

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Elektrodynamické účinky zkratového proudu na
odpojovač**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KUPILÍK**
Osobní číslo: **E13N0076P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Elektrodynamické účinky zkratového proudu na odpojovač**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Zpracujte rešerši aktuálního stavu problematiky.
2. Vypracujte teoretické vztahy pro výpočet účinků elektrodynamických sil při zkratu na elektrické přístroje.
3. Navrhněte způsoby simulace účinků elektrodynamických sil na odpojovač při zkratu a proveďte jejich výpočet.
4. Zhodnoťte vypočítané výsledky vlivu elektrodynamických sil na vybraný odpojovač.
5. Navrhněte další zadání pro následující etapu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. **MAYER, Daniel.** Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. 538 s. ISBN 978-80-7232-436-1.
2. **RUSŇÁK, Štěpán a ŘEZÁČEK, Petr.** Elektrické přístroje. 1. 2. vyd. Plzeň: ZČU, 1998. 181 s. ISBN 80-7082-434-4.
3. **MAYER, Daniel.** Elektrodynamika v energetice. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 278 s. ISBN 80-7300-164-0.
4. **BÁRTA, Karel a VOSTRACKÝ, Zdeněk.** Spínací přístroje velmi vysokého napětí. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 445 s.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslav Šnajdr**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




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

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na výpočet elektrodynamických účinků zkratového proudu na odpojovač. Popisuje odpojovače obecně včetně dělení a značení odpojovačů. Je zde také vysvětleno zkoušení odpojovačů podle normy. V další části jsou vysvětleny vztahy, které popisují síly v elektromagnetickém poli. Dále je v práci proveden 3D model odpojovače podle výkresu a tento model je poté využit v simulaci elektrodynamických účinků. Poté jsou v práci popsány a provedeny simulace elektrodynamických účinků proudu na vodiče a v závěru na normou definovanou proudovou smyčku s odpojovačem. Cílem této práce je vytvořit funkční simulaci elektrodynamických účinků zkratového proudu na odpojovač.

Klíčová slova

elektrodynamické účinky, zkratový proud, odpojovač, 3D model, solidworks, simulace, COMSOL

Abstract

The diploma thesis is focused on a calculation of electrodynamic effects of a short circuit current on a disconnecter. It describes disconnectors generally including types and labeling of disconnectors. It also explains a testing of disconnectors according to the czech technical standards. There are also explained the physical equations, which describes electrodynamic effects in the electromagnetic field. The thesis contains 3D model of the disconnecter according to a technical documentation and the model is used in the final simulation of electrodynamic effects. There are also several verifications of simulations included. The aim of the thesis is to create functional simulation of the electrodynamic effects of short circuit current on a disconnecter.

Key words

Electrodynamic effects, short circuit current, disconnecter, 3D model, solidworks, simulation, COMSOL

Prohlášení

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

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

V Plzni dne 5.5.2015

Martin Kupilík

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavu Šnajdrovi za umožnění vypracování této práce, za věnovaný čas a informace poskytnuté při konzultacích a také za pomoc při řešení problémů při práci s programem COMSOL. Dále děkuji své rodině za podporu během celého mého studia na vysoké škole.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	12
1 ODPOJOVAČ	13
1.1 ODPOJOVAČ OBECNĚ	13
1.2 ZÁKLADNÍ POJMY	14
1.2.1 Odpojovač	14
1.2.2 Uzemňovač	15
1.2.3 Odpojovač s uzemňovačem	15
1.2.4 Proudová dráha	16
1.2.5 Izolační podpěry	16
1.2.6 Kontakty	16
1.3 DĚLENÍ ODPOJOVAČŮ	17
1.3.1 Podle koncepce provedení	17
1.3.2 Podle počtu podpěr	20
1.3.3 Podle umístění v zařízení	20
1.3.4 Podle počtu pólů	20
1.3.5 Podle uspořádání pólů	20
1.3.6 Podle možnosti uzemnění hlavních obvodů	21
1.3.7 Podle druhu pohonu	21
1.3.8 Podle pohybu proudové dráhy	21
1.4 JMENOVITÉ CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY	22
1.5 ZNAČENÍ ODPOJOVAČŮ	24
1.6 TYPOVÉ ZKOUŠKY	26
1.6.1 Všeobecně	26
1.6.2 Zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem	26
2 TEORETICKÝ ÚVOD	31
2.1 SÍLY V ELEKTROMAGNETICKÉM POLI	31
2.1.1 Lorentzova síla působící na proudovodiče v magnetickém poli	31
2.1.2 Maxwellův magnetický tenzor pnutí	35
2.1.3 Výpočet síly z energie magnetického pole	38
3 SIMULACE ELEKTRODYNAMICKÝCH ÚČINKŮ ZKRATOVÉHO PROUDU	42
3.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	42
3.1.1 Úvod	42
3.1.2 Princip metody	42
3.2 SIMULOVANÝ ODPOJOVAČ	44
3.2.1 Technická data	44
3.2.2 Model odpojovače	45
3.3 SIMULACE ELEKTRODYNAMICKÝCH ÚČINKŮ	52
3.3.1 Paralelní vodiče, 2D problém, magnetické pole	53
3.3.2 Paralelní vodiče, 3D problém, magnetické pole	58
3.3.3 Paralelní vodiče, 3D problém, elektrické proudy, magnetické pole	61
3.3.4 Proudová smyčka, 3D problém, elektrické proudy, magnetické	64
3.3.5 Proudová smyčka odpovídající normě, 3D problém, elektrické proudy, magnetické pole	69

3.4	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	75
3.4.1	<i>Porovnání analyticky vypočtené síly, simulace a jmenovité dynamické síly</i>	75
ZÁVĚR	77
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	78

Seznam symbolů a zkratk

B	magnetická indukce	T
B_n	normálová složka magnetické indukce	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
B_t	tečná složka magnetické indukce	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Cu	měď	
dx	element dráhy	
dt	element času	
F	síla	N
f	objemová hustota síly	
\vec{f}	vektor plošné hustoty síly	
F_r	jmenovitý kmitočet	Hz
\mathbf{F}_m	vektor síly magnetického pole	N
\mathbf{H}	vektor magnetické intenzity	A/m
I	proud	A
I_t	zkušební proud	A
I_r	jmenovitý proud	A
I_k	Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	A
I_p	Jmenovitý dynamický výdržný proud	A
J	proudová hustota	A/m^2
L	indukčnost	H
Q	elektrický náboj	C
R	odpor cívky elektromagnetu	Ω
t_k	jmenovitá doba	s
\mathbf{T}	Maxwellův magnetický tenzor pnutí	
U_0	napětí zdroje	V
U_r	jmenovité napětí	V
\mathbf{v}	vektor rychlosti	m/s
V	objem	m^3
V_m	magnetická koenergie	J
W_m	magnetická energie	J

α	úhel mezi normálovou a tečnou složkou	°
	magnetické indukce	
ϵ_r	relativní permitivita	-
Φ	magnetický indukční tok	Wb
μ	permeabilita	H/m
μ_r	relativní permeabilita	-
Γ	plocha	m ²
<i>MKP</i>	metoda konečných prvků	
<i>VN</i>	vysoké napětí	V
<i>VVN</i>	velmi vysoké napětí	V
<i>ZVN</i>	zvlášť vysoké napětí	V

Úvod

Síly, které působí na sběrnice v rozvodnách, v elektrických strojích (např. ve zkratových generátorech), ve vypínačích apod., dosahují extrémně vysokých hodnot zejména v různých havarijních stavech a při zkratových zkouškách. K zajištění bezporuchového provozu musí projektant provést analýzu silových působení a na základě ní pak navrhnout mechanicky bezpečnou konstrukci.

V této diplomové práci se zabývám především přípravou 3D modelu, který bude použit při simulaci elektrodynamických účinků zkratového proudu na odpojovač a na vytvoření samotné simulace těchto účinků pomocí metody konečných prvků.

První část této diplomové práce se zabývá odpojovačem obecně, konstrukcí a dělením odpojovačů. Nedílnou součástí této části je i značení odpojovačů a požadavky na odpojovače podle normy včetně popisu zkoušení odpojovačů.

Dále zde uvádím základní fyzikální zákony, které popisují silové působení na vodiče v magnetickém poli, skrz které prochází elektrický proud. Popisují zde, jakým způsobem lze sílu na vodič, kterým prochází proud, odvodit. Tyto znalosti poté aplikuji v další části této diplomové práce.

V poslední části se zabývám simulací elektrodynamických účinků zkratového proudu na odpojovač. Nejprve popisují princip metody konečných prvků. Dále uvádím technická data simulovaného odpojovače včetně 3D modelu samotného odpojovače a celé proudové smyčky tak, jak je popsána v normě. Hlavní část této kapitoly je samotná simulace elektrodynamických účinků zkratového proudu na odpojovač. Z důvodu ověření výsledků, je simulační část této diplomové práce složena z několika verifikačních modelů, abych docílil požadované přesnosti závěrečné simulace.

1 Odpojovač

V energetice je nejdůležitější skupinou elektrických přístrojů skupina spínacích elektrických přístrojů. Do této skupiny patří odpojovače, odpínače a vypínače. Tyto přístroje se od sebe liší tím, že odpínače jsou schopné odpínat pouze provozní výkony a proudy, na které jsou dimenzovány. Vypínače vypínají jak provozní tak i zkratové výkony a proudy soustavy a odpojovače slouží zejména k viditelnému rozpojení a zapojení nezatížených částí zařízení.

1.1 Odpojovač obecně

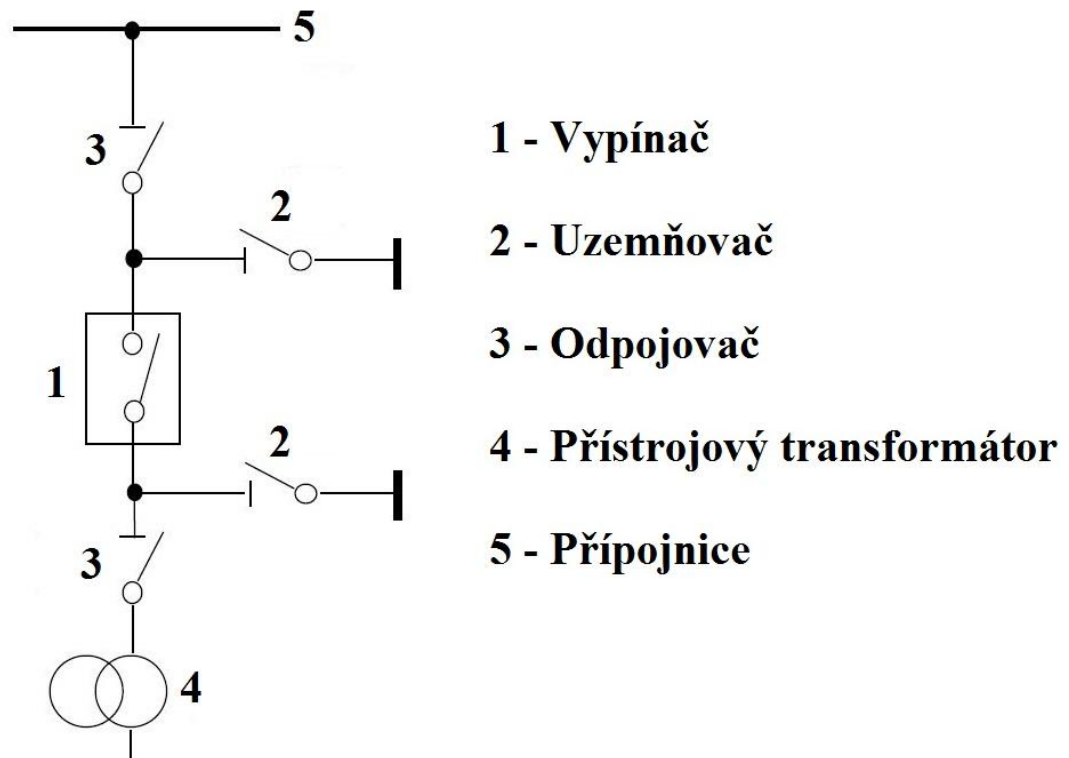
Odpojovač je konstrukčně nejjednodušší spínací přístroj. Spojuje a rozpojuje nezatížený elektrický obvod mechanicky s viditelnou rozpojovací dráhou. Odpojovače se používají k odpojení části vedení, sítí, strojů a zařízení za účelem revize a opravy. V sítích nízkého napětí se odpojovače vyskytují zřídka, naopak v sítích vyšších napěťových hladin je výskyt pravidlem. V rozvodech VN, VVN, a ZVN se obvod nerozpojuje pouze vypínačem, ale vždy obvod přerušujeme ještě odpojovačem. Odpojovač je řazen s vypínačem v sérii jak je vidět na obrázku (Obrázek 1.1).

Odpojovač slouží především k ochraně osob, které pracují na odpojených částech zařízení. Napětí ze živého úseku se tedy nesmí přenést do části, kde se pracuje a to ani v případě, když se napětí živého úseku nebezpečně zvýší (například atmosférickým nebo spínacím vlivem). Pokud vznikne přepětí, které překročí izolační pevnost přístroje, je nutno aby došlo k přeskoku k zemi. Přístroj proto musí být proveden tak, aby přeskokové k zemi volnou vzduchovou dráhou bylo menší než přeskokové napětí otevřené kontaktní dráhy.

Z důvodu požadavků na dokonalou ochranu osob pracujících na odpojeném úseku existují některé úpravy odpojovačů. Kromě přípojnicových odpojovačů se také používají odpojovače vývodové. Součástí těchto odpojovačů je uzemňovací nůž (uzemňovač), kterým se vedení po rozpojení uzemní. Tento uzemňovač může být spojen s kterýmkoli z obou kontaktů odpojovače.

Protože odpojovač je součástí vedení, může skrz něj krátkodobě procházet velký nadproud. Odpojovač musí být proveden tak, aby kromě trvalého tepelného zatížení jmenovitým proudem snesl tepelné ale i silové účinky zkratové proudu určité hodnoty (tyto hodnoty jsou uvedené na štítku). Části, které vedou elektrický proud, jsou vyrobeny obvykle

z mědi. Jsou upevněny elektricky izolovaně pomocí podpěrných izolátorů na litinovém nebo ocelovém rámu. [2]



Obrázek 1.1 - Příklad řazení odpojovače

1.2 Základní pojmy

Protože se odpojovač skládá z několika částí, budu v této kapitole popisovat základní pojmy, které se týkají odpojovače včetně popisu některých částí.

1.2.1 Odpojovač

Spínač s jednou polohou vypnutí a jednou polohou zapnutí, kterým lze spínat elektrický obvod bez zatížení, nebo velmi malé zatížení za podmínek, které jsou uvedené v normě.

