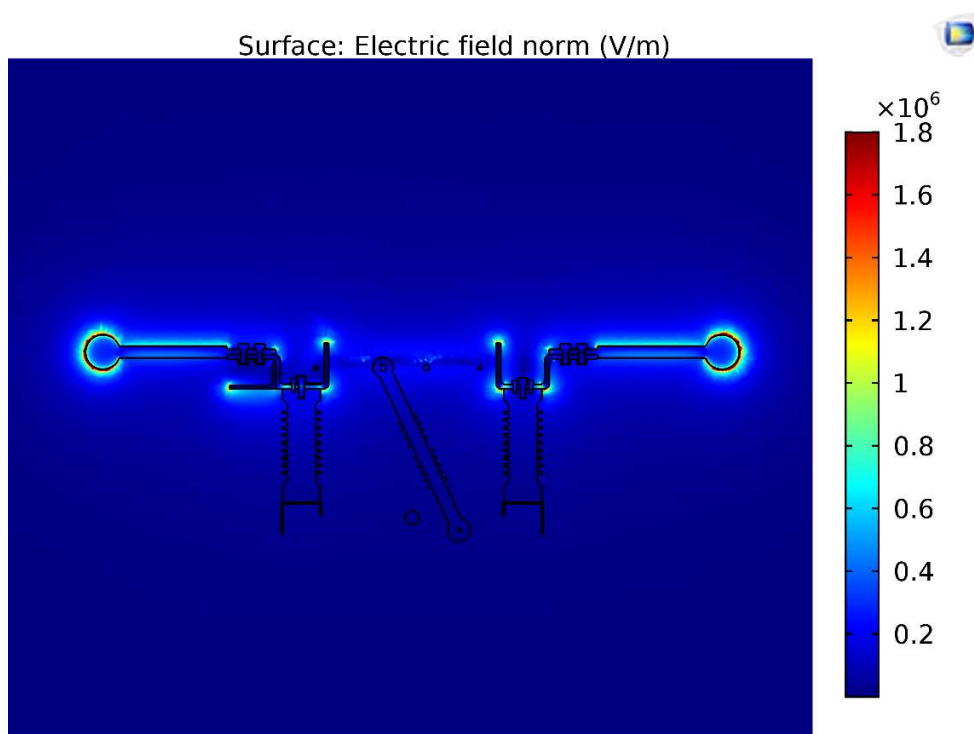
Velké intenzity elektrického pole jsou i na šroubech zapuštěných v izolátorech. To je z důvodu, že uvnitř izolátorů nebyly namodelovány šroubové zapuštění přesně. Detail vývodového vodiče je na obrázku 14.



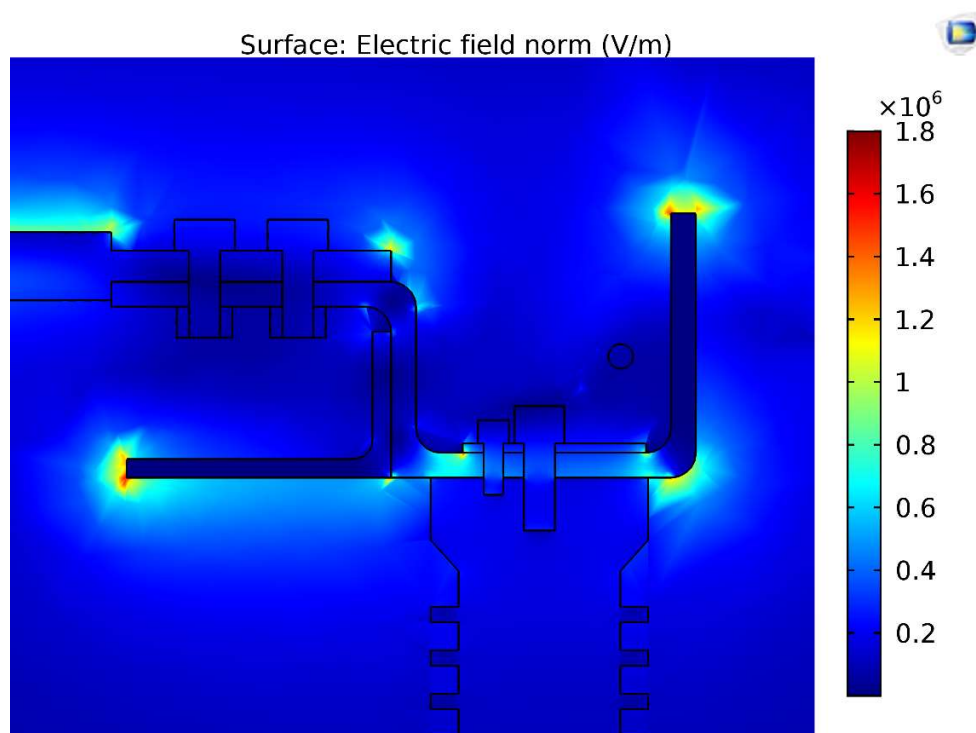
Obrázek 14: Detail elektrického pole na vývodovém vodiči.

### 5.3.5 Výsledky z numerické analýzy pro jmenovité napětí – COMSOL

Stejně jako v programu Ansys byla řešena prostřední fáze odpojovače. Celkové elektrické pole na této fázi je na obrázku 15 a 16:



Obrázek 15: Celkové elektrické pole na prostřední fázi odpojovače.

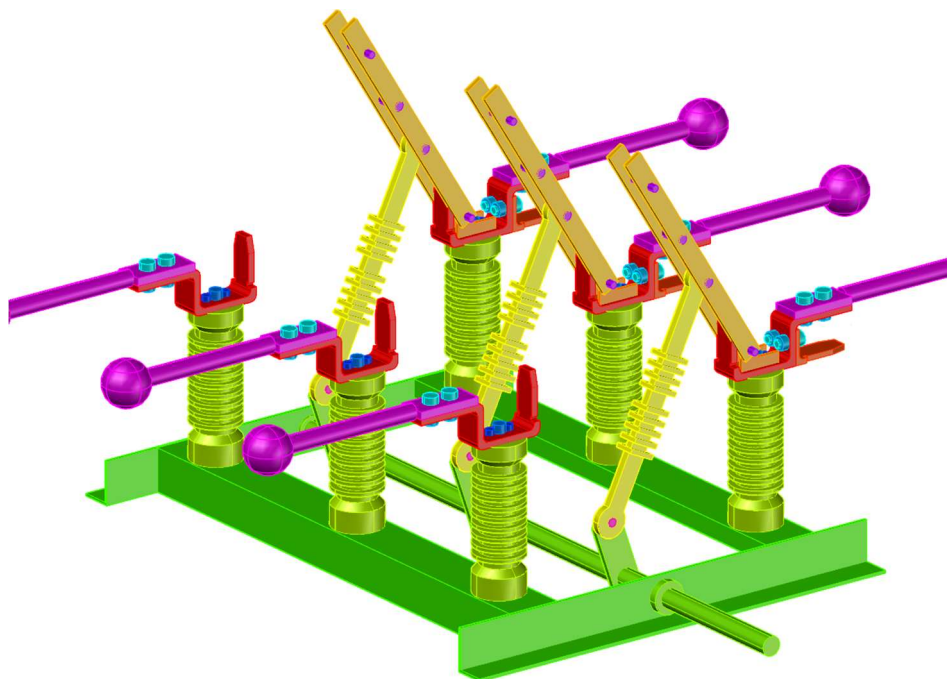


Obrázek 16: Detail vývodové části prostřední fáze odpojovače.

Stejně jako v programu Ansys jsou největší intenzity elektrického pole na vnějších ostrých hranách proudové dráhy. U této simulace vyšly hodnoty intenzity elektrického pole o něco nižší. To může být z důvodu, že každý program výpočetní síť generuje automaticky dle zadaných parametrů a tím může postihovat gradient elektrického pole v různých místech odlišně.

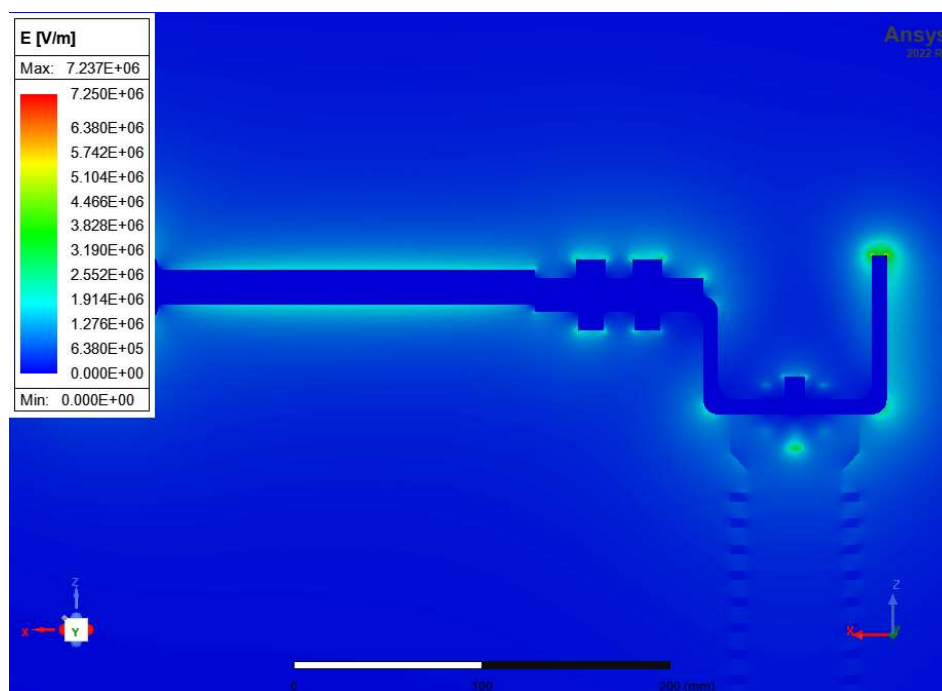
### 5.3.6 Výsledky numerické analýzy pro zkoušku výdržným napětím

Tato simulace je dle normy ČSN EN 62271-1 prováděná na rozpojeném odpojovači (viz obrázek 17) při hodnotě efektivního napětí 50 kV. Tato hodnota (přesněji její amplituda 70,71 kV) byla nastavena na prostřední fázi odpojovače a na ostatní dvě fáze byla nastavena napětí o záporné hodnotě -35,355 kV. Stejně jako u jmenovitého napětí je u této simulace vyšetřován střední pól s největším napětím.



Obrázek 17: Model odpojovače pro zkoušku výdržným napětím.

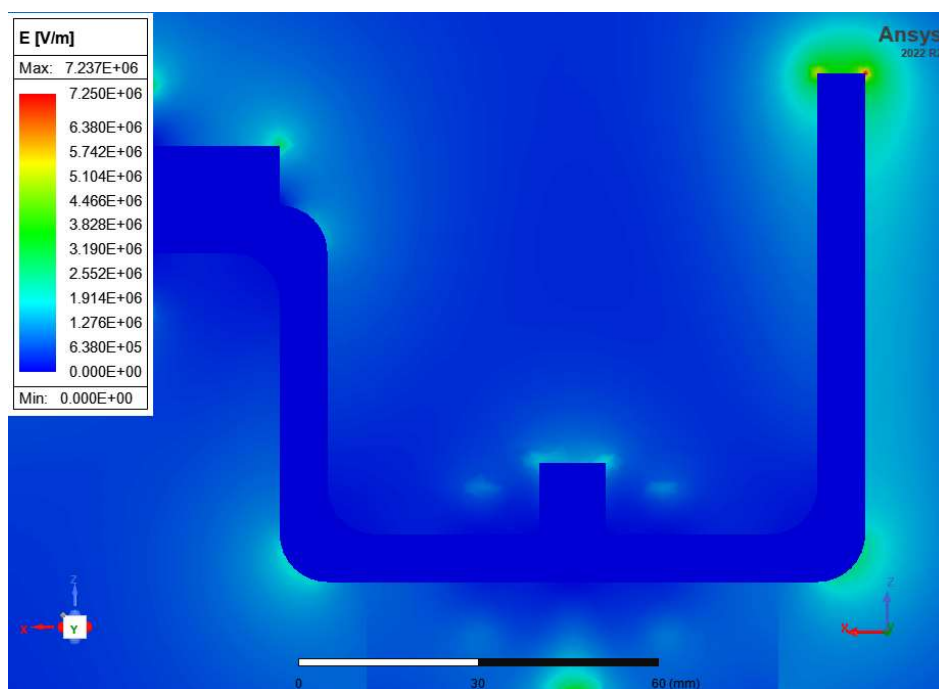
Výslednou intenzitu elektrického pole je na obrázku 18:



Obrázek 18: Rozložení elektrostatického pole na prostřední fázi odpojovače při zkoušce výdržného napětí.