1.2.2 Uzemňovač

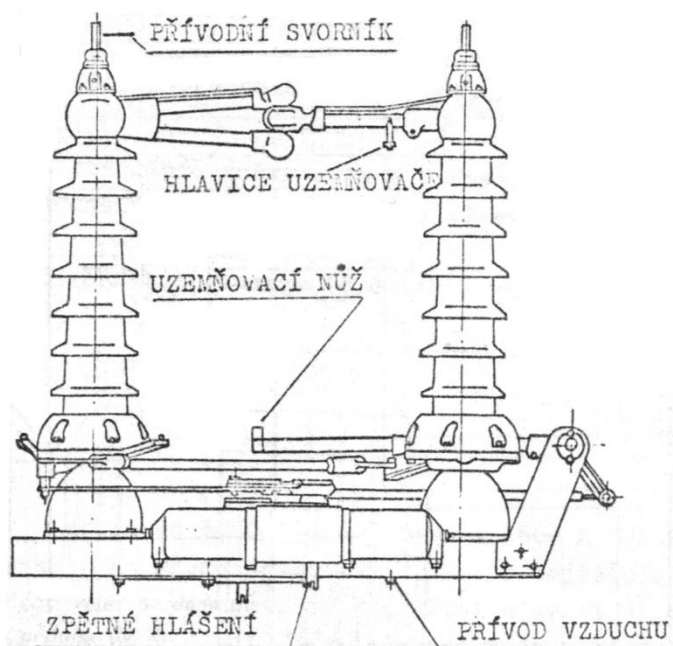
Spínač, kterým se uzemňuje část elektrického obvodu pro zabezpečení obsluhy. Je konstruován na stejný zkratový proud jako odpojovač. Většinou je základem je uzemňovací nůž z Al trubky, která je na jednom konci opatřena paralelními Cu kontakty, na druhém konci je (pro spojení se základním rámem) spojka z Cu ploštěného pletiva.

Pohyb uzemňovacího nože umožňuje pákový mechanismus, který umožňuje plynulý pohyb nože při jeho spínání.

Uzemňovací hlavice má speciální tvar a náběhové plochy pro bezpečné zavedení kontaktu uzemňovacího nože.

1.2.3 Odpojovač s uzemňovačem

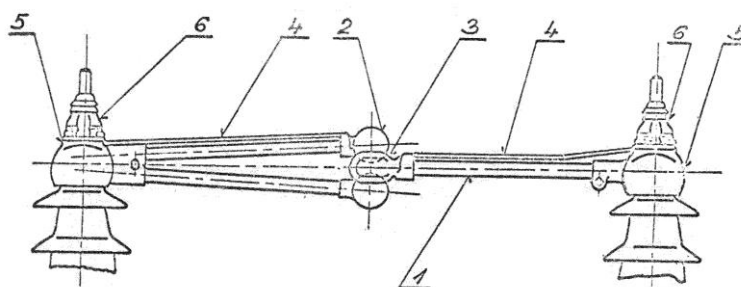
Někdy označován také jako uzemňovací. Odpojovač opatřený na každém pólu zvláštním nožem k uzemnění. Pohon uzemňovače je blokován, aby nedošlo k zapnutí uzemňovače na živé části obvodu. Tento odpojovač je zobrazen na obrázku (Obrázek 1.2).



Obrázek 1.2 – Výkres odpojovače (převzato z: [2])

1.2.4 Proudová dráha

Část odpojovače, která převádí proud. Pro VVN se obvykle skládá ze dvou přívodních hlavice, odpojovacích ramen a kontaktního tělesa. Proudová dráha se dimenzuje s ohledem na jmenovitý proud, mechanicky a tepelně na přenášený zkratový proud. Příklad je uveden na obrázku (Obrázek 1.3)



- 1 - Odpojovací ocelové rameno
- 2 - vodivá koule kontaktu
- 3 - kontaktní těleso
- 4 - měděné přívodní pásy
- 5 - horní čepička
- 6 - otočná hlavice

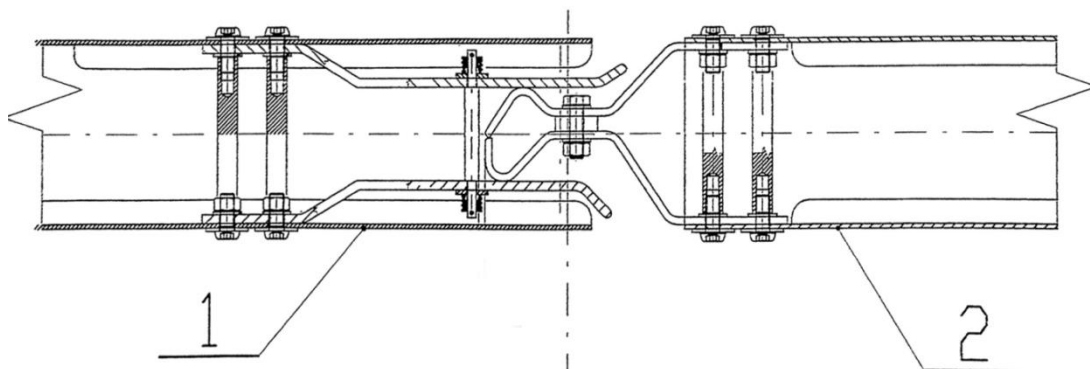
Obrázek 1.3 – Proudová dráha odpojovače typu ODV 60 – 132 kV (800 - 1000 A) (převzato z: [2])

1.2.5 Izolační podpěry

Nesou proudovou dráhu a jsou téměř výhradně vyrobeny z porcelánu. Jsou často složeny z více částí. Pro větší napěťové hladiny jsou různě vylepšovány z důvodu mechanické pevnosti (např. izolační podpěrné trojnožky).

1.2.6 Kontakty

Pro odpojovače VN se většinou používá různých typů kontaktů s přímkovým stykem. Obvykle se jedná o nožové kontakty, které jsou pružinami přitlačovány na pevný kontakt. Pro větší proudové zatížení se kontakty i nože spojují paralelně. Příklad kontaktního je zobrazen na obrázku – Obrázek 1.4. Jedná se o kontaktní ústrojí odpojovače SHJ-12xx pro jmenovité napětí 123 kV. [2]



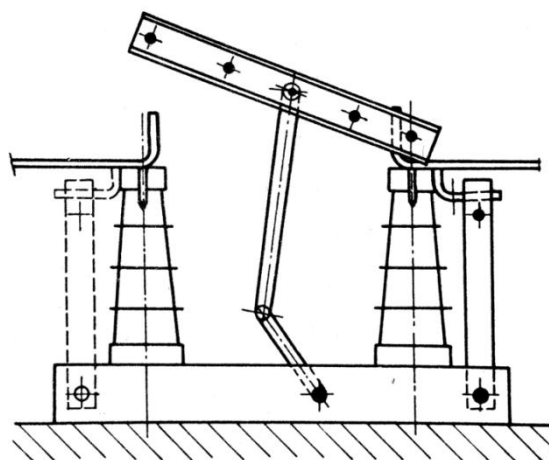
Obrázek 1.4 – Kontaktní ústrojí odpojovače SERW SHJ-1216, 1 – rameno s dotykem, 2 – rameno s kontaktní hlavicí (převzato z katalogu výrobce)

1.3 Dělení odpojovačů

Konstrukční řešení odpojovačů je několik typů. Pro různé napěťové hladiny se používají různě způsoby konstrukce. Konstrukce se také liší v závislosti na tom, zda je odpojovač ve venkovním nebo vnitřním provedení. V této kapitole uvedu základní způsoby dělení odpojovačů podle konstrukce a jiných parametrů. [2]

1.3.1 Podle koncepce provedení

Odpojovač nožový – pohyblivá spínací část má tvar nože, který se otáčí v rovině pólů. Většinou se používá pro VN. (Obrázek 1.5)



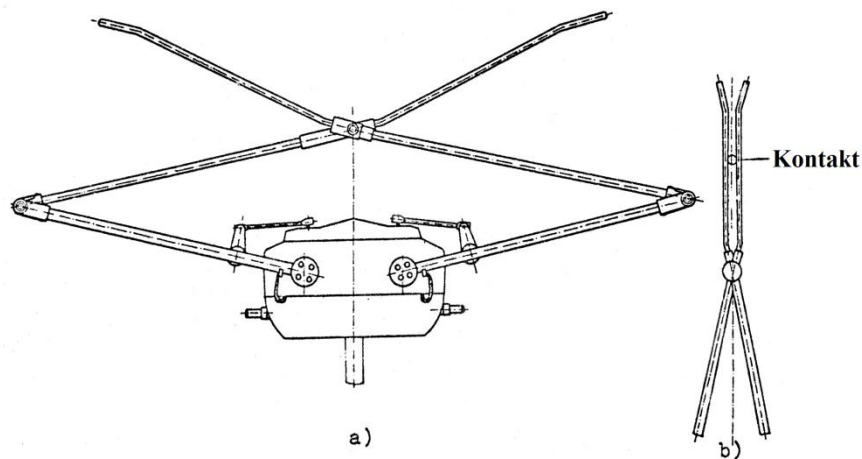
Obrázek 1.5 – Nožový odpojovač VN pro vnitřní montáž (převzato z: [2])

Odpojovač s dvojitým pohybem nože – spínací část je pohyblivá a má tvar nože, nejprve se otáčí okolo vlastní osy a potom se sklápí v rovině pólů.

Odpojovač posuvný – spínací část se posouvá v rovině pólů.

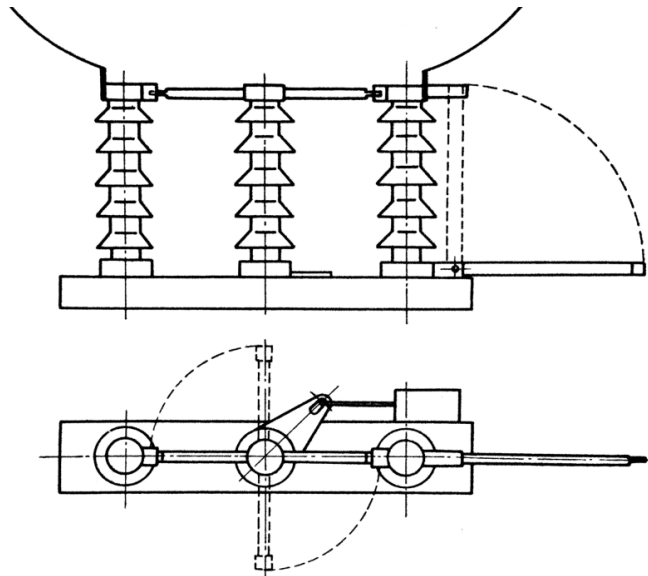
Odpojovač sklápěcí – spínací část se sklápí v rovině pólů. Používá se pro VN (Obrázek 1.5) i pro VVN (odlišná konstrukce než u VN)

Odpojovač pantografický (nůžkový) – pevný kontakt je umístěn na vedení a nesouvisí s konstrukcí odpojovače. Pantograf nese pohyblivou spínací část. Vertikální pohyb umožňuje úsporu plochy. (Obrázek 1.6)



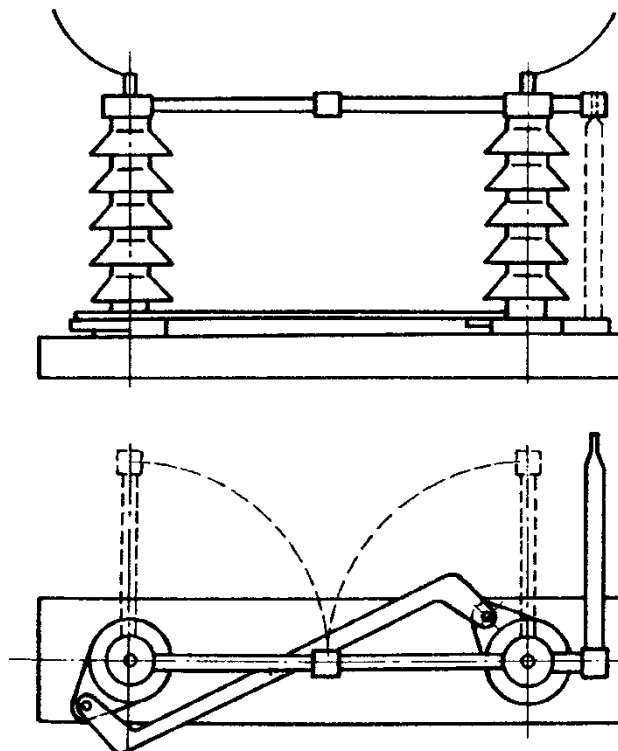
Obrázek 1.6 – Pantografický odpojovač (převzato z: [2])

Odpojovač otáčivý (rotační) – spínací část je pohyblivá a je uložena na otočném izolátoru. Při spínání se otáčí podle osy pohonného otočného izolátoru v rovině kolmé k rovině pólů. (Obrázek 1.7)



Obrázek 1.7 – Otočný odpojovač VVN trojizolátorový (převzato z: [2])

Horizontální odpojovač – Odpojovač se dvěma izolátory. Spínání probíhá v horizontální rovině a oba izolátory jsou otočně a nesou pohyblivé kontakty. Jedná se o nejrozšířenější typ. Tímto typem se bude zabývat tato diplomová práce. (Obrázek 1.8)



Obrázek 1.8 – Horizontální odpojovač VVN dvouizolátorový (převzato z: [2])

1.3.2 Podle počtu podpěr

Odpojovač jednopodpěrový – Pohyblivá spínací část proudové dráhy je mechanicky spojena se základním rámem odpojovače a pevný kontakt je upevněn na samostatném podpěrném nebo závěsném izolátoru jiného přístroje

Odpojovač dvoupodpěrový (třípodpěrový) – Proudová dráha je nesena dvěma (třemi) podpěrami (jednoduchými nebo složenými).

1.3.3 Podle umístění v zařízení

Dělení je na vnitřní a venkovní a liší se hlavně izolačními podpěrami. Pro venkovní odpojovače jsou izolátory opatřeny stříškami pro prodloužení povrchové dráhy.

1.3.4 Podle počtu pólů

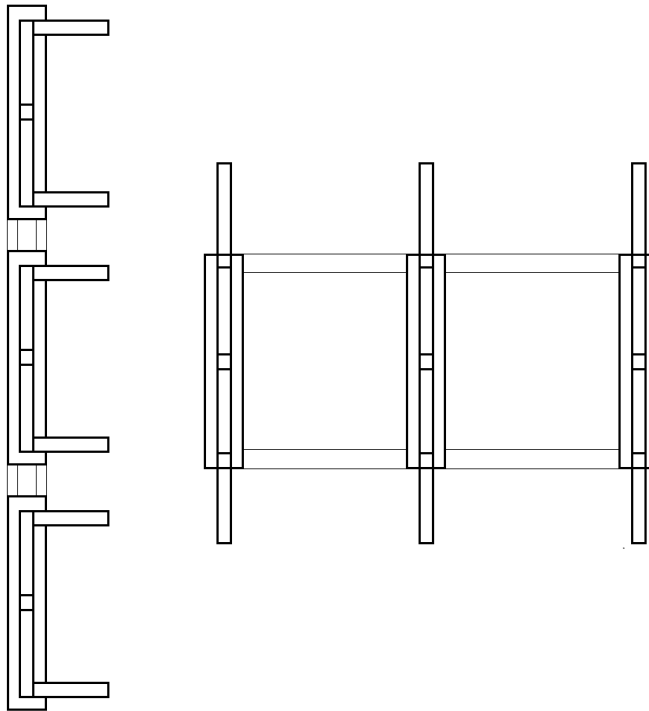
Jednopolové - Na základním nosném rámu se nachází odpojovač pro jeden pól. Jednopolové provedení je společně s trojpolovým provedením nejčastěji používané.

Trojpolové - Na nosném rámu se nachází tři odpojovače pro tři póly. Jedná se o hojně používané provedení pro napětřovou hladinu 110 kV. Další provedení jsou dvoupolové a vícepolové, ale tyto provedení nejsou tak časté.

1.3.5 Podle uspořádání pólů

Vedle sebe - Jednotlivé póly jsou uspořádány vedle sebe.

Za sebou - Jednotlivé póly jsou uspořádány za sebou. Obě uspořádání jsou zobrazeny na obrázku (Obrázek 1.9).



Obrázek 1.9 – Trojpolový odpojovač v uspořádání za sebou a vedle sebe

1.3.6 Podle možnosti uzemnění hlavních obvodů

S uzemňovačem - Součástí odpojovače je i uzemňovací nůž.

Bez uzemňovače - Simulovaný odpojovač je tohoto typu.

1.3.7 Podle druhu pohonu

S ručním pohonem - Samotný pohyb odpojovače je ovládán obsluhou ručně.

Se strojním pohonem - Tlakovzdušným, motorovým nebo jiným pohonem.


Odpojovač lze ovládat na dálku.

1.3.8 Podle pohybu proudové dráhy

S horizontálním pohybem – Jsou obvykle jednodušší konstrukce

S vertikálním pohybem – Mají výhodu v úspoře půdorysné plochy.

Tabulka 1.1 – Typy odpojovačů na různé napěťové hladiny



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

1.4 Jmenovité charakteristické hodnoty

V ČSN jsou uvedeny některé charakteristické hodnoty. Jsou to jmenovité hodnoty spínacích a řídicích zařízení včetně pohonů a pomocných zařízení. V této kapitole uvedu některé z nich, které se týkají odpojovačů nebo uzemňovačů.

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

Jmenovitý kmitočet (F_r) – Normalizované hodnoty jmenovitého kmitočtu jsou 16 2/3 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 60 Hz.

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

Poznámka: je třeba věnovat pozornost skin efektu v závislosti na tvaru, konstrukci a materiálu hlavní proudovodné dráhy odpojovače pracujícího při 60 Hz, protože bylo prokázáno, že u vodičů čtvercového průřezu dochází k odchylce větší než 5 % v porovnání se stavem při 50 Hz.

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

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

Jmenovitý dynamický výdržný proud (I_p) – Vrcholová hodnota první nejvyšší půlvlny zkratového proudu, který spínací a řídicí zařízení snese bez poškození v zapnuté poloze za předepsaných podmínek užití a provozu. Další upřesnění jsou uvedeny v normě ČSN EN 62 271-1.

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

Jmenovité hodnoty mechanické trvanlivosti pro odpojovače – Odpojovač musí být při dodržení programu údržby předepsaného výrobcem schopen vykonat následující počet funkcí:

Tabulka 1.2 - Klasifikace odpojovačů podle mechanické trvanlivosti

Třída	Typ odpojovače	Počet spínacích cyklů
M0	Standardní odpojovač (normální mechanická trvanlivost)	1000
M1	Odpojovač určený pro použití s vypínačem stejné třídy (zvýšená elektrická trvanlivost)	2000
M2	Odpojovač určený pro použití s vypínačem stejné třídy (zvýšená elektrická trvanlivost)	10000

Jmenovité hodnoty elektrické trvanlivosti pro uzemňovače – V tabulce je uvedena klasifikace uzemňovačů podle elektrické trvanlivosti:

Tabulka 1.3 - Klasifikace uzemňovačů podle elektrické trvanlivosti

Třída	Typ uzemňovače
E0	Uzemňovače bez zapínací schopnosti
E1	Uzemňovače schopný zapnutí dvou zkratů
E2	Uzemňovače schopný zapnutí pěti zkratů

Odpojovače nejsou vybaveny zhášecí komorou, nemají schopnost vypínat ani jmenovité, ani zkratové proudy. Veškerá jejich manipulace se musí provádět bez zatížení. V opačném případě by došlo k vytvoření elektrického oblouku, který by vlivem vysokých teplot mechanicky poškodil kontakty odpojovače. V kontaktní hlavici je přechod proudu z jednoho ramene do druhého přes kontaktní palce. [4][5]

1.5 Značení odpojovačů

3	S	H	X		X	-	XX	XX	.X
1	2	3	4		5		6	7	8

1 – Typové označení

2 – Typ přístroje

S – Odpojovač

3 – Konstrukční typ

H – Horizontální

S – Sklápěcí

P – Pantografický

4 – Počet pólů

J – Jednopolový

D – Dvoupólový

T – Trojpolový

5 – Uzemňovač

U1, U2 – 1 Uzemňovač

W – 2 Uzemňovače

6 – Jmenovité napětí

07 – 72,5 kV

12 – 123 kV

24 – 245 kV

42 – 420 kV

7 – Jmenovitý proud

12 - 1200 A

16 – 1600 A

20 – 2000 A

31 – 3150 A

8 – Doplnkové označení

1.6 Typové zkoušky

1.6.1 Všeobecně

Typové zkoušky jsou určeny k prověření vlastností spínacích a řídicích zařízení, jejich pohonů a pomocných zařízení [4][5].

1.6.1.1 Uspořádání zkoušek do skupin

Typové zkoušky se obvykle provádějí na maximálně čtyřech zkušebních vzorcích (pokud není uvedeno jinak).

Každý vzorek musí přesně odpovídat technické dokumentaci produktu. Musí být podroben jedné nebo více typovým zkouškám. Tyto zkoušky mohou být uspořádány do skupin. Toto uspořádání je například uvedeno v tabulce (Tabulka 1.4).

Tabulka 1.4 – Příklad možného uspořádání zkoušek do skupin

Skupina	Typová zkouška
1	Zkoušky elektrické pevnosti izolace hlavního obvodu
	Zkouška radiového rušení
2	Měření elektrického odporu hlavního obvodu
	Zkoušky oteplení
3	Zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem
	Zapínací a vypínací zkoušky
4	Zkoušky stupně ochrany krytem
	Zkoušky těsnosti (přicházejí-li v úvahu)
	Mechanické zkoušky
	Zkoušky vlivu prostředí
	Zkoušky elektrické pevnosti izolace pomocných a řídicích obvodů

Všechna zařízení musí být na začátku zkoušky nová a v čistém stavu (nebo znovu uvedená do původního stavu).

1.6.2 Zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem

Zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem se provádějí u hlavních obvodů a spínacích zařízení kde to přichází v úvahu. Zkouší se schopnost odolat vlivu dynamického výdržného proudu a jmenovitého krátkodobého výdržného proudu.

Provádějí se při jmenovité frekvenci s tolerancí $\pm 10\%$ při jakékoliv vhodné teplotě okolního vzduchu a při napětím, které připadá v úvahu pro dané zařízení.

1.6.2.1 Uspořádání odpojovače a zkušebního obvodu

Zkouška musí být reprezentativní, proto se zařízení montuje na rovnocenný rám a přístroj se zkouší v zapnuté poloze s čistými novými kontakty. Před zkouškou se provádí jeden spínací cyklus bez zatížení, aby se změřil odpor hlavního obvodu.

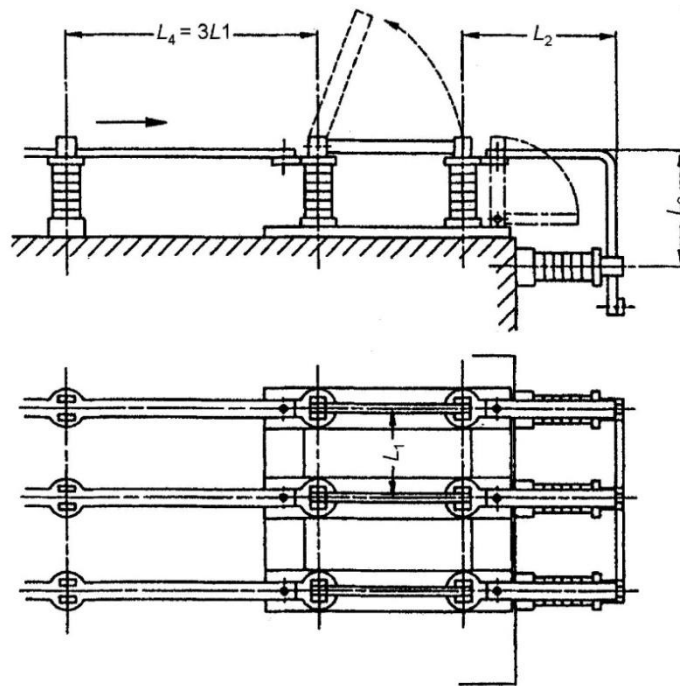
Prívody ke spínacímu zařízení nesmí způsobovat nadměrné namáhání svorek. Vzdálenost podpěr prívodů a svorek musí být stanovena v technické dokumentaci.

Všeobecné podmínky zkoušky

Zkušební uspořádání musí představovat nejnepříznivější podmínky elektromagnetických sil, které mají snahu vypnout odpojovač nebo uzemňovač.

Z důvodu všeobecné použitelnosti zkoušek, musí být odpojovače zkoušeny v uspořádáních, které jsou předepsané na obrázcích - Obrázek 1.10 a Obrázek 1.11. Pokud jsou použity ohebné vodiče, musí být odpojovače zatíženy statickým mechanickým namáháním svorek.

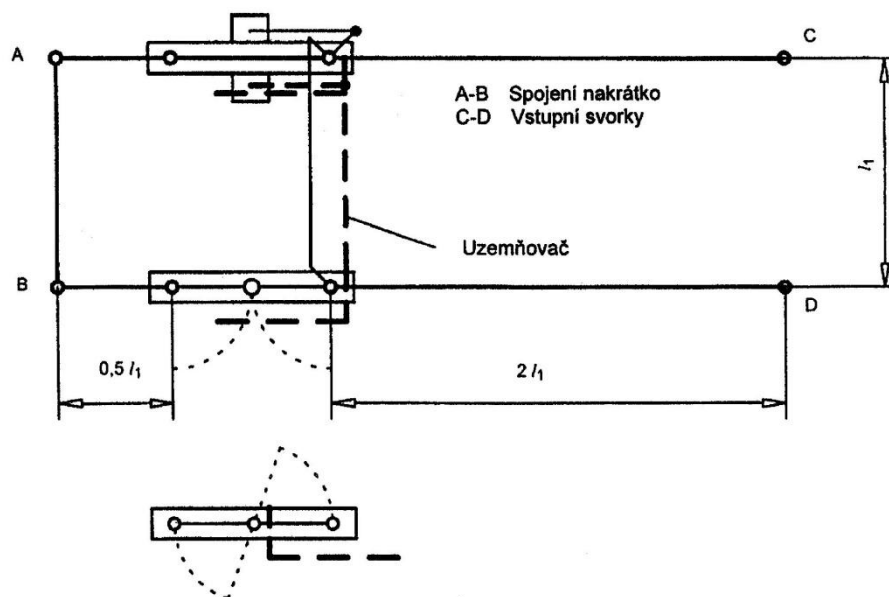
Všechny zkoušky by měly být provedeny přednostně třífázově. Pokud je provedena zkouška jako jednofázová, má být přednostně provedena na dvou sousedních pólech. Pokud je zkouška provedena jen na jednom pólu, musí být zpětný vodič veden ve vzdálenosti fázové rozteče od zkoušeného pólu. Zpětný vodič musí být veden rovnoběžně s hlavní proudovodnou dráhou odpojovače (nejnepříznivější podmínky elektromagnetických sil) a to ve stejné výšce nad základem.



Obrázek 1.10 – Třífázové uspořádání zkoušky pro odpojovače a uzemňovače pro jmenovitá napětí do 52 kV (převzato z: [5])

Odpojovače a uzemňovače na jmenovitá napětí 52 kV a vyšší

Pro odpojovače s horizontální odpojovací dráhou a odpovídající uzemňovače se použije jednofázové zkušební uspořádání uvedené na obrázku (Obrázek 1.11).



Obrázek 1.11 – Jednofázové uspořádání zkoušky pro odpojovače s horizontální odpojovací dráhou a pro uzemňovače pro jmenovitá napětí 52 kV až 550 kV (l_1 – Minimální vzdálenost mezi osami sousedních pólů stanovená výrobcem) (převzato z: [5])

Pro dělené odpojovače se svislou odpojovací dráhou a odpovídající uzemňovače se použije zkušební uspořádání uvedené v normě ČSN EN 62 271-102.

1.6.2.2 Zkušební proud a doba trvání zkoušky

U zkušebního proudu jsou důležité dva parametry a to jmenovitý krátkodobý výdržný proud (I_k) a jmenovitý dynamický výdržný proud (I_p). Zkušební proud I_t musí těmto parametrům odpovídat.

Zkušební proud I_t musí protékat po dobu t_t rovnající se jmenovité době t_k zkratového proudu s tolerancí střídavé složky -0% a +5%. Pokud toho nelze vlivem omezených možností zkušebny dosáhnout, platí alternativní postup uvedený v normě ČSN EN 62 271.

Je možné oddělit zkoušku dynamickým výdržným proudem od zkoušky krátkodobým výdržným proudem. V tom případě se provádějí dvě zkoušky:

- pro zkoušku dynamickým výdržným proudem nesmí být doba, během níž protéká zkratový proud, kratší než 0,3 s.
- pro zkoušku krátkodobým výdržným proudem se musí doba, během níž protéká zkratový proud, rovnat jmenovité době

1.6.2.3 Chování odpojovačů a uzemňovačů během zkoušky

Jmenovitý dynamický výdržný proud a jmenovitý krátkodobý výdržný proud přenášený odpojovačem v zapnuté poloze při jmenovité době zkratu nesmí způsobit mechanické poškození žádné z částí odpojovače, rozpojení kontaktů a nesmí dojít k hoření oblouku.

1.6.2.4 Stav odpojovačů a uzemňovačů po zkoušce

Po provedení zkoušky nesmí být zařízení významně poškozeno a musí být schopno normálního provozu. Musí být schopno přenášet jmenovitý proud, aniž by se překročilo dovolené oteplení zařízení.

Pro prověření těchto požadavků se provedou tyto činnosti:

a) Po zkoušce se musí provést jeden spínací cyklus mechanického spínacího přístroje bez zatížení, kontakty se musí rozpojit na první pokus;

b) Musí se změřit elektrický odpor hlavního obvodu. Pokud elektrický odpor vzrostl o více než 20 % a pokud není možné ověřit podmínky kontaktů prohlídkou, je vhodné provést dodatečnou zkoušku oteplení.