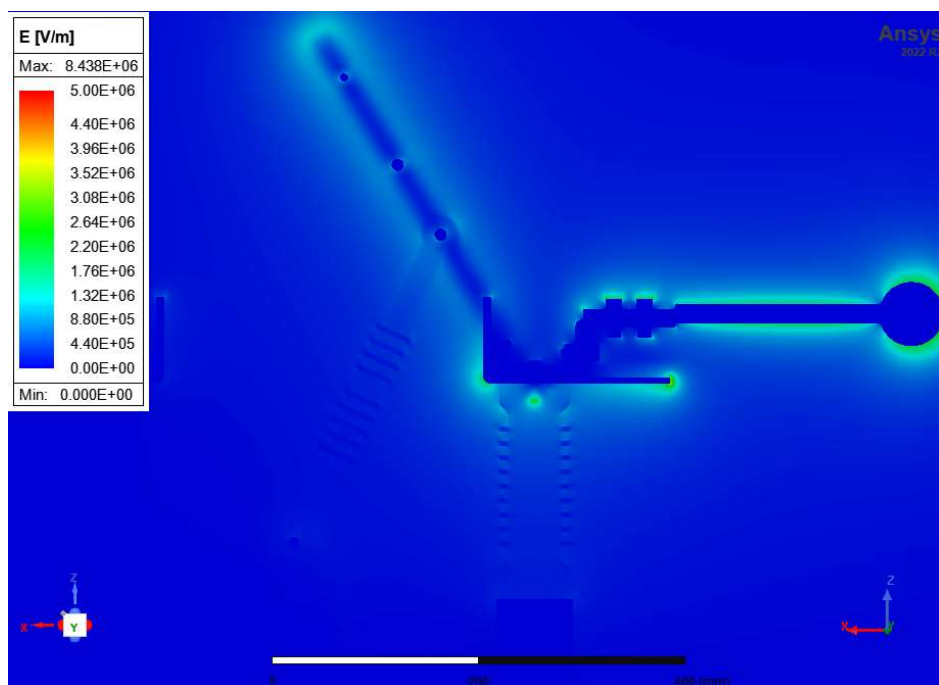


Detail nožové proudové dráhy je na obrázku 19:



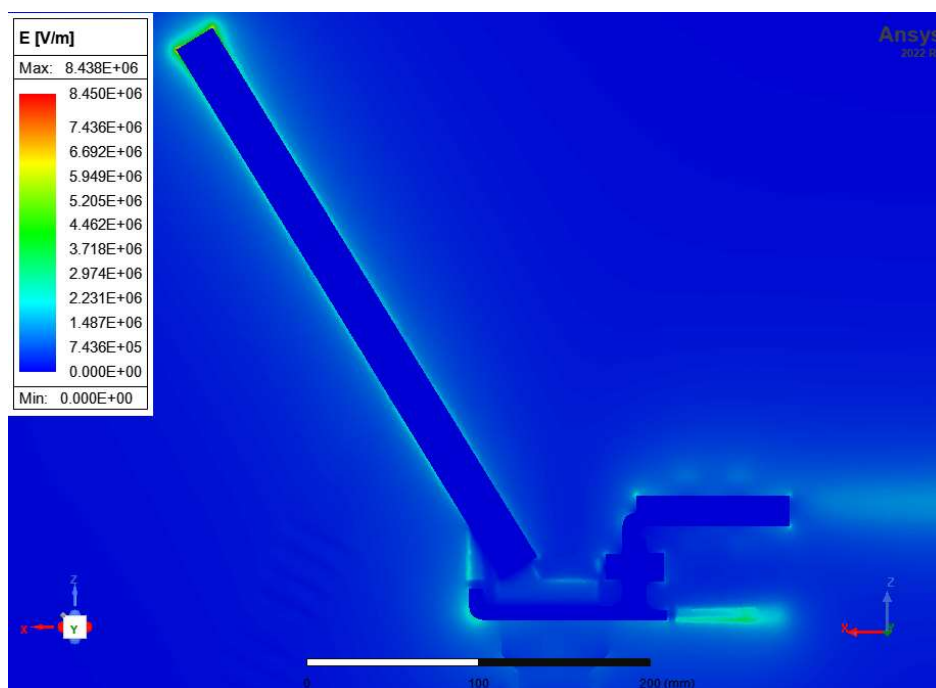
Obrázek 19: Detail nožové proudové dráhy odpojovače.

Pokud bude zkušební napětí aplikováno na druhé straně odpojovače, tedy na straně s odpojovacím ramenem, výsledná intenzita elektrického pole bude dle obrázku 20:



Obrázek 20: Rozložení elektrostatičkého pole na druhé straně prostřední fáze.

Detail rozložení intenzity elektrického pole na proudové dráze lze vidět na obrázku 21:



Obrázek 21: Detail rozložení elektrostatického pole na nožové proudové dráze.

V případě výdržného zkušební napětí aplikovaného na straně s pevnými kontakty, maximální hodnota intenzity elektrického pole dosahuje 7,237 MV/m na hranách vrchní plochy vodiče pevného kontaktu. Pokud bylo toto zkušební napětí aplikováno na straně s odpojovacím ramenem, dosáhla intenzita elektrického pole maximální hodnoty 8,438 MV/m na hranách na konci nožů ramene.

V případě výpočtu pro jmenovité napětí na sepnutém odpojovači byla maximální hodnota intenzity elektrického pole 2,246 MV/m,

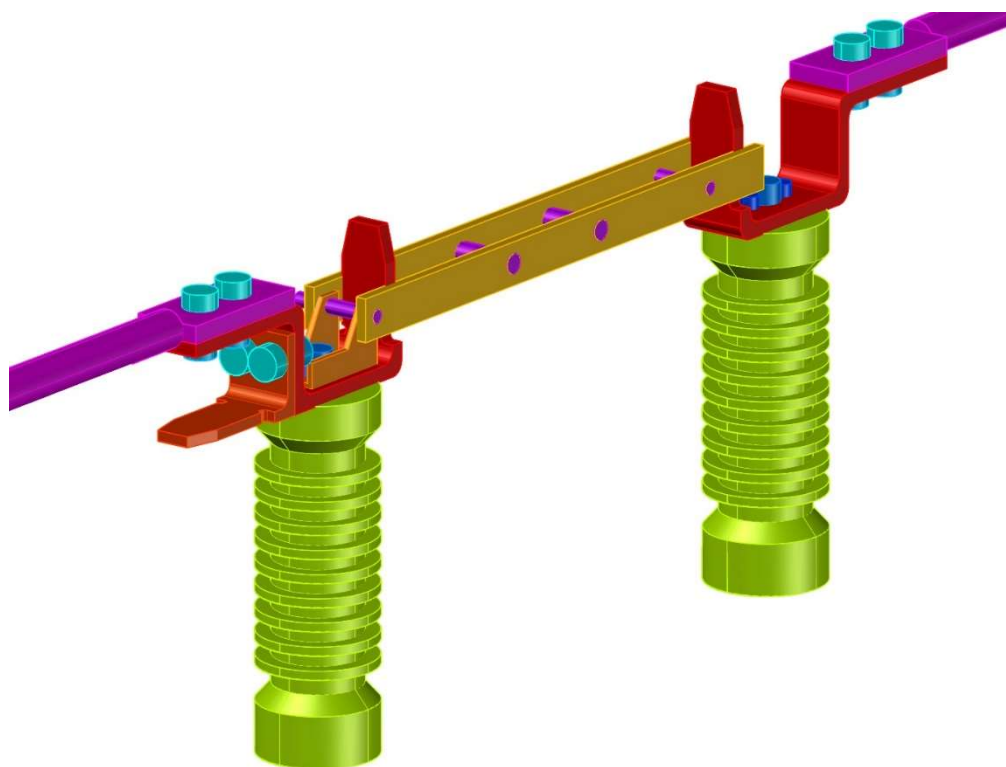
Pokud budeme předpokládat elektrickou pevnost vzduchu 3 MV/m (obecně udávaná hodnota se pohybuje mezi 1 – 3 MV/m), pak lze usoudit, že u sepnutého odpojovače je malá pravděpodobnost výskytu výbojové činnosti. Naopak u obou simulací rozepnutého odpojovače pro zkušební střídavé výdržné napětí, můžeme předpokládat, že v blízkosti hran s maximálními hodnotami by k výbojové činnosti pravděpodobně docházelo. S ohledem na celkové rozložení elektrostatického pole s pouze lokálními vysokými hodnotami intenzity není předpoklad průrazu. Pro přesnější posouzení možného průrazu by bylo nutné aplikovat Townsendovu teorii pro nehomogenní elektrické pole.

## 5.4 Tepelné pole

Simulace pro ustálené oteplení proudové dráhy při zatížení jmenovitým proudem byla řešena v obou programech. Nestacionární simulace jmenovitým krátkodobým výdržným proudem byla řešena jen v programu COMSOL.

### 5.4.1 Model pro teplotní pole

Pro řešení proudového pole (tepelného pole) se předpokládá, že na výsledky nebude mít výrazný vliv rám odpojovače. Z toho důvodu byla pro tuto analýzu využita pouze proudová dráha odpojovače s podpěrnými izolátory (viz obrázek 22).



Obrázek 22: Model odpojovače pro tepelnou analýzu.

### 5.4.2 Počáteční a okrajové podmínky

U této numerické analýzy bylo potřeba vypočítat hodnotu kontaktních odporů proudové dráhy odpojovače pro zohlednění Jouleových ztrát na kontaktech a dále určit koeficienty přestupu tepla do okolí.

#### Výpočet kontaktního odporu

Hodnota kontaktního odporu je důležitá pro výpočet teplotního pole, protože kontaktní spoje vytváří v proudové dráze místa se zvýšeným odporem, což vede ke zvýšenému oteplení v těchto místech.

Požadavky na kontaktní odpor lze odvodit ze tří kritérií pro návrh kontaktů spínacího přístroje. Tato kritéria jsou pro jmenovitý proud  $I_r$ , pro dynamický zkratový proud  $I_p$  a pro jmenovitý krátkodobý proud  $I_{kt}$ .

Na modelu byla řešena v principu dvě místa se stykovým odporem:

- Stykový odpor mezi nožem odpojovacího ramene a pevným kontaktem přívodního (resp. vývodového) vodiče
- Stykový odpor na připojovacích svorkách, tj. mezi AlFe lany a odpojovačem

Následující výpočty jsou v souladu s výpočtem kritérií rezistivit pro stykové plochy mezi nožovou proudovou drahou a přívody proudové dráhy.

- kritérium – pro jmenovitý proud  $I_r$

U tohoto kritéria je důležité určit úbytek napětí mezi kontaktními tělesy. Pro tuto práci byla zvolena hodnota 20 mV, která platí u kontaktů z mědi nebo ze stříbra spínaných alespoň 1x za den.

$$R'_s \leq \frac{\Delta U_s}{I_{ri}} = \frac{\Delta U_s}{\frac{I_n}{n}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{\frac{630}{2}} = 6,35 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (9)$$

Kde:  $R'_s$  je hodnota kontaktního odporu

$\Delta U_s$  je úbytek napětí v kontaktním místě

$I_{ri}$  je část jmenovitého proudu přístroje připadajícího na jeden kontaktní palec

$n$  je počet kontaktních palců

- kritérium – pro dynamický zkratový proud  $I_p$

U tohoto kritéria se určuje úbytek napětí mezi kontaktními tělesy při přechodném ději. Pro výpočet byla zvolena hodnota 430 mV. Hodnota je určena pro měděné kontakty. Dále se ve vzorci objevuje empirická konstanta zohledňující velikost kontaktních těles. Tato konstanta se udává rovna 10 u odpojovačů s ohledem na velká kontaktní tělesa.