2 Teoretický úvod

2.1 Síly v elektromagnetickém poli

Síly v elektromagnetických polích dosahují mnohem vyšších hodnot než síly v elektrických polích (jelikož v přírodě jsou k dispozici látky, pro něž je $\mu_r \gg \epsilon_r$), proto mají v praxi větší využití. Na působení sil na proudovodiče je založena spousta zařízení. Jedná se například o elektromotory všech druhů, aktuátory a podobně. [7][8]

Nástrojem k analýze silových poměrů jsou metody, pomocí nichž lze vyřešit:

Lorentzovu sílu

Sílu z energie magnetického pole

Sílu na základě Maxwellova tenzoru pnutí

2.1.1 Lorentzova síla působící na proudovodiče v magnetickém poli

Na bodový náboj Q , který se pohybuje v magnetickém poli \mathbf{B} rychlostí \mathbf{v} , působí tzv. *Lorentzova síla*.

$$\mathbf{F}_m = Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad [\text{N}] \quad (3.1)$$

Na masivní proudovodič s proudovou hustotou \mathbf{J} , o objemu V působí v magnetickém poli \mathbf{B} síla.

$$\mathbf{F}_m = \int_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \quad (3.2)$$

Odvození předchozí rovnice: Je-li ve vodiči hustota elektrického náboje ρ , je v jeho objemovém elementu dV náboj $dQ = \rho dV$ a jelikož $\rho \mathbf{v} = \mathbf{J}$, působí na něj síla

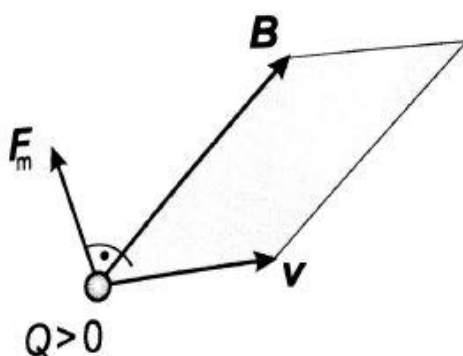
$$d\mathbf{F}_m = dQ(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \rho(\mathbf{v} \times \mathbf{B})dV = (\mathbf{J} \times \mathbf{B})dV \quad (3.3)$$

Speciálně, na tenký vodič s proudem I , jež má tvar křivky l , působí Lorentzova síla, již lze vyjádřit vztahem

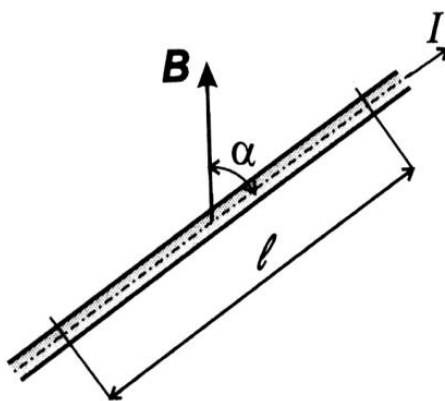
$$\mathbf{F}_m = I \int_l d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (3.4)$$

Rovnice (3.4) plyne z rovnice (3.2) nebo z této úvahy. Náboj dQ urazí za čas dt dráhu $d\mathbf{l}$ (Obrázek 2.1). Jeho rychlost je $\mathbf{v} = d\mathbf{l}/dt$. Dosazením do rovnice (3.1) dostáváme sílu na vodič l :

$$\mathbf{F}_m = \int_l dQ \left(\frac{d\mathbf{l}}{dt} \times \mathbf{B} \right) = \frac{dQ}{dt} \int_l (d\mathbf{l} \times \mathbf{B}) = I \int_l (d\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (3.5)$$



Obrázek 2.1 – pohybující se bodový náboj (převzato z: [7])



Obrázek 2.2 – tenký přímý proudovodič (převzato z: [7])

Speciálně: z rovnice (3.4) plyne, že velikost Lorentzovy síly, která působí v magnetickém poli \mathbf{B} na *přímý tenký vodič* délky l , s proudem I (Obrázek 2.2), platí známý

vztah:

$$\mathbf{F}_m = BIl \sin \alpha \quad [\text{N}] \quad (3.6)$$

Kde α je úhel mezi vektorem \mathbf{B} a vodičem, orientovaným ve směru proudu I . Směr této síly určíme z vektorového součinu v rovnici (3.4), nebo podle *pravidla tří prstů levé ruky*, (Obrázek 2.3), kde:

Směr síly \mathbf{F}_m

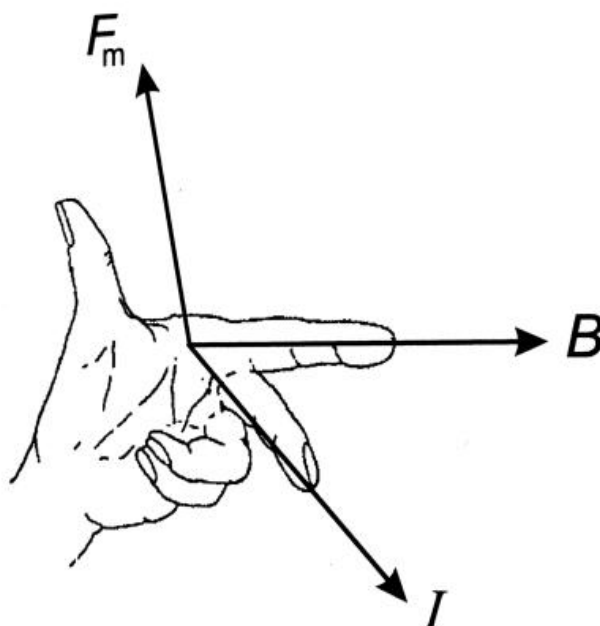
určuje palec

Směr vektoru magnetické indukce \mathbf{B}

určuje ukazovák

Směr proudu I

určuje prostředník



Obrázek 2.3 - Pravidlo tří prstů levé ruky (převzato z: [7])

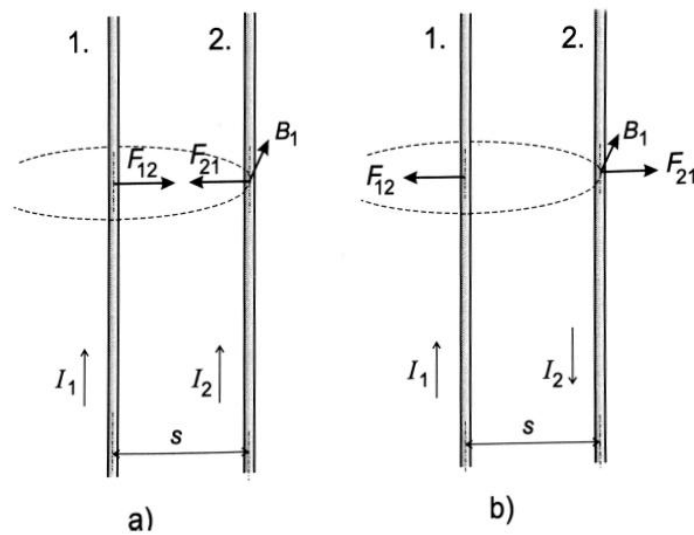
Rovnici (3.2) lze také chápat, že ve vodiči působí *objemová hustota Lorentzovy síly*

$$\mathbf{f}_m = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (3.7)$$

Lorentzova síla působící na celý vodič o objemu V , je pak

$$\mathbf{F}_m = \int_V \mathbf{f}_m dV \quad (3.8)$$

Z rovnice (3.6) je patrné, že při průchodu proudu stejným směrem se vodiče přitahují a naopak při opačném směru proudu se oddalují, což je zobrazeno na obrázku (Obrázek 2.4)

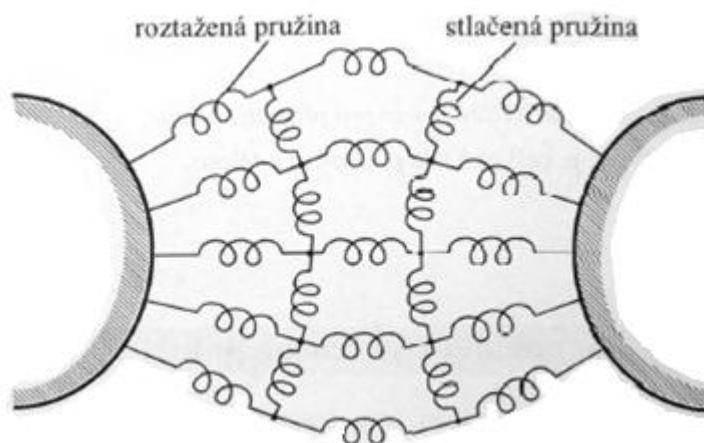


Obrázek 2.4 - Dva rovnoběžné vodiče s proudy a) ve stejném směru b) v opačném směru
(převzato z: [7])

Jak je vidět na obrázku (Obrázek 1.11). Obvod je zapojen do proudové smyčky. To znamená, že proud teče v opačném směru a tudíž síla, která působí na odpojovač, se snaží odpojovač rozpojit.

2.1.2 Maxwellův magnetický tenzor pnutí

Matematicky popisuje silové poměry v elektrickém, resp. Magnetickém poli. Odvodil ho J. C. Maxwell, který vycházel z představy, že prostor je vyplněn „pružným éterem“. Tímto éterem se přenáší silové působení na elektrické resp. magnetické objekty. Mechanická analogie je zobrazena na obrázku (Obrázek 2.5). V místě siločar jsou napjaté pružiny a v místě ekvipotenciál jsou stlačené pružiny. Na první pohled se může zdát, že tato Maxwellova teorie je dozvukem počátků výstavby teorie elektromagnetického pole, nicméně je stále účinným nástrojem k výpočtu elektromagnetických sil.[8]



Obrázek 2.5 – Mechanický model Faradayova „pružného éteru“ (převzato z: [8])

Pro magnetické pole o intenzitě \mathbf{H} (H_x , H_y , H_z), v prostředí o permeabilitě μ , je Maxwellův magnetický tenzor pnutí vyjádřen symetrickou maticí:

$$T = \frac{\mu}{2} \begin{bmatrix} H_x^2 - H_y^2 - H_z^2 & 2H_xH_y & 2H_xH_z \\ \cdot & H_y^2 - H_x^2 - H_z^2 & 2H_yH_z \\ \cdot & \cdot & H_z^2 - H_x^2 - H_y^2 \end{bmatrix}$$

Objemová hustota síly je pak

$$\mathbf{f} = \text{div } \mathbf{T} \quad (3.9)$$

Celková síla působící na těleso o objemu V je:

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{f} dV \quad (3.10)$$

Objemová hustota síly \mathbf{f} se pak vyjádří pod rovnice 3.9 pomocí tenzoru \mathbf{T} a použije se Gauss-Ostrogradského věta:

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{f} dV = \int_V \operatorname{div} \mathbf{T} dV = \oint_{\Gamma} \mathbf{T} d\Gamma \quad (3.11)$$

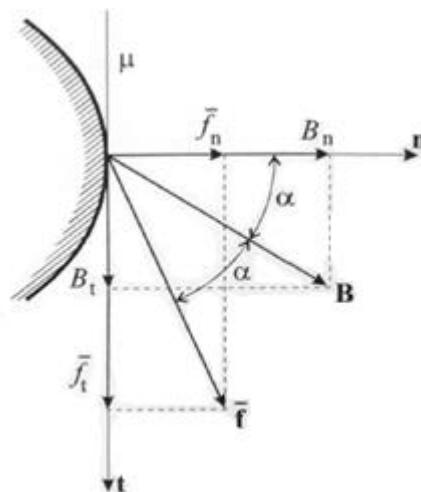
Kde Γ je uzavřená plocha obalující těleso o objemu V . (Při aplikacích se obvykle volí plocha Γ taková, na níž lze snadno vypočítat intenzitu \mathbf{H} , pro ni pak určíme \mathbf{T})

Zvolíme-li za plochu Γ povrch tělesa, pak tenzor \mathbf{T} přímo vyjadřuje plošnou hustotu síly:

$$\mathbf{T}\mathbf{n} = \bar{\mathbf{f}} \quad (3.12)$$

kde \mathbf{n} je jednotkový vektor normály plochy.

Nyní budou odvozeny vztahy pro normálovou a tečnou složku a bude dokázáno, že vektor \mathbf{B} pŕlí úhel mezi vektory \mathbf{n} a $\bar{\mathbf{f}}$. Tato skutečnost je zobrazena na obrázku.



Obrázek 2.6 – Normálová a tečná složka plošné hustoty síly (převzato z: [8])

Vektor plošné hustoty síly $\bar{\mathbf{f}}$ můžeme vyjádřit ve tvaru

$$\bar{\mathbf{f}} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B}(\mathbf{B}\mathbf{n}) - \frac{1}{2\mu} B^2 \mathbf{n} \quad (3.13)$$

Vektor $\bar{\mathbf{f}}$ se rozloží na . Označíme-li

$$\bar{\mathbf{f}} = \bar{f}_n \mathbf{n} + \bar{f}_t \mathbf{t}, \quad \mathbf{B} = B_n \mathbf{n} + B_t \mathbf{t} \quad (3.14)$$

A

$$B^2 = B_n^2 + B_t^2, \text{ kde } |\mathbf{n}| = 1, |\mathbf{t}| = 1 \quad (3.15)$$

Nalézáme normálovou složku síly

$$\bar{f}_n = \left[\frac{1}{\mu} \mathbf{B}(\mathbf{B}\mathbf{n}) - \frac{1}{2\mu} B^2 \mathbf{n} \right] \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{2\mu} (B_n^2 - B_t^2) \quad (3.16)$$

A tangenciální složku síly

$$\bar{f}_t = \left[\frac{1}{\mu} \mathbf{B}(\mathbf{B}\mathbf{n}) - \frac{1}{2\mu} B^2 \mathbf{n} \right] \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{\mu} (B_t B_n) \quad (3.17)$$

Položme $B_n = B \cos \alpha$, $B_t = B \sin \alpha$. Rovnice 3.16 a 3.17 nabudou tvar

$$\bar{f}_n = \frac{B^2}{2\mu} \cos 2\alpha \quad (3.18)$$

$$\bar{f}_t = \frac{B^2}{2\mu} \sin 2\alpha \quad (3.19)$$

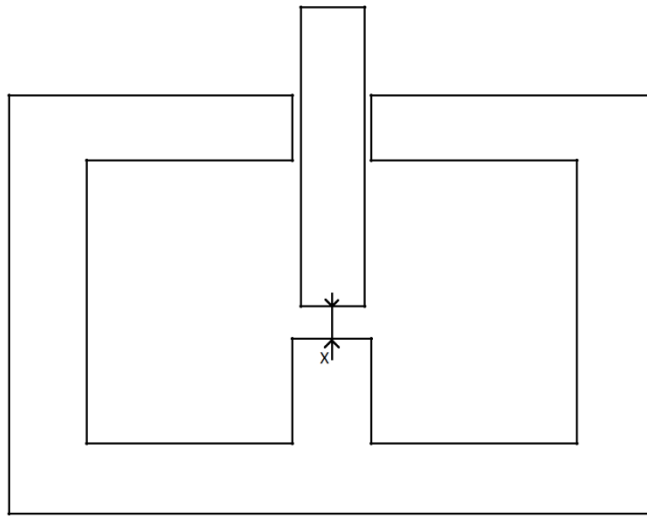
Kde α je úhel mezi vektorem \mathbf{B} a normálou.

Rovnice 3.16 až 3.19 pro plošnou hustotu síly $\bar{\mathbf{f}}$ platí i při $\mathbf{J} \neq \mathbf{0}$, tj. platí i tehdy když magnetikem prochází proud. Tyto rovnice byly totiž získány z Maxwellova magnetického tenzoru pnutí, jehož odvození připouští, že $\mathbf{J} \neq \mathbf{0}$. Tečná složka plošné hustoty síly je $\bar{f}_t \neq 0$ jen tehdy, když $\mathbf{J} \neq \mathbf{0}$.

2.1.3 Výpočet síly z energie magnetického pole

Pro elektromagnet s posuvným jádrem (Obrázek 2.7), platí rovnice

$$U_0 = RI + \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.20)$$



Obrázek 2.7 – Elektromagnet (překresleno podle: [8])

Kde U_0 je napětí zdroje, R odpor cívky elektromagnetu, I je budicí proud a Φ je magnetický indukční tok v jádře. Pokud upravíme rovnici (3.20) dostaneme energetickou bilanci za čas dt .

$$U_0 I dt = RI^2 dt + I d\Phi \quad (3.21)$$

Levá strana rovnice je pak energie dodaná zdrojem, pravá strana rovnice se skládá ze dvou členů. První člen jsou Jouleovy ztráty a druhý člen se skládá z energie magnetického pole (dW_m) a z práce vykonané pohybem kotvy po dráze dx , při působení síly F_x .

$$I d\Phi = dW_m + F_x dx \quad (3.22)$$

Energie magnetického pole elektromagnetu je

$$W_m = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}I\Phi \quad (3.23)$$

L je indukčnost cívky. Energie je funkcí proudu I a magnetického toku Φ : $W_m = W_m(I, \Phi)$. Síla působící na jádro elektromagnetu se dá určit ve dvou případech. Při pohybu kotvy je proud I ve vinutí konstantní a mění se jen tok Φ , nebo je to Φ konstantní a mění se proud I .