Velikost dynamického zkratového proudu je 40 kA (viz kapitola 5.5.6: Výpočet sil pro třífázový asymetrický zkrat).

$$R''_s \leq \frac{\Delta U_s \cdot k_r}{I_{pi}} = \frac{\Delta U_s \cdot k_r}{\frac{I_p}{n}} = \frac{430 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{\frac{40 \cdot 10^3}{2}} \quad (10)$$

$$= 2,15 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Kde:  $R''_s$  je hodnota kontaktního odporu

$\Delta U_s$  je úbytek napětí v kontaktním místě

$I_{pi}$  je část dynamického proudu přístroje připadajícího na jeden kontaktní palec

$k_r$  je empirická konstanta zohledňující velikost kontaktních těles

$n$  je počet kontaktních palců

- kritérium – pro jmenovitý krátkodobý zkratový proud  $I_{kt}$

Pro výpočet tohoto kritéria je potřeba určit tři konstanty: dovolené množství energie uvolněné v kontaktním doteku (Jouleovy ztráty s hodnotou 200 J), empirická konstanta objevující se v minulé rovnici (hodnota zůstává stejná) a doba trvání zkratového proudu (dle štítkové hodnoty).

$$R'''_s \leq \frac{\Delta E \cdot k_r}{I_{kti}^2 \cdot t_k} = \frac{\Delta E \cdot k_r}{\left(\frac{I_{kt}}{n}\right)^2 \cdot t_k} = \frac{200 \cdot 10}{\left(\frac{16 \cdot 10^3}{2}\right)^2 \cdot 1} \quad (11)$$

$$= 3,13 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Kde:  $R'''_s$  je hodnota kontaktního odporu

$\Delta E$  jsou Jouleovy ztráty v kontaktním místě

$I_{kti}$  je část jmenovitého krátkodobého zkratového proudu přístroje připadající na jeden kontaktní palec

$k_r$  je empirická konstanta zohledňující velikost kontaktních těles

$t_k$  je doba trvání zkratového proudu

Z kritérií je pro další výpočty použita nejnižší hodnota výpočtového odporu, která na kontakty klade největší nároky. V tomto případě jde o stykový odpor z kritéria pro jmenovitý krátkodobý zkratový proud  $I_{kt}$ .

Do výpočetních modelů byl stykový odpor zadáván přes vyčleněné malé objemy na kontaktních rozhraní (reprezentující stykové plochy), které mají vodivost odpovídající při daných rozměrech oblasti velikosti stykového odporu. Aby tyto objemy – kvádry ovlivňovaly kontaktní oblast co nejméně, je jejich tloušťka jen 1 milimetr.

Výpočet vodivosti pro dané objemy vychází ze vztahu pro výpočet rezistivity:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\frac{R''_s \cdot S}{l}} \quad (Sm^{-1}) \quad (12)$$

Kde:  $\sigma$  je vodivost

$\rho$  je rezistivita

$R''_s$  je hodnota kontaktního odporu

$S$  je styková plocha kontaktu

$l$  je šířka kvádru

Aby bylo možné docílit u kontaktního spoje nožů s pevnými kontakty stykového odporu  $313 \mu\Omega$ , je nutné, aby na nože působila minimální přitlačná kontaktní síla vypočtená ze vztahu 13.

$$F_k = \left( \frac{k}{R_{smin}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (N) \quad (13)$$

Kde:  $F_k$  je potřebná přitlačná síla

$k$  je koeficient rezistivity materiálu

$R_{smin}$  je minimální hodnota odporu

$m$  je koeficient styku kontaktů

Koeficient rezistivity materiálu je udáván v rozmezí  $1,5 - 40 \text{ m}\Omega$  v závislosti na stavu kontaktů a výskytu povrchových vrstev. Pro tuto práci byl vybrána hodnota  $6 \text{ m}\Omega$ .

Koeficient styku kontaktů je udáván v rozmezí  $0,6 - 1$ . Protože se na sebe kontakty dosedají plošně, byla vybrána hodnota  $1$ .

Po dosažení hodnot vyšla minimální potřebná síla necelých  $192 \text{ N}$ . Tato síla je zajištěna kontaktními pružinami na obou koncích odpojovacího ramena. [23]

### Určení koeficientu přestupu tepla do okolí

Koeficient přestupu tepla je veličina udávající velikost tepelného toku předávaného z tělesa do okolí. Značí se  $\alpha$  a vychází v jednotkách  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Velikost tohoto koeficientu obecně závisí na hustotě média přebírající teplo, jeho rychlosti, teplotě i na poloze dané plochy. [17]

U výpočtu koeficientu je nedílnou součástí i přenos tepla sáláním.

Celkový koeficient je tedy složen ze součtu těchto dvou složek (viz rovnice 14). Toto lze uplatnit za předpokladu shodnosti chladících ploch i míry oteplení vůči okolí. Pro řešenou úlohu je tato podmínka splněna.

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_z \text{ (} Wm^{-2}K^{-1} \text{)} \quad (14)$$

Kde:  $\alpha$  je celkový koeficient přestupu tepla do okolí

$\alpha_k$  je koeficient přestupu tepla prouděním (konvekci)

$\alpha_z$  je koeficient přestupu tepla sáláním (zářením)

Koeficient přestupu tepla zářením do volného prostoru lze vypočítat dle vztahu 15:

$$\alpha_z = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot E_z \cdot (T^2 + T_0^2) \cdot (T + T_0) \text{ (} Wm^{-2}K^{-1} \text{)} \quad (15)$$

Kde:  $\alpha_z$  je koeficient přestupu tepla sáláním (zářením)

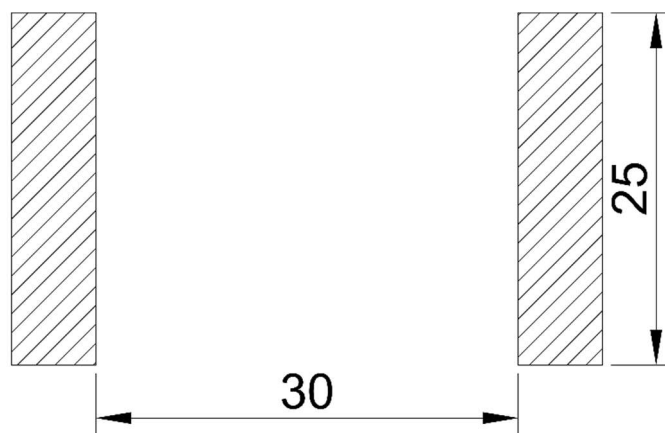
$E_z$  je relativní činitel sálání (emisivita)

$T$  je teplota povrchu vyzařujícího energii

$T_0$  je teplota okolního vzduchu

Hodnota relativního činitele sálání  $E_z$  je dle stavu povrchu mědi udávána v rozsahu 0,1 a 0,8. V práci je uvažován vliv oxidačního prostředí (vzduchu) a pro takový případ je právě koeficient 0,8.

V případě, kdy dochází k vzájemnému ovlivňování se více sálavých povrchů u sebe (u odpojovače například nože proudové dráhy viz obrázek 23), je nutné koeficient přestupu tepla zářením korigovat činitelem  $k_{z1}$ .



Obrázek 23: Rozvržení vodičů nožové proudové dráhy pro výpočet zpřesňujícího koeficientu  $k_{z1}$  (v mm).

Výpočet korekčního činitele  $k_{z1}$  následovný:

$$k_{z1} = \frac{h + a - \sqrt{h^2 + a^2}}{h} \quad (16)$$

Kde:  $k_{z1}$  je korekční činitel

$h$  je výška proudové dráhy

$a$  je mezera mezi vodiči

Výsledný koeficient přestupu tepla sáláním je:

$$\alpha_{zv} = \alpha_z \cdot k_{z1} \quad (Wm^{-2}K^{-1}) \quad (17)$$

Kde:  $\alpha_{zv}$  je výsledný koeficient přestupu tepla sáláním

$\alpha_z$  je koeficient přestupu tepla sáláním bez uvažování korekčního činitele

$k_{z1}$  je korekční činitel

Koeficient přestupu tepla prouděním byl počítán dle vzorců daných uspořádáním vyšetřované plochy proudové dráhy a izolátoru. V práci jsou použity tři případy uspořádání:

- Příklad krátké svislé stěny
- Příklad vodorovné plochy, která je chlazená směrem nahoru
- Příklad chlazení vodorovné plochy, která je chlazená směrem dolů

Výpočet koeficientu přestupu tepla pro krátkou svislou stěnu:

$$\alpha_k = 1,35 \cdot \left(\frac{\theta}{h}\right)^{0,25} \quad (Wm^{-2}K^{-1}) \quad (18)$$

Kde:  $\alpha_k$  je koeficient přestupu tepla prouděním (konvekci)

$\theta$  je činitel oteplení

$h$  je výška stěny

Výpočet koeficientu přestupu tepla vodorovnou plochu chlazenou směrem nahoru:

$$\alpha_k = 1,3 \cdot \left(\frac{\theta}{h}\right)^{0,25} \quad (Wm^{-2}K^{-1}) \quad (19)$$

Kde:  $\alpha_k$  je koeficient přestupu tepla prouděním (konvekci)

$\theta$  je činitel oteplení

$h$  je kratší délka obdélníkové plochy

Výpočet koeficientu přestupu tepla vodorovnou plochu chlazenou směrem dolů:

$$\alpha_k = 0,6 \cdot \left(\frac{\theta}{h}\right)^{0,25} \quad (Wm^{-2}K^{-1}) \quad (20)$$

Kde:  $\alpha_k$  je koeficient přestupu tepla prouděním (konvekci)

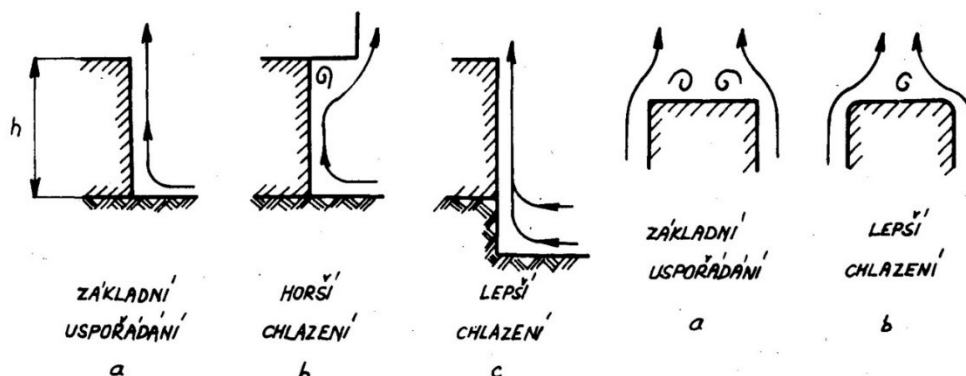
$\theta$  je činitel oteplení

$h$  je kratší délka obdélníkové plochy

Dále se u modelu objevují plochy, které jsou odkloněny od svislice o úhel  $\varphi$ . U nich se koeficient počítá stejně jako pro krátkou svislou stěnu, jen je tato hodnota navíc násobena činitelem  $(\cos \varphi)^{0,25}$ .



Protože jsou dané rovnice uvažovány pro ideální případy (například výpočet pro svislou stěnu je uvažován pro případ dle obrázku 24a vlevo nebo uspořádání 24a vpravo pro plochu chlazenou nahoru), je nutné odlišné případy korigovat odhadem. [24]



Obrázek 24: Uspořádání chlazených ploch. [24]

Pro stanovení míry ochlazování jednotlivých ploch modelu odpojovače bylo použito 14 různých hodnot koeficientu přestupu tepla v rozmezí od 0 do  $19 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Hodnoty byly vypočteny dle uvedených vztahů.

### Vstupní proudová hustota u teplotního pole

V programu COMSOL je nutné pro simulaci teplotního pole zadat procházející proud hodnotou proudové hustoty  $J$ . To je provedeno přes poměr procházejícího proudu k průřezu plochy, kterou proud prochází. V případě testovaného modelu vyjde:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{I}{\pi \cdot (r)^2} = \frac{630}{\pi \cdot (11 \cdot 10^{-3})^2} = 16573159,36 \text{ Am}^{-2} \quad (21)$$

Kde:  $J$  je proudová hustota

$I$  je jmenovitý procházející proud

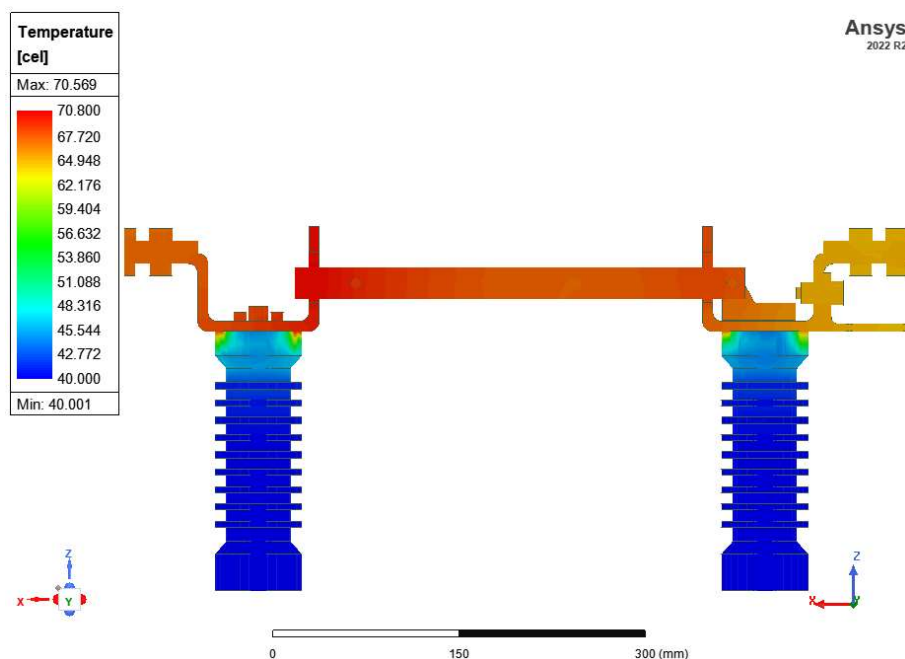
$S$  je plocha průřezu vodiče, přes kterou proud prochází

Pro výpočet teplotního pole a elektromagnetické síly v programu Ansys Maxwell je procházející proud zadán přímo v Ampérech.

### 5.4.3 Výsledky teplotního pole (jmenovitý proud) – Ansys

Teplotní pole bylo modelováno pomocí dvou výpočetních softwarů systému Ansys: Maxwell a Mechanical. V modulu Maxwell byl řešen průchod střídavého harmonického elektrického proudu (ACConduction). Následně byly výsledky z tohoto modulu použity pro výpočet oteplení v modulu Mechanical Thermal. Pro přesnější řešení byla v tomto výpočetním modelu použita možnost obousměrného sdružení obou softwarů

„two way coupling“. To zaručuje přesnější počítání ztrát vlivem změny vodivosti materiálu v závislosti na teplotě. Výsledné oteplení proudové dráhy je na obrázku 25.

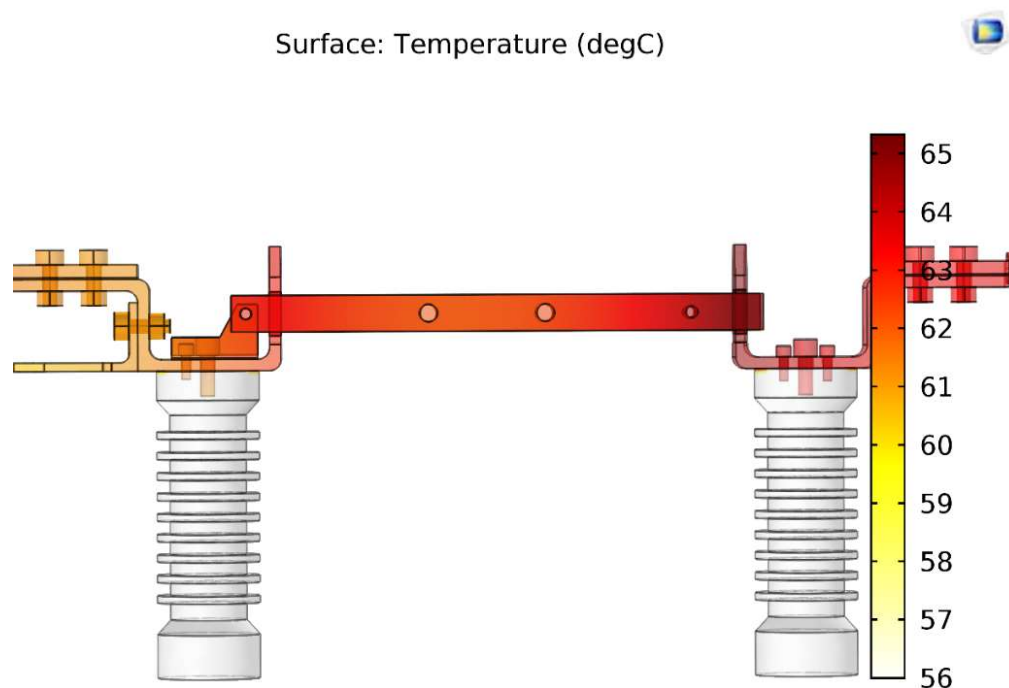


Obrázek 25: Celkové oteplení proudové dráhy v programu Ansys.

Nejvíce zahřáté místo odpojovače je styková plocha přívodního vodiče (na straně bez uzemňovače). Zde teplota dosáhla až k 70,5 °C. Je to z důvodu, že kolem tohoto vodiče je méně materiálu, kam by mohlo teplo přecházet a zároveň je i kolem tohoto místa menší chladicí plocha než na druhé části odpojovače. Druhá strana odpojovače je o asi 3 °C chladnější.

#### 5.4.4 Výsledky teplotního pole (jmenovitý proud) – COMSOL

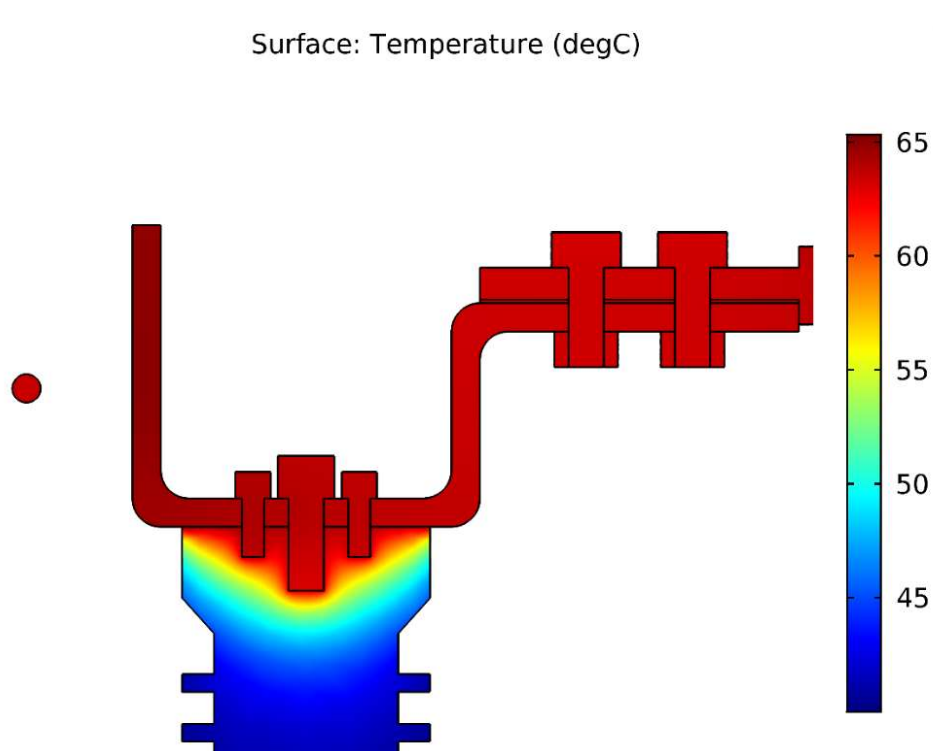
Simulace v tomto programu byla řešena přes modul Joule Heating, který již sdružuje elektrické proudové a tepelné pole. Výsledky simulace lze vidět na obrázku 26.



Obrázek 26: Výsledné oteplení proudové dráhy odpojovače v programu COMSOL.

Stejně jako v programu Ansys je nejteplejší místo na přívodu odpojovače (zde vpravo). Oproti předchozí simulaci je tato hodnota o 5,5 stupně nižší. To je dáno pravděpodobně rozdílnou výpočetní sítí modelu.

Tepelná stupnice vpravo neukazuje nejnižší teplotu 40 °C (teplota okolí) z důvodu posunutí spodní hranice kvůli přehlednosti obrázku. Na dalším obrázku 27 lze vidět detail přívodního vodiče.



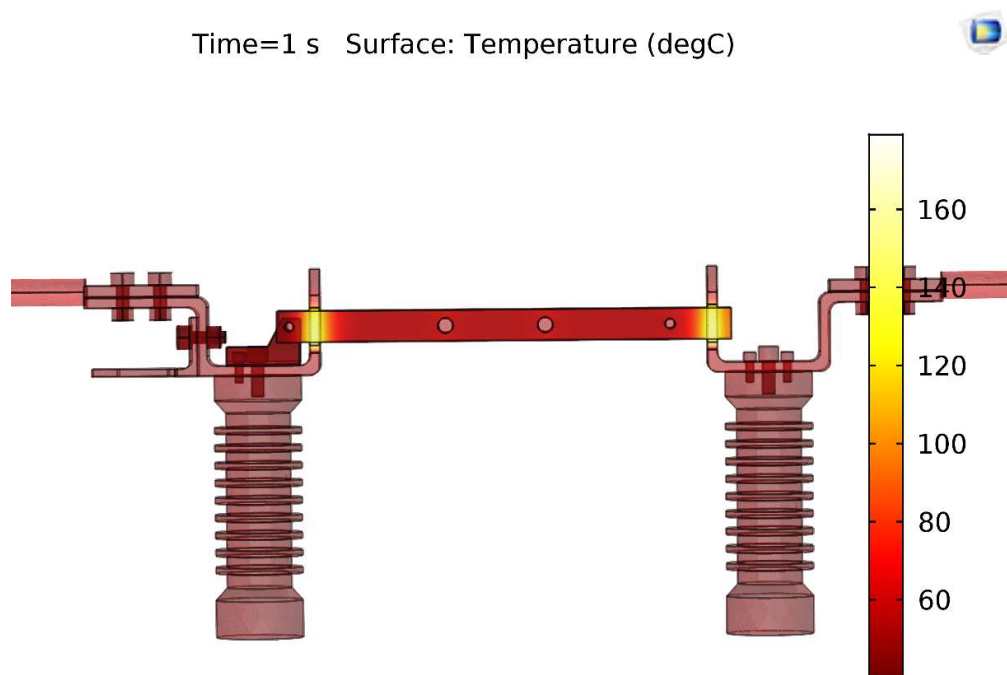
Obrázek 27: Detail oteplení přívodního vodiče COMSOL.

Z obrázku 27 je patrné oteplení samotného přívodního vodiče a izolátoru, kde nejnižší teplota je teplotou okolí.

U obou simulací je i přes rozdíl ustálených hodnot splněna podmínka pro úspěšný výsledek testu typové zkoušky. Části proudové dráhy se při jmenovitých podmínkách neoteplily o více jak 35 °C, což je mezní hodnota pro měděné kontakty na vzduchu

#### 5.4.5 Výsledky teplotního pole (jmenovitý krátkodobý výdržný proud) – COMSOL

Simulace byla provedena dle štítkových hodnot odpojovače. Celá simulace byla řešena na stejném modelu jako u jmenovitého proudu jen s rozdílem, že zde byl aplikován proud 16 kA po dobu 1s a úloha byla řešena jako nestacionární výpočet („time dependent“ study). Výsledek simulace po první sekundě působení jmenovitého krátkodobého výdržného proudu lze vidět na obrázku 28.