- a) První případ kdy proud ve vinutí I je konstantní. To znamená, že cívka elektromagnetu je napájena ze zdroje proudu. Z rovnice 3.22 plyne

$$dW_m = \frac{1}{2}Id\Phi \quad (3.24)$$

Dosazením do rovnice 3.21 dostaneme

$$2 dW_m = dW_m + F_x dx \quad (3.25)$$

Síla je pak

$$F_x = \left. \frac{dW_m}{dx} \right|_{I=\text{konst}} = \text{grad}_x W_m |_{I=\text{konst}} \quad (3.26)$$

Pokud je elektromagnet zkonstruovaný tak, že jádro má tři stupně volnosti, jde síla vyjádřit vztahem

$$\mathbf{F} = \text{grad}W_m |_{I=\text{konst}} \quad (3.27)$$

- b) Druhý případ kdy magnetický tok Φ je konstantní, to znamená, že $d\Phi = 0$. Podle rovnice 3.21 je

$$0 = dW_m + dF_x dx \quad (3.28)$$

A tedy

$$F_x = - \left. \frac{dW_m}{dx} \right|_{\Phi=\text{konst}} = - \text{grad}_x W_m |_{\Phi=\text{konst}} \quad (3.29)$$

Poslední vztah jde zobecnit na prostorové působení síly:

$$\mathbf{F} = \text{grad} W_m |_{I=\text{konst}} \quad (3.30)$$

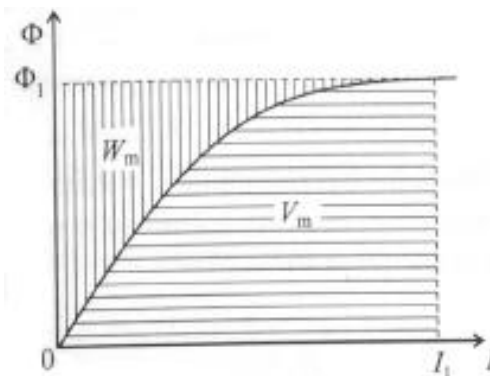
V případě, že se kotva nepohybuje ($x=\text{konstantní}$), je podle rovnice 3.21 $I d\Phi = dW_m$ a magnetická energie je pak

$$W_m = \int_0^{\Phi} I d\Phi \quad (3.31)$$

Na obrázku (Obrázek 2.8) je znázorněna ampérwéberová charakteristika magnetického obvodu elektromagnetu. energii W_m odpovídá podle rovnice 3.21 svisle vyšrafovaná plocha. V některých případech je výhodné uvažovat takzvanou *koenergii*, definovanou vztahem

$$V_m = \int_0^I \Phi dI \quad (3.32)$$

Na obrázku jí odpovídá vodorovně vyšrafovaná plocha. V případě že závislost $\Phi = f(I)$ lineární tak je $W_m = V_m$.



Obrázek 2.8 – Ampérwéberová charakteristika elektromagnetu (W_m – magnetická energie, V_m – magnetická koenergie) (převzato z: [8])

Lze dokázat, že sílu lze také určit z koenergie, jako u rovnic 3.26 a 3.29.

$$F_x = \left. \frac{dV_m}{dx} \right|_{I=\text{konst}} = - \left. \frac{dV_m}{dx} \right|_{\phi=\text{konst}} \quad (3.33)$$

3 Simulace elektrodynamických účinků zkratového proudu

3.1 Metoda konečných prvků

3.1.1 Úvod

Metoda konečných prvků (MKP, anglicky FEM - Finite elements method) byla nejdříve určena pro strojírenství, ale dnes se používá ve všech oblastech elektrotechnického průmyslu.

Pro výpočet fyzikálních polí existuje mnoho programů. Většina jich pochází z komerční oblasti (Ansys, Comsol) nebo také programy šířené pod GNU licenci (Agros2D). Programy Ansys i Comsol mohou simulovat nejen elektrická, magnetická, elektromagnetická, tepelná pole, ale také proudění plynů a kapalin.

Výhoda těchto dvou programů spočívá v možnosti tato fyzikální pole mezi sebou vzájemně kombinovat (například elektro-tepelné problémy).

3.1.2 Princip metody

Metoda je založena na popsání konkrétního fyzikálního problému diferenciálními rovnicemi a jejich řešení. Pokud by se jednalo o základní fyzikální úlohy na geometricky jednoduchých tělesech, analytické řešení by nepředstavovalo problém. Pro řešení fyzikálně komplexních problémů se složitou geometrií se ukázala být jako vhodnější numerická aproximační metoda, označovaná jako metoda konečných prvků.

Princip je jednoduchý. Spočívá v rozdělení geometricky definovaný objekt (který je předmětem výpočtu) na konečný počet částí (elementů), vyplňujících s dostatečnou přesností jeho tvar. Jednotlivé elementy jsou vzájemně spojeny v tzv. uzlech, matematických bodech o známých souřadnicích v prostoru. Pro jednoduchost lze říci, že jsou počítány hodnoty neznámých parametrů právě v těchto uzlech.

Jestliže jsou vlastnosti každého z těchto elementů popsány jednoduchou matematickou funkcí, dostáváme pro popis vlastností celého objektu soustavu rovnic. Řešení parciálně diferenciálních rovnic je převedeno na řešení soustavy algebraických rovnic, jejichž neznámé představují parametry předmětného fyzikálního problému. Soustava rovnic popisující celý

počítaný objekt potom představuje řádově tisíce až miliony rovnic.

Analýza fyzikálního pole je zpravidla rozdělena do tří etap:

- Pre-Processing
- Solution
- Post-Processing

3.1.2.1 Pre-processing

V této fázi se vytváří fyzikální (geometrický) model. Volí se materiálové vlastnosti a generuje se výpočetní síť. Většinou se zde také aplikují i okrajové podmínky (kolmost a rovnoběžnost magnetických toků atd.) a zatížení (proud, proudová hustota, úbytek napětí).

- **Tvorba modelu**

Model může být jedno, dvou nebo trojrozměrný (1D, 2D, 3D). U většiny moderních programů lze importovat předem připravený model. Také zde můžeme zvolit, zda je model symetrický. Symetrie usnadní výpočet.

- **Volba atributů úlohy**

Zde se nastavují informace o materiálu, volba typu elementů atd.

- **Zadávání materiálových vlastností**

Materiálové vlastnosti u MKP systémů představují velmi široký pojem. Pro výpočty multifyzikální podoby je potřeba znát nejen mechanické vlastnosti materiálu, ale i jejich závislost na teplotě, elektrické vlastnosti, změny v závislosti na čase (přechodové děje). Pro oblast elektromagnetismu je to elektrická vodivost a permeabilita.

3.1.2.2 Solution

Zde probíhá volba typu analýzy (statická, harmonická, přechodová). Výběr solveru ("řešiče") optimalizovaného pro dané fyzikální pole a nastavení požadované přesnosti. Podle typu úlohy se pak volí výpočetní časy, frekvence.

3.1.2.3 Post-Processing

V této závěrečné části se provádí vyhodnocení řešené úlohy. K dispozici je několik způsobů jak zobrazit vypočtené výsledky. Často se používá zobrazení mapy elektromagnetického pole nebo vynesení závislosti veličin na čase, teplotě. [6][9]

3.2 Simulovaný odpojovač

Simulaci jsem prováděl na horizontálním odpojovači 3SHJ - 12xx. Jmenovité proudy I_n jsou 1250 A (xx=12), 1600 A (xx=16), 2000 A (xx=20), 3150 A (xx=31). Jmenovité napětí je 123 kV.

3.2.1 Technická data

V následující tabulce (Tabulka 3.1) jsou uvedena technická data odpojovače 3SHJ - 12xx.

Tabulka 3.1 – Technická data odpojovače

Jmenovité napětí	123 kV
Frekvence	50 Hz
<u>Izolační hladina proti zemi mezi póly:</u>	
výdržné napětí při atmosfér. Impulsu	550 kV
Krátkodobé výdržné napětí střídavé	230 kV
<u>Izolační hladina v odpojovací dráze:</u>	
výdržné napětí při atmosfér. Impulsu	630 kV
Krátkodobé výdržné napětí střídavé	265 kV
Jmenovitý proud	1250 A, 1600 A, 2000 A, 3150 A
Jmenovitý krátkodobý proud (1s)	25 kA, 31,5 kA, 40 kA, 50 kA
Jmenovitý krátkodobý proud (3s)	40 kA
Jmenovitý dynamický proud	63 kA, 80 kA, 100 kA, 125 kA
<u>Jmenovité mechanické namáhání přípoj. svorek:</u>	
statické	1000 N
statické a dynamické	3000 N
dynamické	2500 N
Povrchová dráha izolátoru proti zemi	3800 mm
Mechanická životnost (spínací cykly)	3000

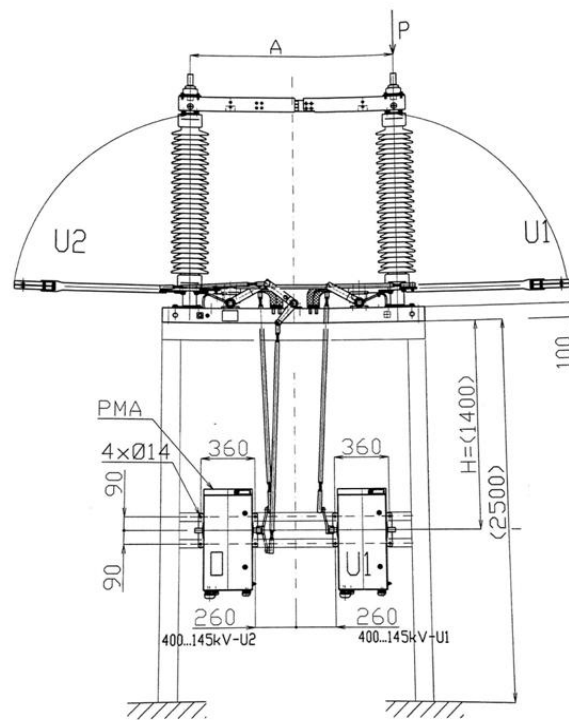


Obrázek 3.1 – Horizontální odpojovač 3SHJ-12xx

3.2.2 Model odpojovače

Celý model jsem namodeloval ve 3D pomocí programu SolidWorks. Model jsem vytvořil podle schémat obdržných od firmy SERW Sedlec s.r.o. Namodeloval jsem pouze proudovou dráhu s proudovou smyčkou bez keramických podpěrných izolátorů. Tento vytvořený model odpojovače byl poté použit při simulaci elektrodynamických účinků zkratového proudu na odpojovač.

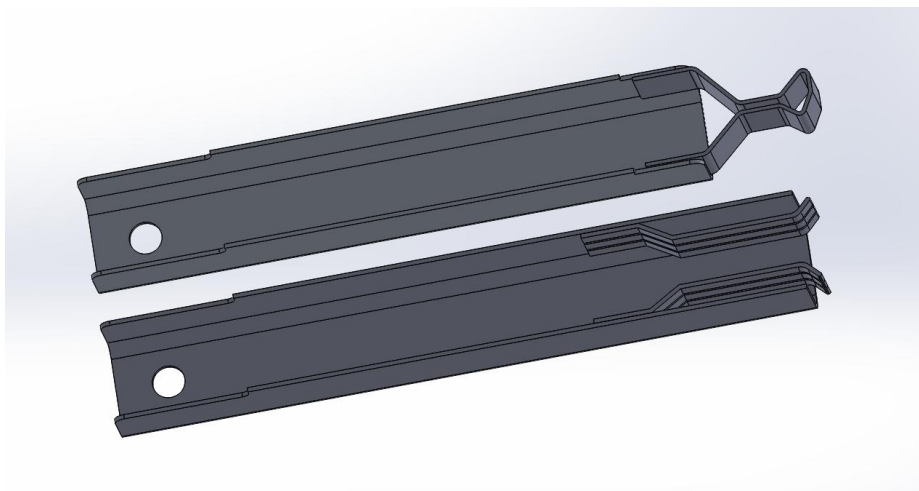
Při tvorbě simulace jsem zjistil, že model odpojovače je stále moc detailní a vyžadoval vysoké nároky na výpočetní výkon (vysoký počet elementů). Model byl poté zjednodušen. Výsledný zjednodušený model včetně proudové smyčky je zobrazen v kapitole 3.2.2.4.



Obrázek 3.2 - Výkres odpojovače 3SHJ - 12xx

3.2.2.1 Ramena odpojovače

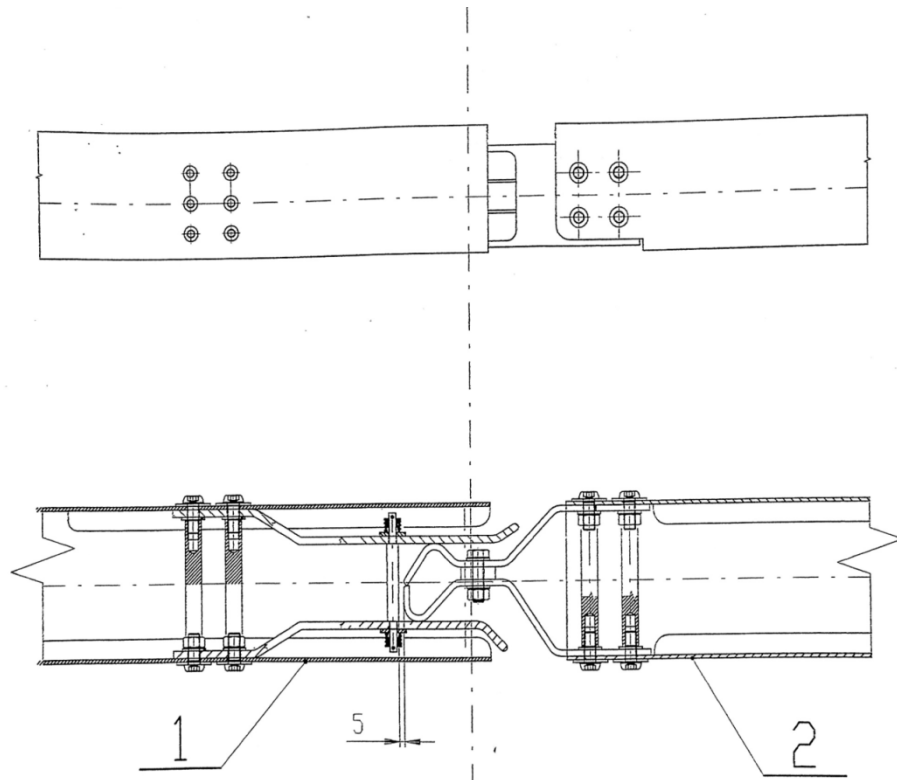
Ramena odpojovače jsou tvořena ohnutým hliníkovým plechem o tloušťce 5mm. Na obrázku (Obrázek 3.3) je zobrazeno kontaktní a dotykové rameno odpojovače.