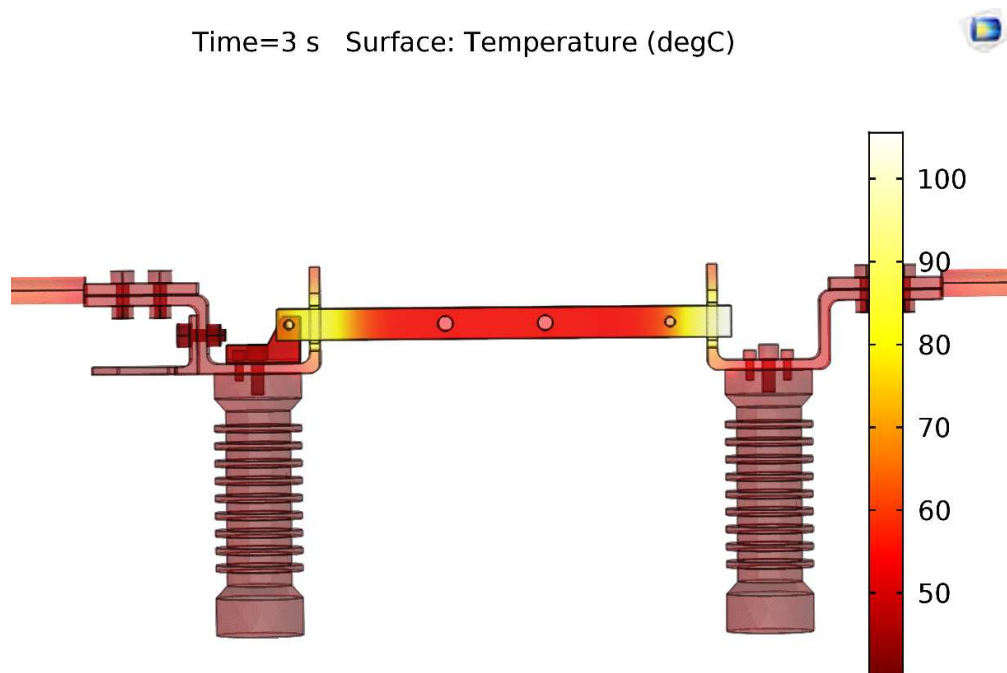


Obrázek 28: Oteplení proudové dráhy jmenovitým krátkodobým výdržným proudem po 1 sekundě COMSOL.

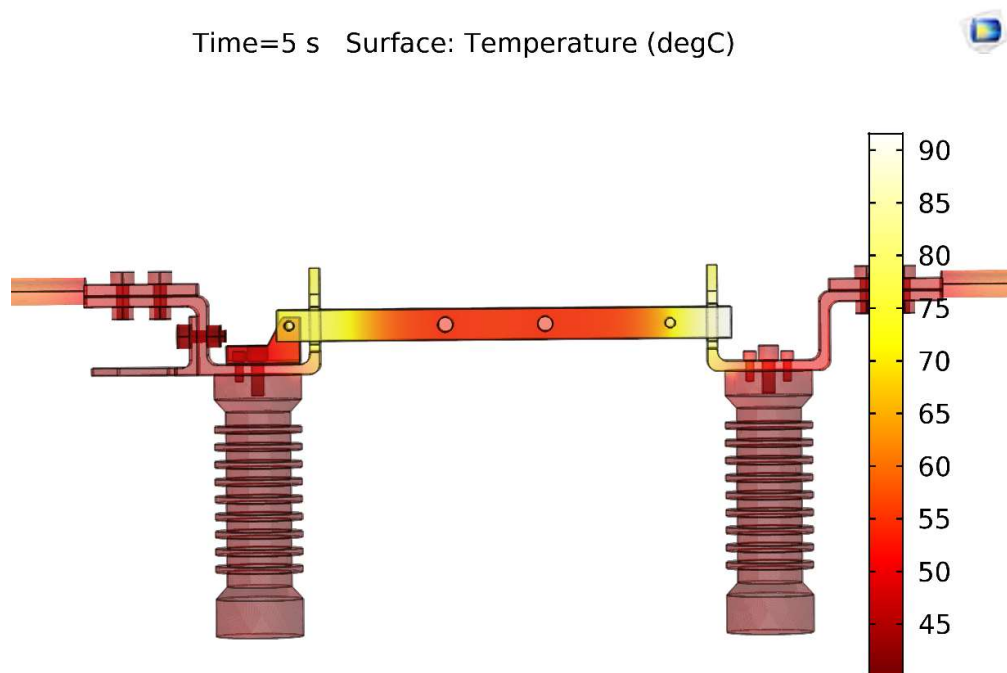
Narozdíl od jmenovitého proudu, kde bylo vypočteno oteplení v ustáleném stavu, se při této simulaci nejvíce ohřály hlavní kontaktní spoje. Kontaktní plochy mezi noži odpojovacího ramene a pevnými kontakty přívodních vodičů se oteplily na teplotu přibližně 170 °C. Daná kontaktní místa mají díky stykovému odporu největší odpor z celé proudové dráhy. Oteplení bylo tak rychlé, že se vygenerovaná tepelná energie nestačila rozvést do ostatních částí odpojovače.

Testu tepelné odolnosti vůči jmenovitému krátkodobému výdržnému proudu by odpojovač vyhověl. Při dosažených teplotách nedochází k rekrytalizaci mědi (měděné proudové dráhy) a tudíž by nemělo dojít ani například ke svaření kontaktních ploch. Na modelu jsou ale kontakty idealizovány náhradním objemem s rovnoměrným rozložením proudu. To znamená, že by odpojovač i po této zkoušce byl plně funkční.

Po vypnutí proudu se pak proudová dráha začne chladit, jak lze vidět na následujících obrázcích 29 a 30:



Obrázek 29: Oteplení proudové dráhy po 2 sekundách od vypnutí procházejícího proudu.



Obrázek 30: Oteplení proudové dráhy po 4 sekundách od vypnutí procházejícího proudu.

Po dvou sekundách od vypnutí procházejícího proudu klesá maximální teplota proudové dráhy odpojovače na 105 °C. Po 4 sekundách po vypnutí na 91 °C. Je patrné, že se více

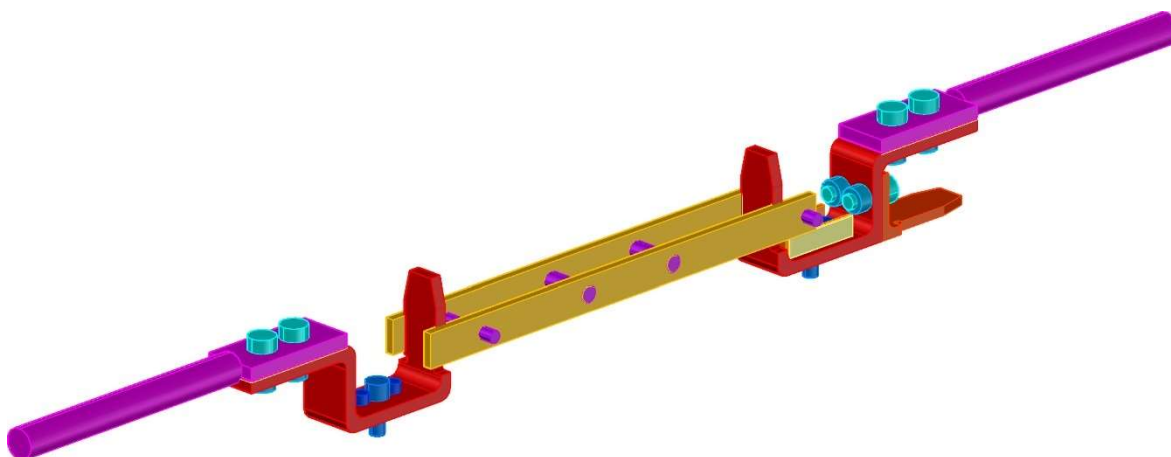
ohřálo okolí míst kontaktních ploch. Teplo se v rámci dalšího časového vývoje z části odvedlo do okolí a zejména vedením rozšířilo do ostatních částí proudové dráhy odpojovače.

## 5.5 Silové účinky proudu

Analýza silových účinků byla řešena pouze v programu Ansys Maxwell. U této analýzy byly počítány síly působící na oba nože proudové dráhy a na oba měděné přívody. Předpokladem bylo, že síly působící na jednotlivé díly odpojovače budou alespoň částečně shodné se silami vypočítanými analytickým výpočtem.

### 5.5.1 Model pro silové účinky proudu

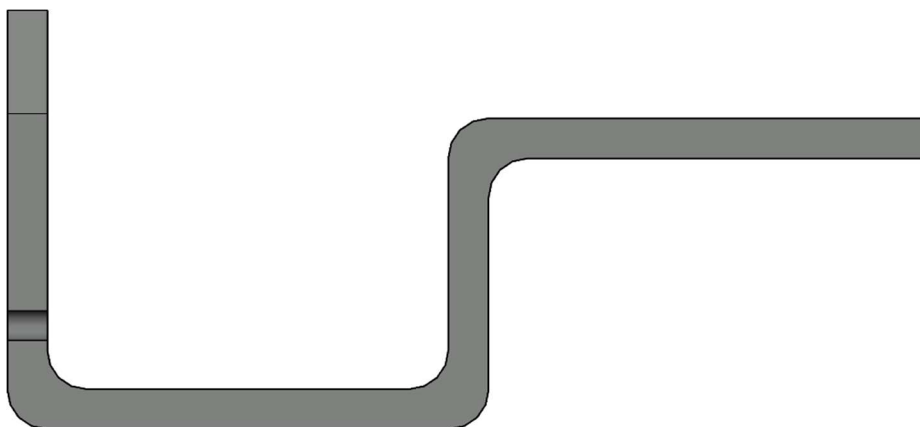
Model u silových účinků proudu je shodný s modelem pro teplotní pole, jen bez podpěrných izolátorů, které nemají na velikost sil vliv.



Obrázek 31: Model pro simulace silových účinků.

### 5.5.2 Analytický výpočet sil – pravoúhlý záhyb

Přívodní vodiče odpojovače jsou konstruovány do tvaru zobrazeném na obrázku 30. Tyto vodiče jsou obdélníkového průřezu a musejí odolat silám nárazového zkratového proudu. Síla působící na pravoúhlý záhyb má logaritmický charakter (viz rovnice 22). To znamená, že největší síla působí v místě ohnutí pravoúhlého záhybu a se zvětšující se vzdáleností od tohoto místa klesá. Na obrázku 32 lze vidět přívodní vodič, který se sestává prakticky ze tří pravoúhlých záhybů.



Obrázek 32: Tvar přívodního vodiče.

$$F_i = 10^{-7} \cdot I_m^2 \cdot \ln \frac{l \cdot (h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r \cdot (h + \sqrt{h^2 + l^2})} \quad (N) \quad (22)$$

Kde:  $F_i$  je amplituda síly působící na pravoúhlý záhyb

$I_m$  je amplituda procházejícího proudu

$l$  je šířka obdélníkového vodiče

$h$  je délka vodiče jak ve vertikální části záhybu, tak i v horizontální části záhybu

$r$  je tloušťka vodiče [25]

Za neznámé byly dosazeny hodnoty:

- $h = 85 \text{ mm}$
- $l = 30 \text{ mm}$
- $r = 8 \text{ mm}$
- $I_m = 40 \text{ kA}$  – bráno podle rázové hodnoty asymetrického zkratového proudu (výpočet uveden dále v práci)

$$\begin{aligned} F_i &= 10^{-7} \cdot 40000^2 \cdot \ln \frac{0,03 \cdot (0,085 + \sqrt{0,085^2 + 0,008^2})}{0,008 \cdot (0,085 + \sqrt{0,085^2 + 0,03^2})} \\ &= 207,07 \text{ N} \end{aligned}$$

Síly působící na pravoúhlý záhyb jsou orientovány v takovém směru, že by se záhyb měl tendenci rozevírat do roviny. To způsobuje mechanické namáhání samotného přívodu, izolátorů, a dokonce i AlFe lan, které jsou připojené k přívodu.

### 5.5.3 Analytický výpočet sil na nožích odpojovacího ramene

Odpojovací rameno je tvořeno dvěma paralelními vodiči obdélníkového průřezu spojujícími přívodní a vývodovou část odpojovače. Paralelními vodiči díky tomu protéká



jen poloviční proud vyvíjející na ně menší sílu. To je dáno tím, že síla se počítá s kvadrátem procházejícího proudu, tudíž když vodiči prochází poloviční proud, je působící síla čtvrtinová. Další výhodou je, že působící síla má takový směr, že oba vodiče přitahuje k sobě. Jedná se o adynamické konstrukční řešení kontaktního systému. To přispívá ke zvýšení kontaktní přitlačné síly a snížení kontaktních odporů. Během zkratů omezuje možnost odskočení kontaktů.

Působící sílu lze vypočítat:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l}{a} \cdot \left(\frac{I_m}{2}\right)^2 \cdot k_d \cdot k_p \text{ (N)} \quad (23)$$

Kde:  $F$  je síla působící na vodiče

$l$  je délka vodiče

$a$  je vzájemná středová vzdálenost nožů

$I_m$  je amplituda procházejícího proudu

$k_d$  je činitel uspořádání vodičů

$k_p$  je činitel tvaru průřezu [25]

Aby mohla být vypočítána síla, je nutné nejprve vypočítat potřebné koeficienty:

$$k_d = \sqrt{\left(\frac{a}{l}\right)^2 + 1} - \frac{a}{l} = \sqrt{\left(\frac{0,036}{0,364}\right)^2 + 1} - \frac{0,036}{0,364} = 0,906 \quad (24)$$

Kde:  $k_d$  je činitel uspořádání vodičů

$a$  je vzájemná středová vzdálenost vodičů

$l$  je délka vodiče [25]

$$k_p = \sqrt{\left(\frac{a}{l}\right)^2 + 1} - \frac{a}{l} = \sqrt{\left(\frac{0,036}{0,364}\right)^2 + 1} - \frac{0,036}{0,364} = 0,906 \quad (25)$$

Kde:  $k_p$  je činitel tvaru průřezu

$a$  je vzájemná středová vzdálenost vodičů

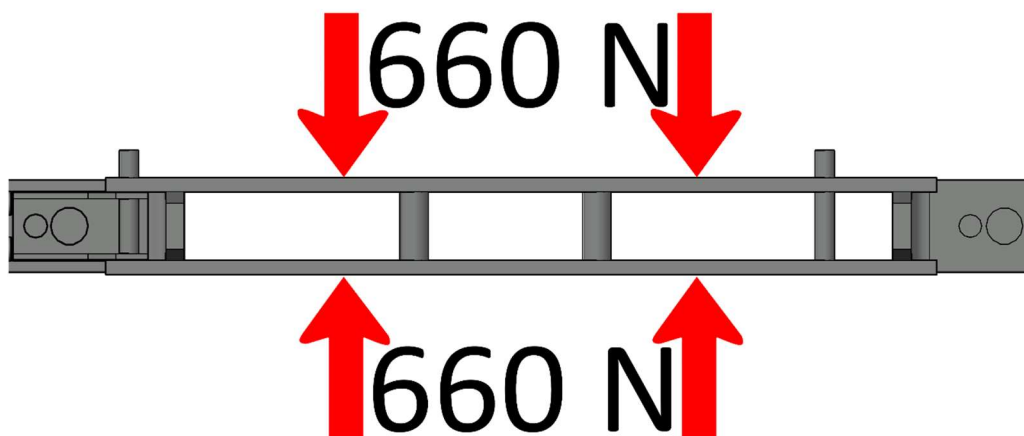
$b$  je šířka vodiče

$h$  je výška vodiče [25]

Po dosazení do rovnice 24 vyjde síla:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,364}{0,036} \cdot \left(\frac{40000}{2}\right)^2 \cdot 0,906 \cdot 0,901 = 660,3 \text{ N}$$

Ukázku rozložení síly na paralelních vodičích lze vidět na obrázku 33:



Obrázek 33: Rozložení sil na paralelních vodičích proudové dráhy.

#### 5.5.4 Analytický výpočet sil pro ustálený zkratový proud jedné fáze

Ustálený zkratový proud protéká obvodem při zkratu po odeznění přechodného děje, tedy po ustálení stejnosměrné složky zkratového proudu. Průběh ustáleného zkratového proudu lze spočítat dle rovnice 26:

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t) \text{ (A)} \quad (26)$$

Kde:  $i$  je okamžitá hodnota ustáleného zkratového proudu

$I$  je efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu

$\omega$  je úhlová rychlost

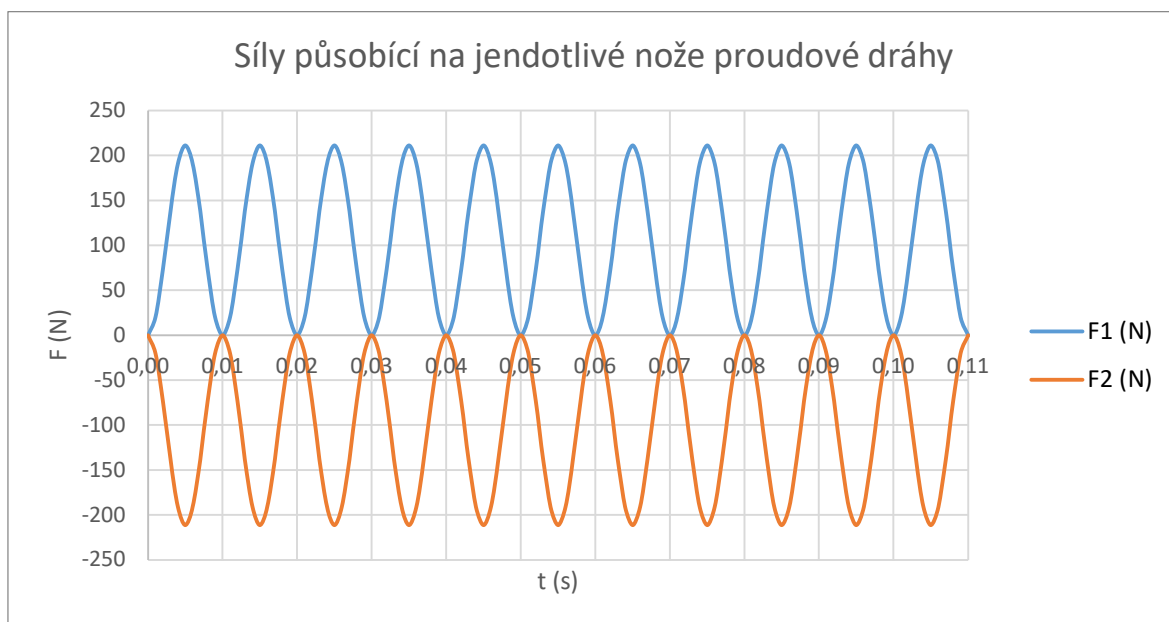
$t$  je čas [25]

Efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu byla zvolena dle štítku přístroje. Průběh tohoto proudu je na obrázku 34.



Obrázek 34: Průběh ustáleného zkratového proudu jedné fáze.

Okamžité hodnoty proudu byly dosazeny do rovnice 23. Vzniklé průběhy síly jsou na obrázku 35:



Obrázek 35: Průběh sil na obou nožích proudové dráhy.

Podle předpokladu jsou síly v každém časovém okamžiku stejně velké opačného charakteru (směřují proti sobě) a mají dvojnásobnou frekvenci oproti frekvenci proudu, který je vybudil. Maximální hodnota působících sil je 211 N.

### 5.5.5 Analytický výpočet sil pro ustálený třífázový symetrický zkratový proud

Tento výpočet se zaměřuje na silové působení mezi jednotlivými póly – fázemi odpojovače. Protože se všechny tři fáze nacházejí vedle sebe, tak každá fáze má silový vliv na ostatní dvě. Proudů procházející jednotlivými fázemi lze spočítat dle rovnic 27, 28, 29:

$$i_1 = \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (A) \quad (27)$$

$$i_2 = \sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (A) \quad (28)$$

$$i_3 = \sqrt{2} \cdot I_3 \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) \quad (A) \quad (29)$$

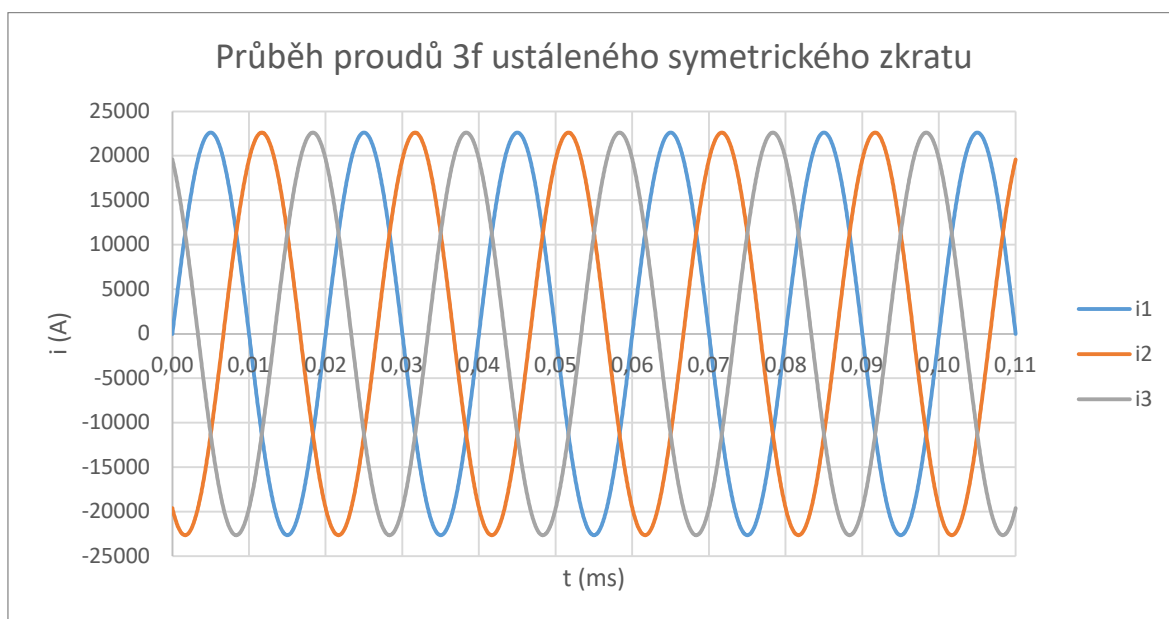
Kde:  $i$  jsou okamžité hodnoty ustálených zkratových proudů jednotlivých fází

$I$  jsou efektivní hodnoty ustálených zkratových proudů jednotlivých fází

$\omega$  je úhlová rychlost

$t$  je čas [25]

V časové oblasti mají proudy průběhy dle obrázku 36:



Obrázek 36: Časové průběhy proudů jednotlivých fází při třífázovém symetrickém zkratu.

Z okamžitých hodnot proudů se spočítají síly působící na jednotlivé fáze odpojovače dle vztahů 30, 31, 32:

$$F_1 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l}{a} \cdot \left( i_1 \cdot i_2 + \frac{1}{2} \cdot i_1 \cdot i_3 \right) (N) \quad (30)$$

$$F_2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l}{a} \cdot [i_2 \cdot i_1 + i_2 \cdot (-i_3)] (N) \quad (31)$$

$$F_3 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l}{a} \cdot \left( i_3 \cdot i_2 + \frac{1}{2} \cdot i_3 \cdot i_1 \right) (N) \quad (32)$$

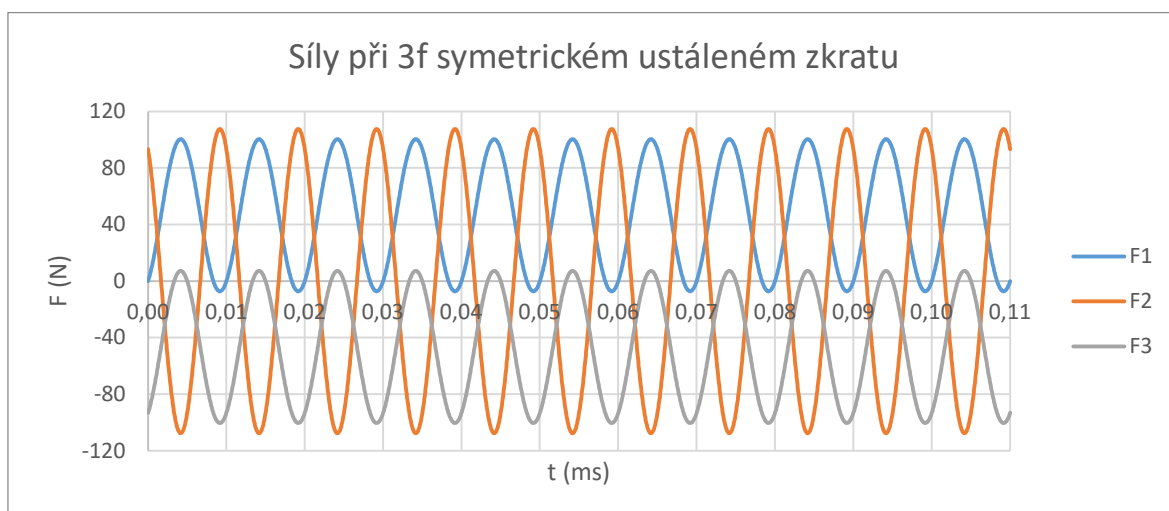
Kde:  $F$  jsou síly působící na jednotlivé fáze