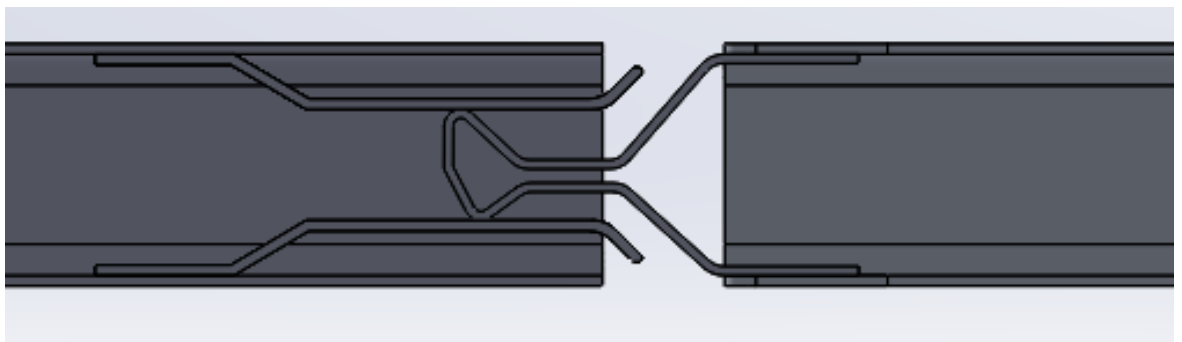
Obrázek 3.3 – Kontaktní a dotykové rameno

3.2.2.2 Kontaktní ústrojí

Na obrázku (Obrázek 3.4) je zobrazen výkres kontaktního ústrojí a na obrázku (Obrázek 3.5) model celého kontaktního ústrojí. Model je oproti výkresu zjednodušen.



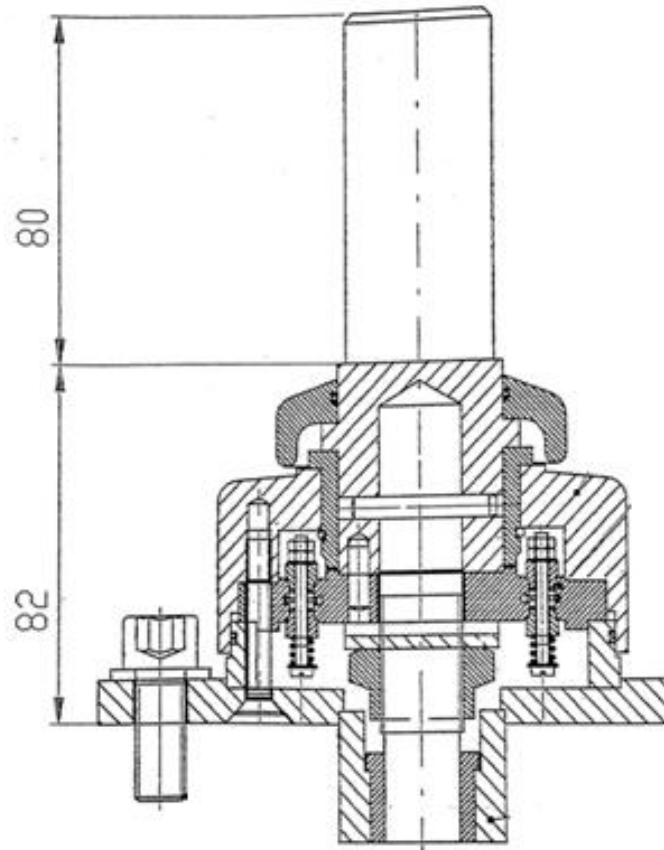
Obrázek 3.4 – Výkres kontaktního ústrojí



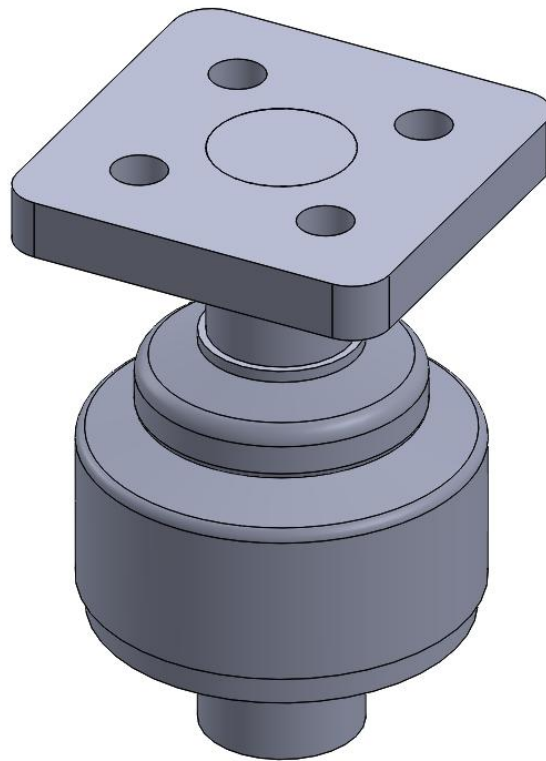
Obrázek 3.5 – Model kontaktního ústrojí

3.2.2.3 Přívodní hlavice

Na následujících dvou obrázcích (Obrázek 3.6, Obrázek 3.7) je zobrazen výkres a 3D model přívodní hlavice odpojovače.



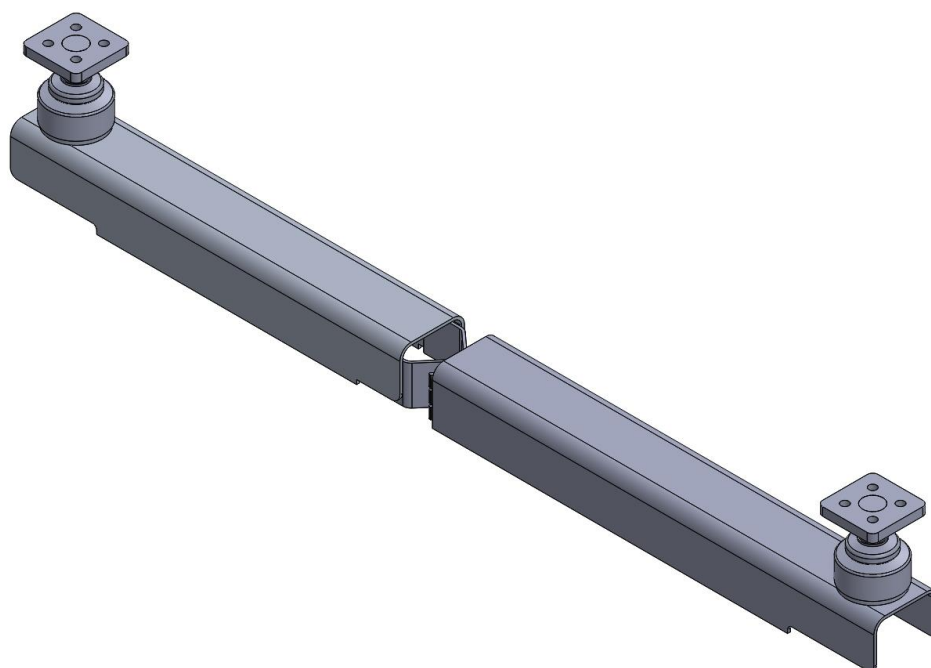
Obrázek 3.6 – Výkres přívodní hlavice



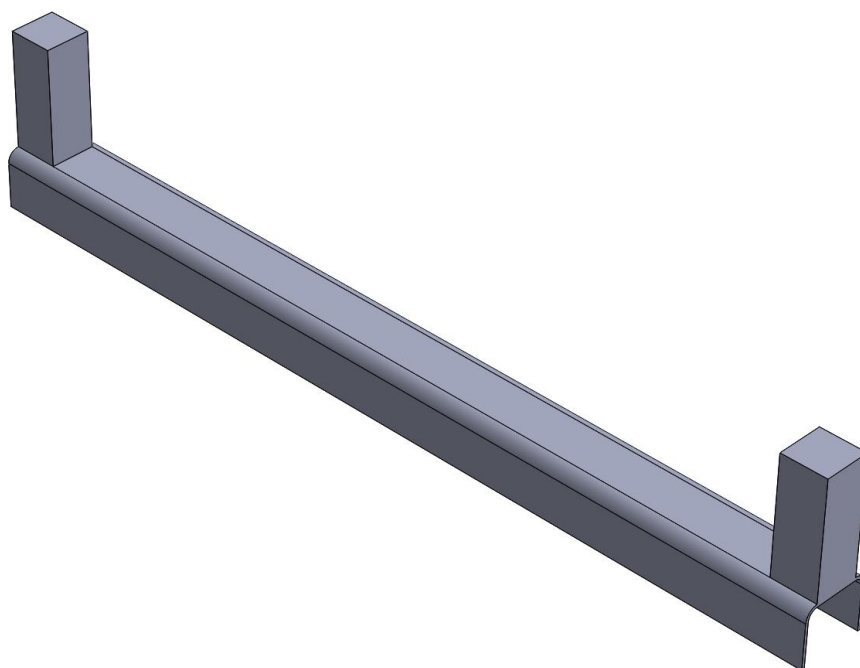
Obrázek 3.7 – Model přívodní hlavice

3.2.2.4 Kompletní model odpojovače a proudové smyčky

Na následujícím obrázku (Obrázek 3.8) je zobrazen detail původního modelu odpojovače s otočnými kontakty a kontaktní částí. Jak už bylo řečeno, tento model byl poté zjednodušen. Zjednodušená verze modelu je na obrázku (Obrázek 3.9). Celá proudová smyčka, která odpovídá normě, je na obrázku (Obrázek 3.10). Obrázek 3.11 zobrazuje celkové rozměry proudové smyčky.



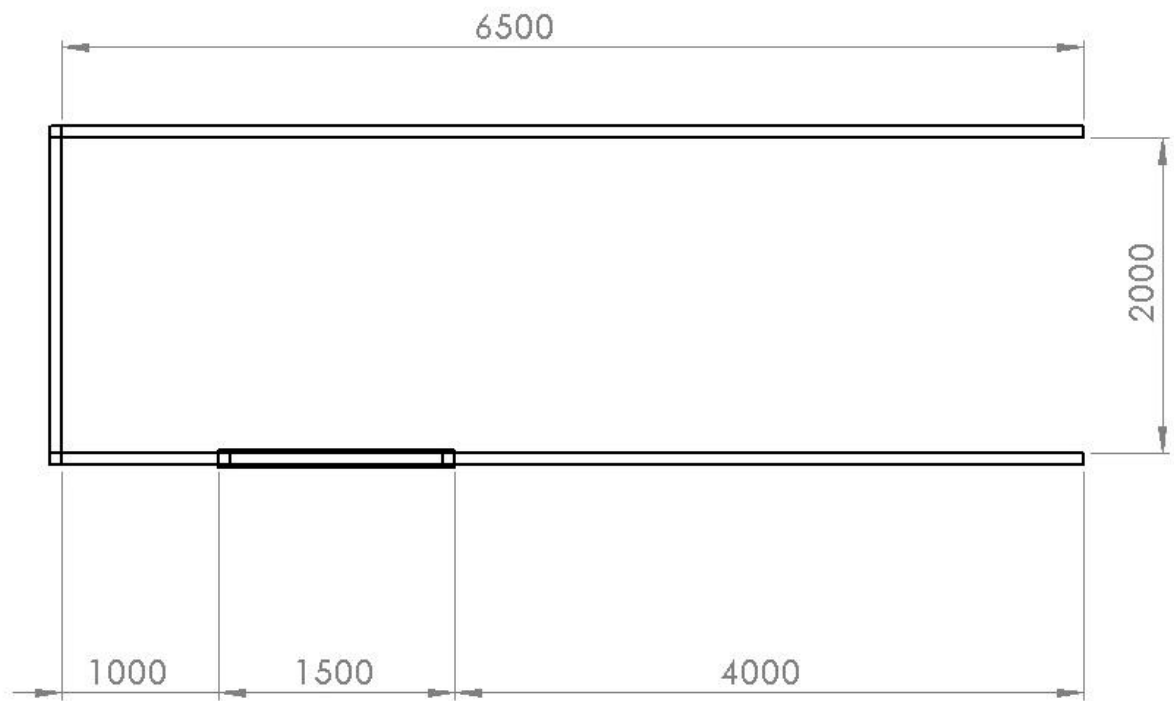
Obrázek 3.8 – Detail odpojovače



Obrázek 3.9 – Detail odpojovače po zjednodušení



Obrázek 3.10 – Model zjednodušeného odpojovače a proudové smyčky



Obrázek 3.11 – Výkres s rozměry (mm) celé proudové smyčky

3.3 Simulace elektrodynamických účinků

Pro simulaci elektrodynamických účinků zkratového proudu byl zvolen program COMSOL. Je to software pro řešení elektromagnetických, elektrostatických, teplotních a deformačních polí. COMSOL se stejně jako jiné softwary využívající metodu konečných prvků (FEM) skládá z preprocesoru, solveru a postprocesoru.

Preprocesor umožňuje uživateli definovat geometrii modelu (je možné importovat i CAD soubory), okrajové podmínky a vlastnosti materiálu. Solver zajišťuje samotný výpočet rozložení pole. Pro řešení soustav rovnic využívá metodu sdružených gradientů. V postprocesoru je možné vykreslovat různé typy výsledků jako např. řešenou veličinu, gradienty, isolinie, grafy nebo exportovat video soubory (např. pro časově závislé úlohy). Program COMSOL používá v uživatelském prostředí anglický jazyk, proto jsou v závorkách uvedeny originální anglické názvy.

Samotná simulace oteplení vodiče lze realizovat několika způsoby. Jako nesdružený fyzikální problém, částečně sdružený fyzikální problém nebo plně sdružený fyzikální problém.

- **Nesdružený problém**

U nesdruženého fyzikálního problému se řeší jednotlivé části simulace odděleně. Například u simulace oteplení se vyřeší nejdříve elektrické pole, vypočtou se konstantní ztráty ve vodiči (neměnné s teplotou) a tyto ztráty se poté aplikují do tepelného pole.

- **Částečně sdružený problém**

Jednotlivé části simulace jsou částečně propojené. Například u simulace oteplení se nejprve vyřeší elektrické pole z kterého se vypočtou ztráty závislé na teplotě a ty se poté aplikují do teplotního pole jako nestacionární zdroj tepla.

- **Plně sdružený problém**

Jednotlivé části simulace jsou plně propojené. Parametry potřebné pro výpočet jsou mezi částmi předávány mezi sebou jako například změna rezistivity, proudové hustoty a jiných parametrů. Simulace elektrodynamických účinků zkratového proudu na odpojovač byla řešena jako sdružený problém resp. program COMSOL si nastaví sílu

sdužení automaticky.

Výsledné simulaci předcházelo několik verifikačních modelů (nejprve ve 2D a poté ve 3D), abych zjistil, jak přesně dokáže program COMSOL silové účinky vypočítat a jaký způsob výpočtu je nejvíce přesný. Využíval jsem jak Lorentzovu sílu tak i Maxwellův magnetický tenzor pnutí.

Nyní popíši, jakým způsobem jsem postupoval, jaké simulace bylo potřeba nejprve provést a jaké jsem vyvodil ze simulací závěry. Každá simulace bude popsána svým jménem, počtem dimenzí a použitým fyzikálním polem (podle rozhraní COMSOL). U každé simulace bude krátký popis, čím jsem se v dané simulaci zabýval. Všechny simulace byly prováděny v ustáleném stavu. [10][11]

- 1. Paralelní vodiče, 2D/3D problém, magnetické pole** - Základem pro tento model byla definice jednoho ampéru. Porovnával jsem výsledek simulace se známým výsledkem z definice. Poté jsem model, převedl do 3D a postup z 2D problému jsem zopakoval.
- 2. Paralelní vodiče, 3D problém, elektrické proudy, magnetické pole** - Tento model vycházel z předchozího. Místo proudové hustoty byl použit elektrický proud. Ten byl poté přes sdužení aplikován do magnetického pole.
- 3. Proudová smyčka, 3D problém, elektrické proudy, magnetické pole** - Model jednoduché proudové smyčky, u které byly zachovány rozměry z předchozí simulace (paralelní vodiče 1 metr od sebe). Paralelní vodiče byly spojeny příčným vodičem.
- 4. Proudová smyčka odpovídající normě, 3D problém, elektrické proudy, magnetické pole - finální simulace** - V této simulaci byl použit model, který je uveden v kapitole 3.2.2.4. Bližší popis je uveden v kapitole 3.3.5.

3.3.1 Paralelní vodiče, 2D problém, magnetické pole

V první simulaci jsem se zabýval silou mezi dvěma rovnoběžnými vodiči protékaných proudem 1 A. Z definice ampéru víme, že mezi těmito dvěma vodiči umístěných ve vakuu na 1 metr délky působí síla $2 \cdot 10^{-7}$ N/m.

Cílem bylo zjistit, jak bude přesný výsledek vypočtený pomocí Maxwellova tenzoru pnutí a Lorentzovy síly. Poté jsem provedl porovnání rychlosti konvergence Maxwellova tenzoru pnutí a Lorentzovy síly pro různou přesnost sítě.

3.3.1.1 Vstupní parametry, materiály

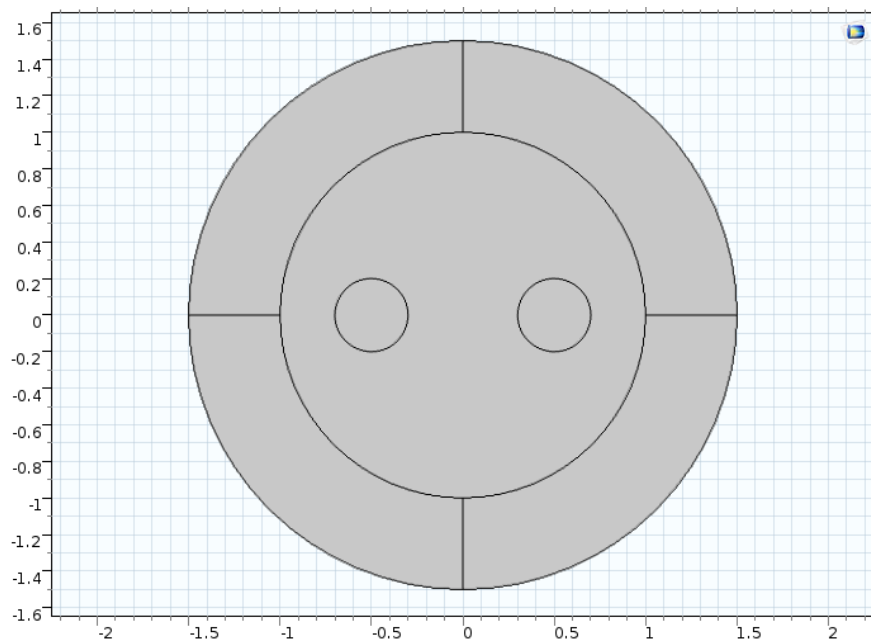
Použil jsem fyziku magnetické pole (magnetic fields), která neobsahuje okrajovou podmínku elektrický proud. Musel jsem proud přepočítat na proudovou hustotu. Proud I_0 byl 1 A a poloměr $r = 0,2$ m. Výsledek J_0 je zobrazen v rovnici 4.1.

$$J_0 = \frac{I_0}{\pi * r^2} = \frac{1}{\pi * 0,2^2} = 7,9577 \text{ A/m}^2 \quad (4.1)$$

Materiál celého modelu byl použit vzduch včetně vodičů a vzhledem k tomu, že se aplikuje proudová hustota, nemá použití vzduchu na vodiče vliv, dokonce je jistější použít vzduch na celý model.

3.3.1.2 Geometrie

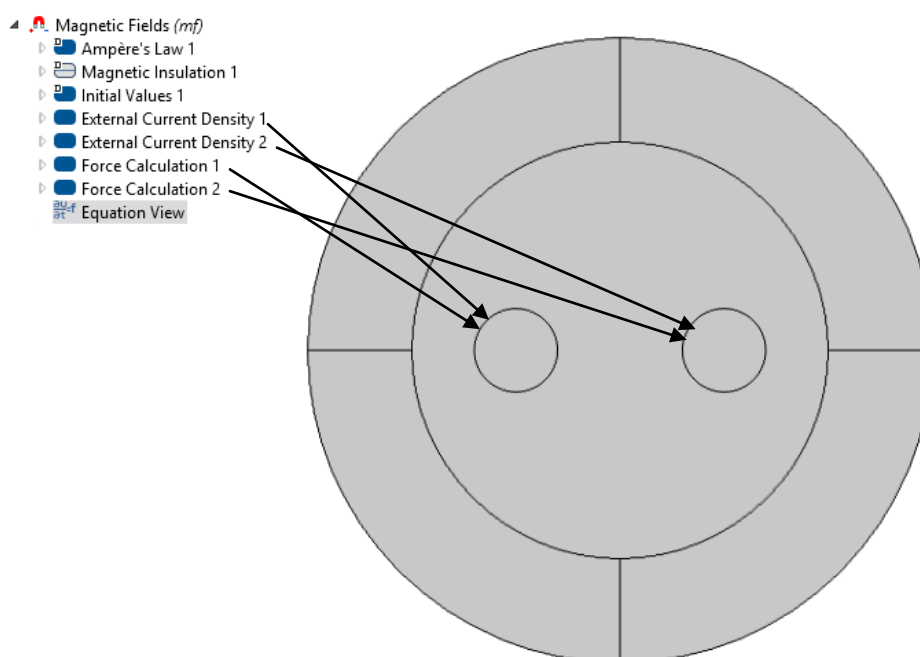
Na obrázku (Obrázek 3.12) je zobrazena geometrie prvního modelu. Vrstva okolo celého modelu je vrstva nekonečných prvků (infinite element domain).



Obrázek 3.12 – Geometrie modelu 1

3.3.1.3 Magnetické pole (magnetic fields)

Na obrázku (Obrázek 3.13) jsou zobrazeny okrajové podmínky. Důležitá podmínka je External Current Density (proudová hustota), která měla hodnotu uvedenou v rovnici 4.1 a byla aplikována na vodiče. Na levý vodič ve směru do nákresny a na pravý vodič ve směru z nákresny. Druhá okrajová podmínka je Force Calculation, bez které program COMSOL neumí vypočítat silové účinky. Ostatní podmínky jsou nastaveny defaultně programem COMSOL.

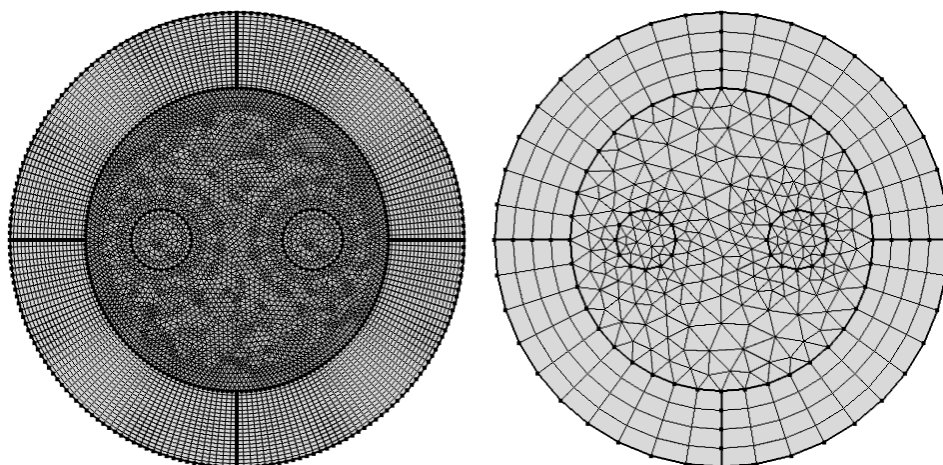


Obrázek 3.13 – Okrajové podmínky modelu 1

3.3.1.4 Síť

Na vodiče a vzduchové okolí jsem použil volnou trojúhelníkovou síť (free triangular mesh) a na vrstvu nekonečných prvků jsem použil mapovanou mesh (mapped) s pevně nastavenými rozměry.

Na závěr byl model vypočten znovu pro různé hodnoty velikostí elementů sítě z důvodu zjištění rychlosti konvergence Maxwellova tenzoru pnutí a Lorentzovy síly. Na obrázku (Obrázek 3.14) je zobrazena nejjemnější a nejhrubší použitá síť.



Obrázek 3.14 – Nejjemnější a nejhrubší síť modelu 1

3.3.1.5 Porovnání rychlosti konvergence

Pro výpočet jsem použil parametrickou síť, kdy se v závislosti na parametru měnila velikost elementů (5 velikostí). Pro každou síť jsem vypočetl sílu z Maxwellova tenzoru pnutí a z Lorentzovy síly. Tyto hodnoty jsem poté zanesl do grafu a porovnal jsem rychlost konvergence.

Výsledky vypočtené pomocí Maxwellova tenzoru pnutí a Lorentzovy síly jsem porovnal se známou hodnotou $2 \cdot 10^{-7}$ N/m. Vzorec výsledku je v rovnici 4.2. F je vypočtená síla (Maxwellův tenzor pnutí nebo Lorentzova síla) a e je relativní chyba vypočtená v procentech.

$$e = \frac{|F - 2 \cdot 10^{-7}|}{2 \cdot 10^{-7}} * 100 \quad (4.2)$$

3.3.1.6 Výsledky

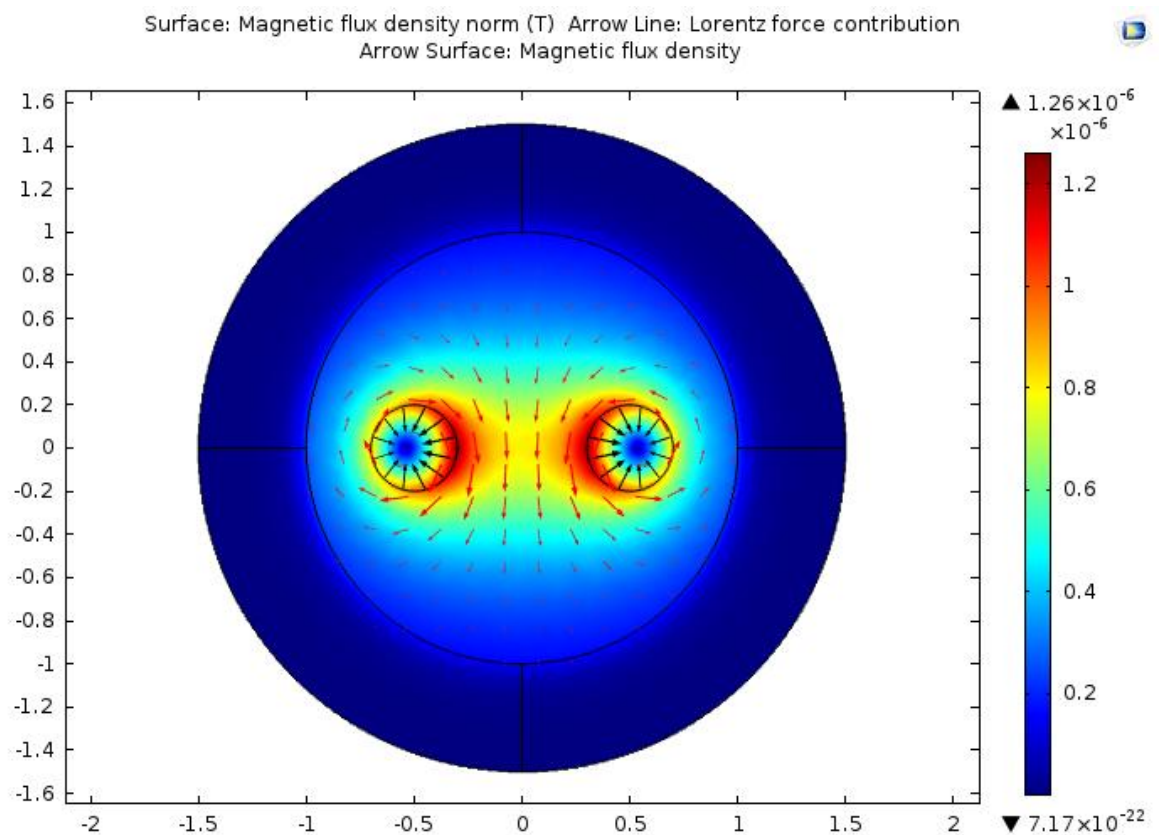
Na následujícím obrázku (Obrázek 3.15) je zobrazen výsledek simulace. Vidíme, že pole mezi vodiči je hustší a podle pravidla levé ruky můžeme odvodit směr síly. Vodiče se tedy snaží oddálit (opačný směr proudu).

Výsledná vypočtená síla mezi vodiči odpovídá teoretickým předpokladům. I pro nejhrubší síť se výsledek lišil od analytického výpočtu o méně než 5 % u Maxwellova tenzoru

pnutí a u Lorentzovy síly dokonce méně než 1 %. Výsledky pro jednotlivé kvality sítě a pro oba způsoby výpočtu síly jsou zobrazeny v následující tabulce (Tabulka 3.2). Poznámka: pro výpočet síly přes Maxwellův tenzor pnutí jsem použil možnost global evaluation a pro Lorentzovu sílu jsem použil surface integration.