$l$  je délka proudové dráhy všech fází

$a$  je vzájemná vzdálenost mezi osami vodičů

$i$  jsou okamžité hodnoty zkratových proudů [25]

Časové průběhy sil jsou zobrazeny na obrázku 37:

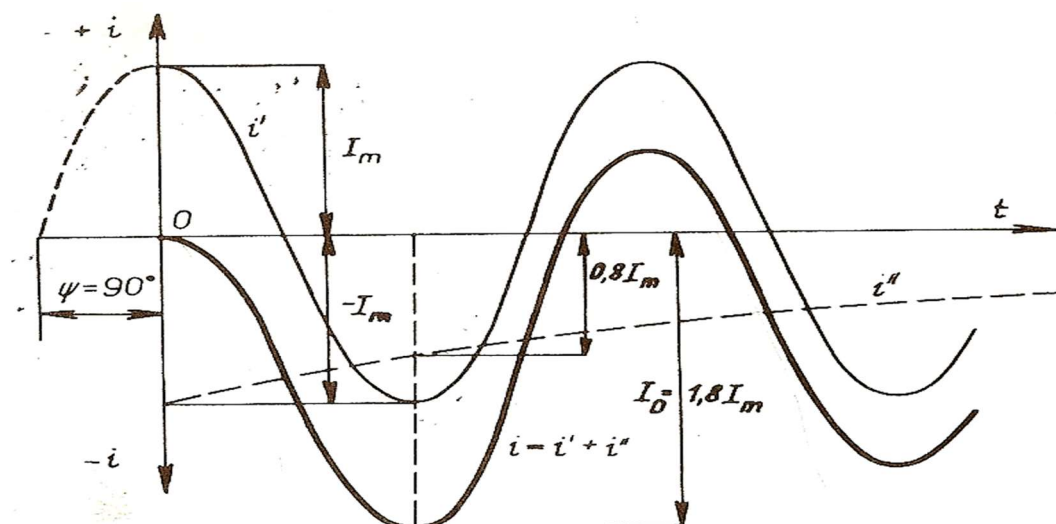


Obrázek 37: Časové průběhy sil působící na jednotlivé fáze odpojovače při třífázovém symetrickém zkratu.

Největší síla působí na prostřední (druhou) fázi odpojovače. Její velikost dosahuje hodnoty 108 N. U ostatních dvou fází je má maximální vypočtená působící síla velikost 100 N.

### 5.5.6 Výpočet sil pro třífázový asymetrický zkrat

U tohoto poruchového stavu nastává největší proudové, a tedy i mechanické působení při první půlperiodě asymetrického zkratového proudu. V tento moment je střídavá složka proudu superponována na stejnosměrnou a tím vzniká amplituda o velikosti až 1,8x větší, než u ustáleného zkratového proudu (viz obrázek 38).



Obrázek 38: Porovnání průběhu asymetrického a symetrického zkratového proudu. [25]

Tato složka je největší pro fázi, kterou v okamžiku vzniku zkratu protéká proud ve své amplitudě. Nejmenší stejnosměrnou složku by měla fáze, ve které v okamžiku vzniku zkratu byl její proud roven 0 (proud prochází nulou).

Stejnosemřná složka klesá s časem po exponenciále a po jejím zaniknutí přechází zkratový proud do své ustálené části. Časová konstanta odeznívání stejnosměrné složky zkratového proudu závisí na poměru indukčnosti a odporu daného zkratového obvodu. V případě této práce byla časová konstanta vypočítána z odhadovaných hodnot indukčnosti a odporu, jaké se nacházejí v soustavě vysokého napětí. Její hodnota pro výpočty v práci činí 0,04 s.

Průběhy proudů jednotlivých fází lze vyjádřit rovnicemi 33, 34, 35:

$$i_1 = \sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \left[ \sin \left( \omega \cdot t + \frac{\pi}{2} + \frac{2}{3} \cdot \pi \right) - \sin \left( \frac{\pi}{2} + \frac{2}{3} \cdot \pi \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (A) \quad (33)$$

$$i_2 = \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \left[ \sin \left( \omega \cdot t + \frac{\pi}{2} \right) - \sin \left( \frac{\pi}{2} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (A) \quad (34)$$

$$i_3 = \sqrt{2} \cdot I_3 \cdot \left[ \sin \left( \omega \cdot t + \frac{\pi}{2} + \frac{4}{3} \cdot \pi \right) - \sin \left( \frac{\pi}{2} + \frac{4}{3} \cdot \pi \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (A) \quad (35)$$

Kde:  $i$  jsou okamžité hodnoty zkratových proudů

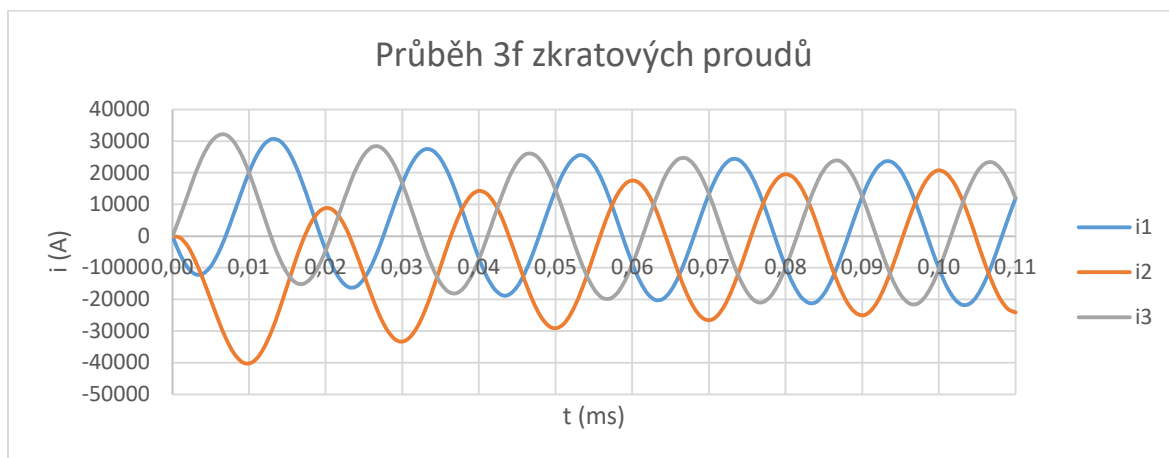
$I$  jsou efektivní hodnoty zkratových proudů

$\omega$  je úhlová rychlost

$t$  je čas

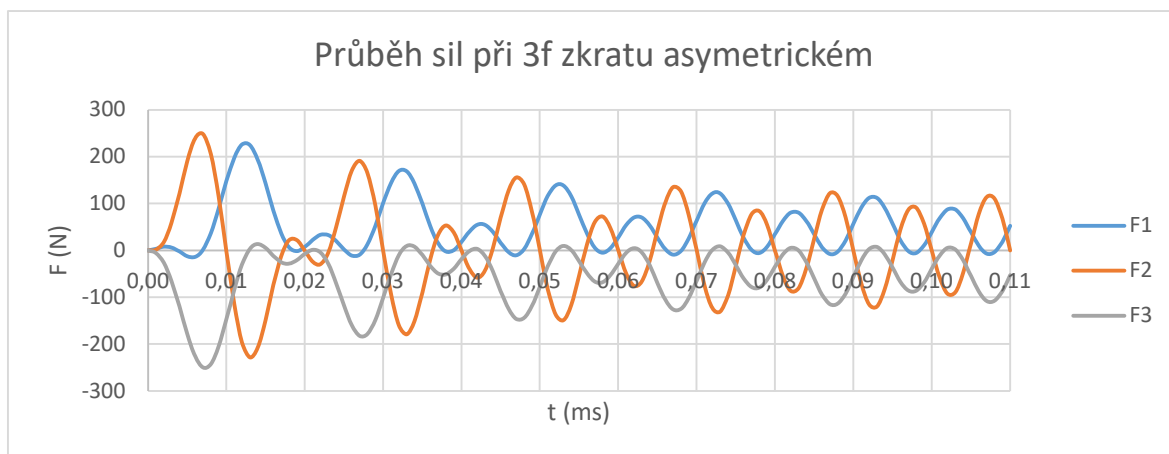
$\tau$  je časová konstanta [25]

Průběhy proudů jsou na obrázku 39:



Obrázek 39: Průběhy třífázových zkratových proudů při asymetrickém proudu.

Z grafu je patrné, že v případě této práce je nárazový zkratový proud roven hodnotě 40 kA. Výpočet sil poruchového stavu lze provést podle rovnic 31, 32, 33. Průběhy sil jsou zobrazeny na obrázku 40:



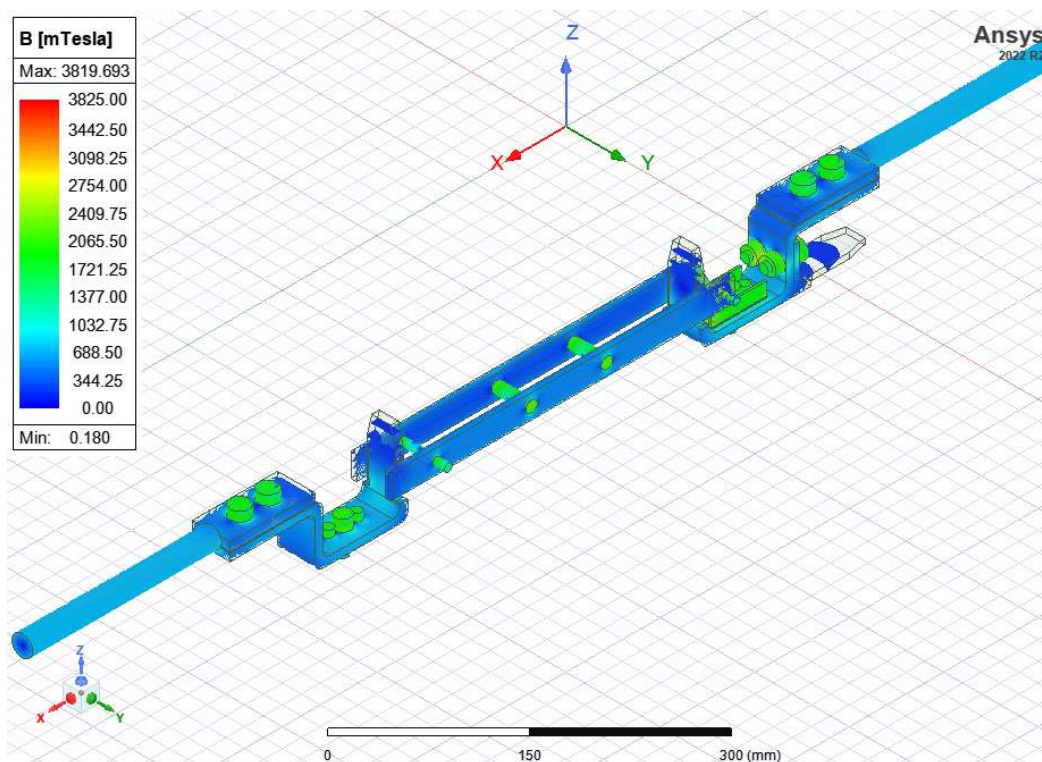
Obrázek 40: Průběh sil třífázového asymetrického zkratu.

Největší síla působí na prostřední (druhou) a krajní (třetí) fázi a to síla 250 N.

### 5.5.7 Výsledky numerické analýzy

Analýza mechanického namáhání byla řešena pouze v programu Ansys Maxwell. U této analýzy byly počítány síly působící na oba nože proudové dráhy a na oba měděné přívody. Předpokladem je, že síly působící na jednotlivé díly odpojovače budou alespoň částečně shodné se silami vypočítanými analytickým výpočtem.

Nárazový zkratový proud 40 kA vybudil v proudové dráze magnetické pole. Kontury magnetické indukce jsou zobrazeny na obrázku 41.



Obrázek 41: Magnetická indukce generovaná v proudové dráze.

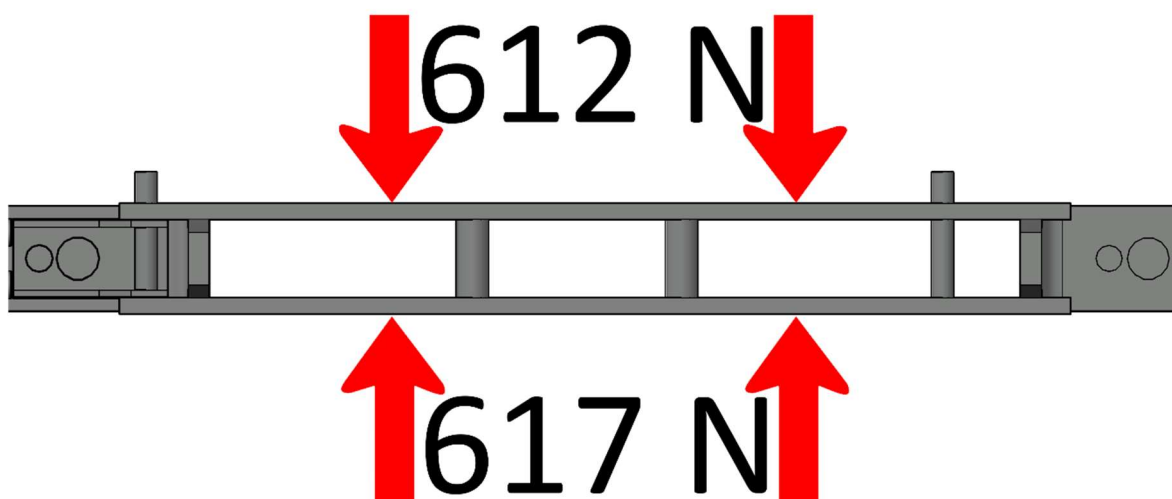
Takové rozložení magnetické indukce vyvolalo síly na proudové dráze dle tabulky 4:

Tabulka 4: Síly působící na proudovou dráhu.

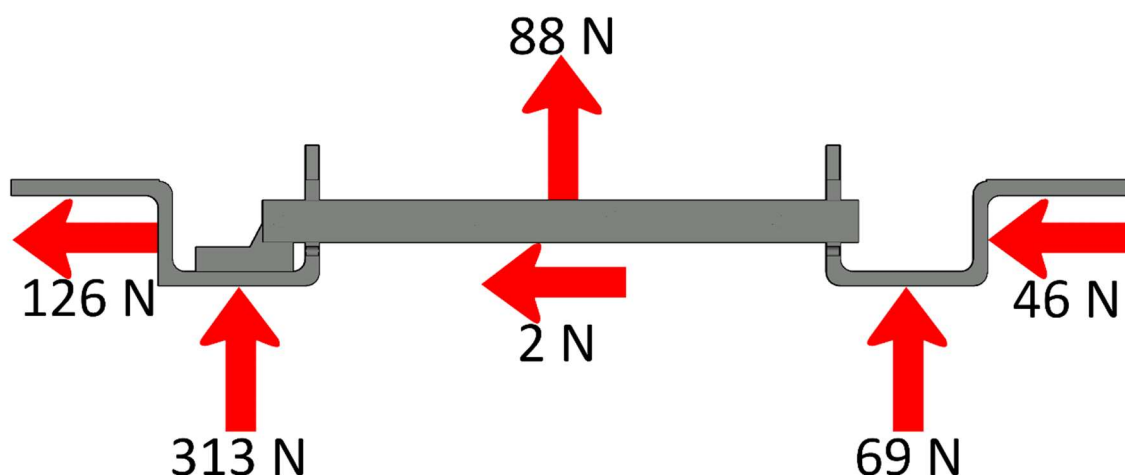
Hodnoty síly vypočtené programem Ansys Maxwell pro proud 40 kA				
Osa	Síla působící na přívod (N)	Síla působící na vývod (N)	Síla působící na levý nůž (N)	Síla působící na pravý nůž (N)
x	-126,16	-46,01	-2,00	-1,94
y	3,18	5,88	616,87	-611,73
z	68,88	313,19	89,14	87,12



Působení sil lze vidět na obrázcích 42 a 43.



Obrázek 42: Rozložení sil na nožové proudové dráze.



Obrázek 43: Celkové rozložení sil na proudové dráze.

Při srovnání sil vypočtených analytickým výpočtem a sil řešených numerickou analýzou lze vidět, že výsledky nejsou stejné. Analytickým výpočtem vyšla hodnota síly na rovnoběžných nožích odpojovacího ramene 660 N. Porovnáním se silou působící na levý nůž je rozdíl těchto hodnot 43 N, což je chyba přibližně 6,5 %. Tato odchylka je způsobena tím, že analytický výpočet je zjednodušený a nezahrnuje vliv celé geometrie proudové dráhy. Za předpokladu, že by analytický vzorec byl použit pro dimenzování daného přístroje, pak by proudová dráha plně vyhověla požadavkům na mechanické namáhání.

U síly působící na pravoúhlý záhyb vyšla analytickým výpočtem hodnota 207 N. Oproti numerické analýze vychází o 81 N vyšší (bereme-li v úvahu vývodový vodič). V tomto případě se uplatňuje i zjednodušení vyhodnocení numerického výpočtu, kdy je známa jen výsledná hodnota síly a to síla 124,37.

## Závěr

Tato diplomová práce se zabývala numerickými analýzami na modelu odpojovače 25 kV. V úvodu práce byl zpracován přehled odpojovačů a jejich rozdělení. Následně byly ve stručnosti uvedeny sledy typové zkoušky a podmínky jejich splnění, obecný popis numerické analýzy, základní teorie teplotního pole, elektrostatického pole a silového působení proudu. V poslední části jsou uvedeny jednotlivé numerické analýzy s použitými modely, vypočítanými podmínkami na rozhraní a výsledky.

V navazující praktické části práce jsou představeny geometrické a výpočetní modely pro jednotlivé numerické analýzy, s použitými materiálovými vlastnostmi a okrajovými podmínkami. Geometrický model byl vytvořen v programu AutoCAD, vlastní výpočty pak byly realizovány za pomoci programů COMSOL Multiphysics a Ansys Maxwell. V práci jsou prezentovány jednotlivé realizované výpočty včetně výsledků a jejich zhodnocení.

Cílem práce bylo ověření možnosti využití numerických analýz při návrhu a optimalizaci odpojovače 25 kV. Realizované analýzy byly zaměřeny na vybrané disciplíny typové zkoušky. Řešeno tak bylo elektrostatické pole v okolí odpojovače, teplotní pole při zatížení jmenovitým i zkratovým proudem a síly působící na proudovou dráhu během zkratu. Práce prokázala, že numerická analýza je vhodnou pomůckou při navrhování elektrických strojů a přístrojů, protože správně provedené simulace dávají lepší vhled na daný přístroj ještě předtím, než je nutné vyrobit prototyp a výsledky získat z normovaných zkoušek. Numerická analýza tak v praxi dokáže ušetřit peníze na vyrobených funkčních vzorcích i ověřovacích zkouškách.

## Zdroje

- [1] IEC. Details for IEC number 441-14-05: „disconnector“. *International Electrotechnical Commission* [online]. 1984 [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=441-14-05>
- [2] HÁLA, Ivan. *ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA*. ČSN EN IEC 62271-102 ed.2 35 4210. Brno: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2019.
- [3] OTTO HAVELKA A KOLEKTIV. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985. ISBN 04-529-85.
- [4] KUPILÍK, Martin. *Elektrodynamické účinky zkratového proudu na odpojovač* [online]. Plzeň, 2015. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/18792/1/Diplomova%20prace%20Martin%20Kupilik.pdf>
- [5] BALATKA, Josef. *Konstrukční návrh a analýza elektrického odpojovače* [online]. Plzeň, 2019. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/38323/1/Diplomova\\_prace\\_Balatka.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/38323/1/Diplomova_prace_Balatka.pdf)
- [6] EDISON, Tesla. Disconnect Switches (Isolator) in Substation: Types, Design and Working. *StudyElectrical.com* [online]. září 2022. Dostupné z: <https://studyelectrical.com/2022/09/disconnect-switches-types-design-working.html>
- [7] MACEK, Zdeněk. Přístroje pro vn a vvn. *vyuka.hradebni* [online]. Dostupné z: [https://vyuka.hradebni.cz/file.php/224/ESP\\_-\\_pristroje/S-6-Pristroje\\_vn\\_a\\_vvn.pdf](https://vyuka.hradebni.cz/file.php/224/ESP_-_pristroje/S-6-Pristroje_vn_a_vvn.pdf)
- [8] Odpojovače a uzemňovače. *R&S SERW* [online]. Dostupné z: [https://thersgroup.com/wp-content/uploads/2020/02/High-voltage-switches\\_Technical-data\\_CS.pdf](https://thersgroup.com/wp-content/uploads/2020/02/High-voltage-switches_Technical-data_CS.pdf)
- [9] Spínače a prepínače pro středně vysoká napětí | R&S. *R&S SERW* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://thersgroup.com/cs/produkty/spinace/spinace-a-prepinace-pro-stredne-vysoka-napeti/>
- [10] KOPEJTKO, Petr. *ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA*. ČSN EN 60060-1 34 5640. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011.
- [11] HÁLA, Ivan. *ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA*. ČSN EN 62271-1 ed. 2 35 4205. Brno: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2018.

- [12] ATKINSON, Kendall E. Numerical analysis. *Britannica* [online]. 10. duben 2005. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/numerical-analysis/Approximation-theory>
- [13] COMSOL. *COMSOL* [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.comsol.com/>
- [14] KOPECKÝ, Jakub. *Aplikace numerických metod při návrhu a analýze elektrického odpojovače* [online]. Plzeň, 2020. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/40195/1/Aplikace%20numericky%20metod%20pri%20navrhu%20a%20analyze%20elektrickeho%20odpojovace.pdf>
- [15] Ansys Maxwell. *Techsoft* [online]. Dostupné z: <https://www.techsoft-eng.cz/software/ansys-maxwell>
- [16] OLDŘICH, Petr. *ČESKÁ TECHNIKÁ NORMA. ČSN IEC 60050-841 33 0050*. Praha: Český normalizační institut. 2007.
- [17] KOTLAN, Václav. Přednáška z předmětu Modelování multifyzikálních problémů: Teplotní pole. In: . Plzeň. 11. březen 2022.
- [18] ÚSTAV FYZIKY A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ. *Mechanika* [online]. B.m.: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně - fakulta technologická. Dostupné z: [https://ufmi.ft.utb.cz/texty/mechanika/M\\_01.pdf](https://ufmi.ft.utb.cz/texty/mechanika/M_01.pdf)
- [19] Force between two parallel current wires. *Khan Academy* [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.khanacademy.org/science/in-in-class-12th-physics-india/moving-charges-and-magnetism/x51bd77206da864f3:force-between-two-parallel-currents/v/force-between-two-parallel-current-wires>
- [20] Electric Field Lines. *toppr* [online]. Dostupné z: <https://www.toppr.com/guides/physics/electric-charges-and-fields/electric-field-lines/>
- [21] *Elektrostatické pole - Vznik a zobrazení elektrostatického pole* [online]. B.m.: Střední škola automobilní Ústí nad Orlicí. květen 2017. Dostupné z: [https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2017/05/Elektrostaticke\\_pole.pdf](https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2017/05/Elektrostaticke_pole.pdf)
- [22] KOTLAN, Václav. Přednáška z předmětu Modelování multifyzikálních problémů: Elektrostatika a stacionární proudové elektrické pole. In: . Plzeň. 28. únor 2022.
- [23] SEDLÁČEK, Jan. *Odpojovač postup návrhu SEPZ 2021 2. část*. B.m.: Západočeská univerzita v Plzni. 2021

- [24] HAVELKA, Otto, Zdeněk VÁVRA a Dalibor SVOBODA. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1985. ISBN 55-555/1-85.
- [25] DOBROVOLNÝ, Jan. *Analýza elektrodynamických sil v elektrických přístrojích* [online]. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: [https://webmail.zcu.cz/SOG0/so/machda/Mail/0/folderINBOX/1607/2/xdobro17\\_diplomova\\_prace.pdf](https://webmail.zcu.cz/SOG0/so/machda/Mail/0/folderINBOX/1607/2/xdobro17_diplomova_prace.pdf)