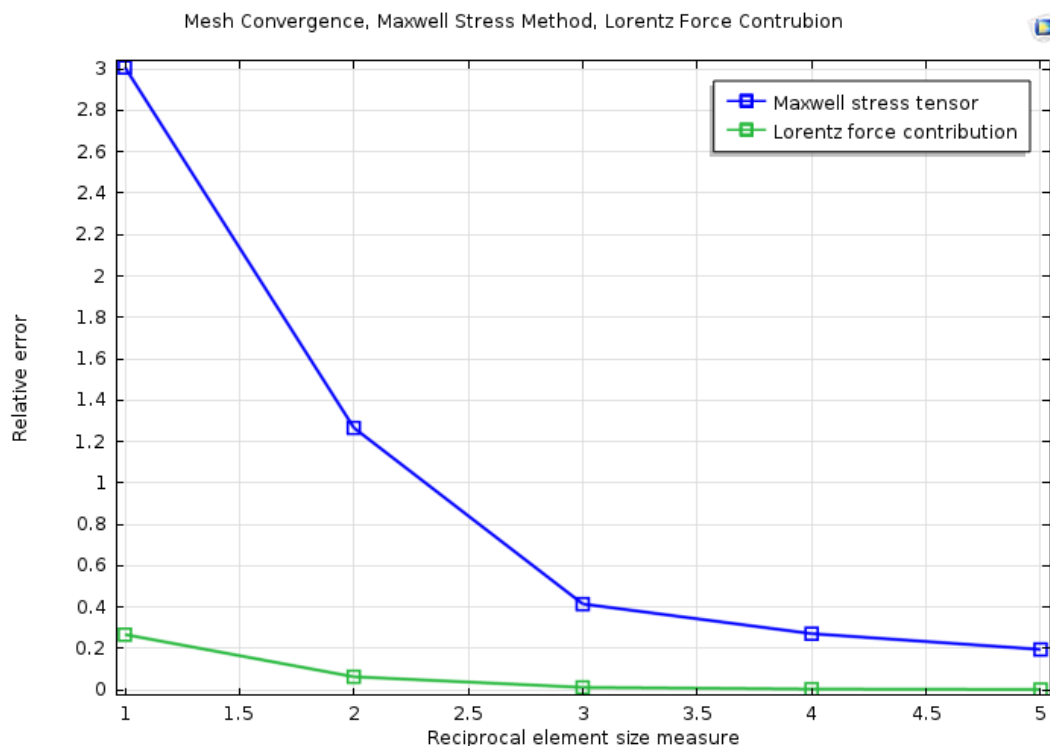
Tabulka 3.2 – Výsledná síla působící na vodič, levý sloupec Lorentzova síly, pravý sloupec síla vypočtená pomocí Maxwellova tenzoru pnutí

N	Lorentz force contribution, x component (N)	Electromagnetic force, x component (N)
1	1,9948E-07	1,9299E-07
2	1,9988E-07	1,9745E-07
3	1,9998E-07	1,9942E-07
4	1,9999E-07	1,9951E-07
5	2,0000E-07	1,9962E-07



Obrázek 3.15 – Výsledné pole modelu 1, plocha a červené šipky zobrazují magnetickou indukci B a černé šipky směr Lorentzovy síly

Na následujícím obrázku je zobrazena závislost relativní chyby výpočtu (v procentech) síly na jemnosti sítě pro oba způsoby výpočtu síly. Z obrázku je patrné, že výpočet síly přes Lorentzovu sílu konverguje rychleji než přes Maxwellův tenzor pnutí. Z toho bychom mohli usoudit, že výpočet přes Lorentzovu sílu je dostatečný, nicméně u ostatních simulací budu využívat nadále obou způsobů.



Obrázek 3.16 – Porovnání rychlosti konvergence

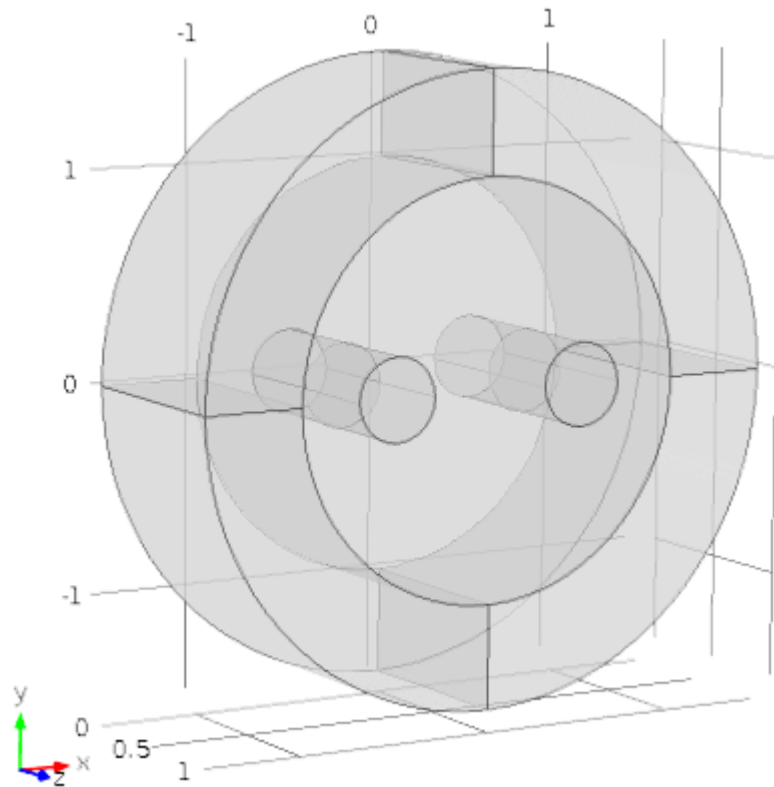
3.3.2 Paralelní vodiče, 3D problém, magnetické pole

Tato simulace se liší od předchozí v tom, že jsem ji prováděl jako 3D. Úkolem bylo potvrdit, zda výpočet síly pomocí Maxwellova tenzoru pnutí a Lorentzovy síly odpovídá teoretickým předpokladům i pro 3D problémy. Závislost přesnosti na jemnosti sítě jsem zde neprováděl.

Vstupní parametry se nezměnily (materiál, proud atd.), proto je zde nebudu vypisovat. Stejně tak okrajové podmínky. Také jsem použil vrstvu nekonečných elementů. Změnila se pouze geometrie.

3.3.2.1 Geometrie

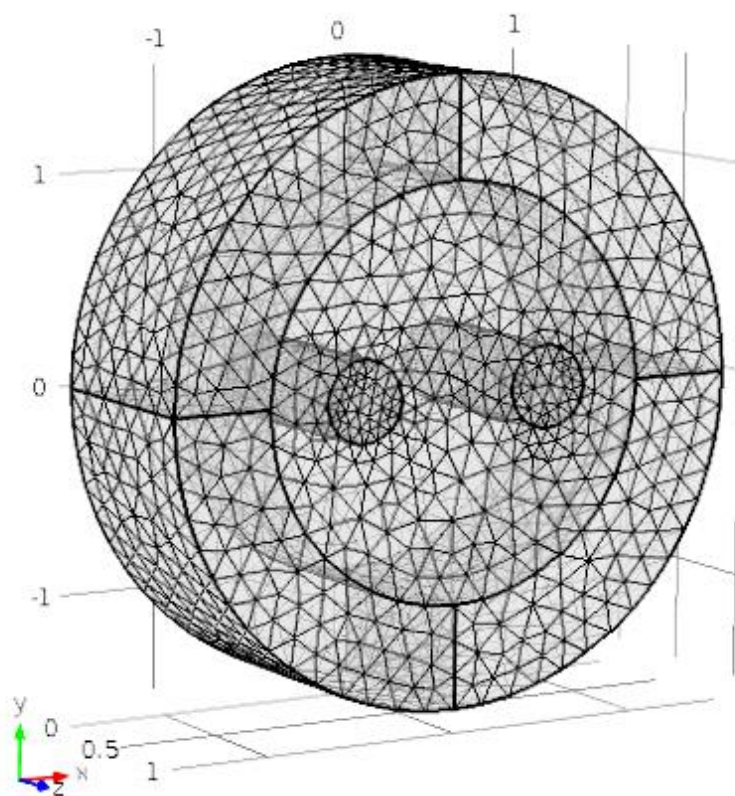
Na následujícím obrázku (Obrázek 3.17) je zobrazena 3D geometrie modelu 2. V podstatě se jedná jen o geometrii z předchozího modelu vytaženou do 1 metru délky ve směru z.



Obrázek 3.17 – 3D geometrie modelu 2

3.3.2.2 Síť

Na celý model jsem použil volnou čtyřbokou síť (free tetrahedral).



Obrázek 3.18 – Síť modelu 2

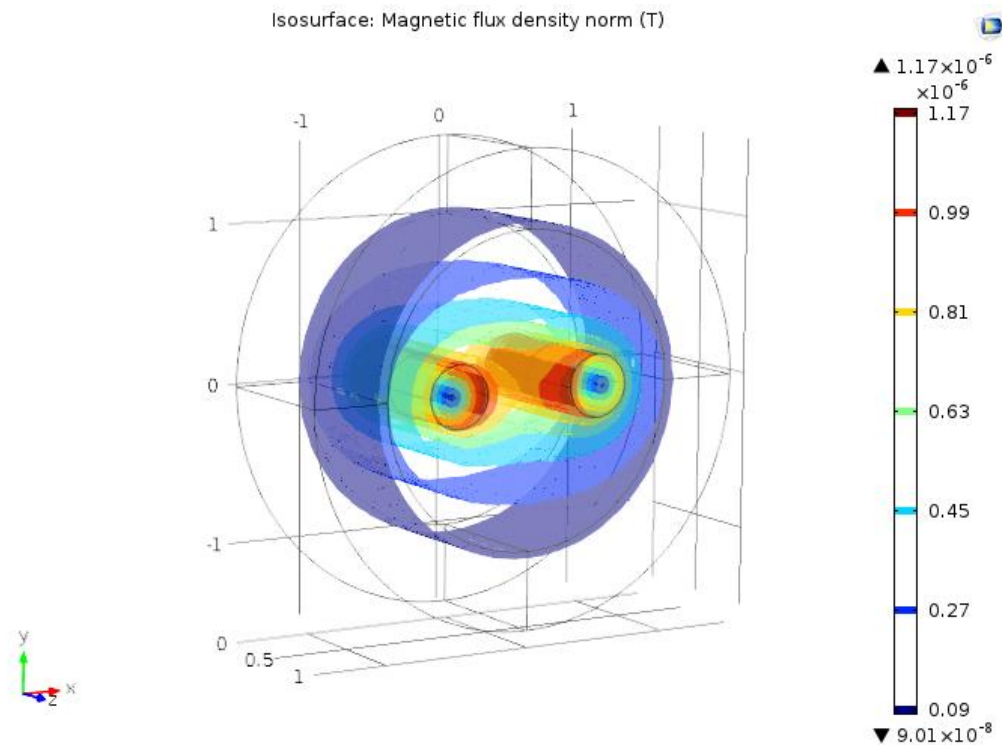
3.3.2.3 Výsledky

Výsledné pole je podobné jako na předchozí simulaci a tak pro zajímavost přikládám rozložení magnetické indukce ve 3D modelu (Obrázek 3.19).

Výsledná vypočtená síla přes oba způsoby je zobrazena v tabulce (Tabulka 3.3). Hodnoty odpovídají předchozím výsledkům. Je vidět, že síla vypočtená pomocí Lorentzovy síly se liší od očekávané hodnoty méně a to potvrzuje, že způsob výpočtu přes Lorentzovu sílu je přesnější. Poznámka: pro výpočet síly přes Maxwellův tenzor pnutí jsem použil možnost global evaluation a pro Lorentzovu sílu jsem použil volume integration.

Tabulka 3.3 – Výsledná síla působící na vodič, levý sloupec Lorentzova síly, pravý sloupec síla vypočtená pomocí Maxwellova tenzoru pnutí

Lorentz force contribution, x component (N)	Electromagnetic force, x component (N)
1,9944E-07	1,9890E-07



Obrázek 3.19 – Výsledné 3D pole, na obrázku je zobrazena magnetická indukce

3.3.3 Paralelní vodiče, 3D problém, elektrické proudy, magnetické pole

Tato simulace vychází ze simulace předchozí. Rozdíl je v tom, že jsem nyní použil dvě fyziky místo jedné. Použil jsem elektrické proudy (electric currents) a magnetické pole (magnetic field). Důvod je ten, že fyzika magnetické pole nemá okrajovou podmínku proud, ale pouze proudovou hustotu a v simulaci je potřeba nastavit, aby proud tekla proudovou smyčkou. Více informací se nachází v kapitole **3.3.3.3 Elektrické proudy (electric currents), Magnetické pole (magnetic fields)**.

3.3.3.1 Vstupní parametry, materiály

Materiál vodičů jsem nastavil hliník s elektrickou vodivostí $3,7736 \cdot 10^7$ S/m. Okolo vodičů jsem nastavil vzduch. Proud I_0 byl 1 A. Vzhledem k tomu, že nyní lze použít přímo proud, nebylo potřeba vypočítat proudovou hustotu.

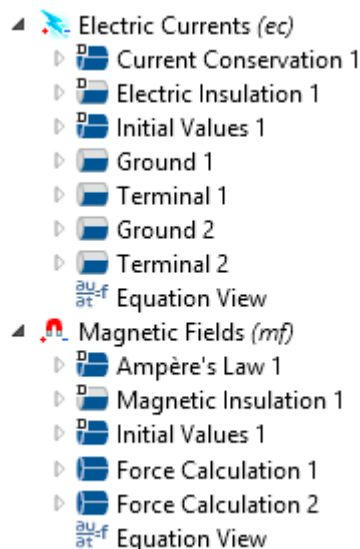
3.3.3.2 Geometrie a síť

Geometrie a síť je stejná jako v předchozím modelu.

3.3.3.3 Elektrické proudy (electric currents), Magnetické pole (magnetic fields), Multifyzika (multiphysics)

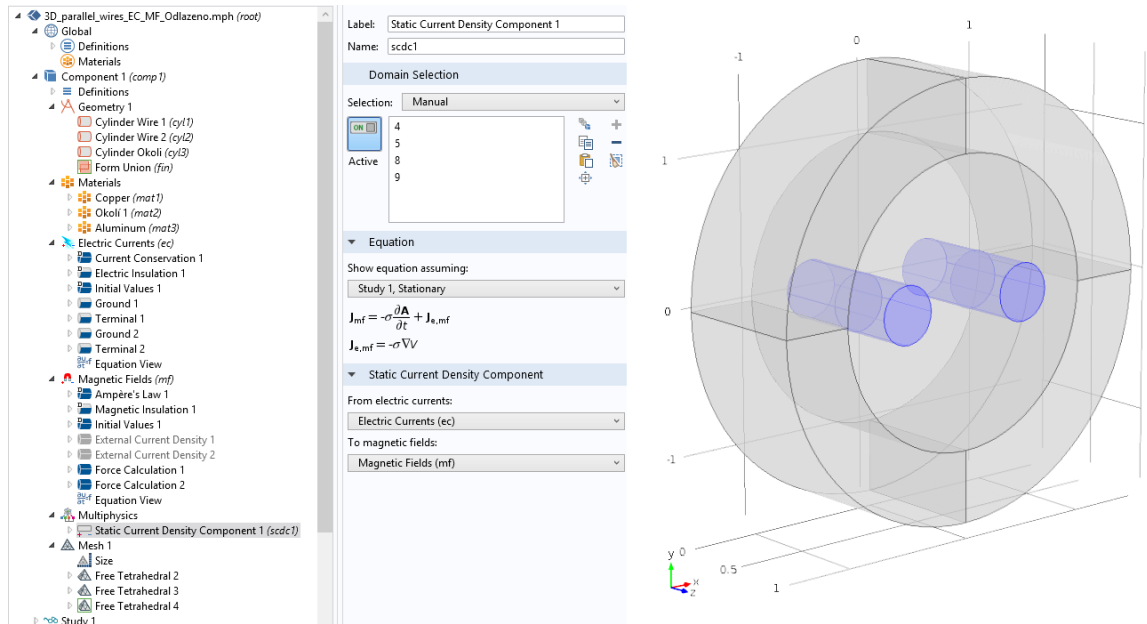
Na obrázku (Obrázek 3.20) jsou zobrazeny okrajové podmínky. Ve fyzice elektrické proudy (electric currents) jsou důležité podmínky Terminal a Ground. V podmínce terminal se nastavuje proud (1 A) a podmínka ground je kontakt s nulovým potenciálem. Podmínky byly na model aplikovány tak, aby proudy procházely opačným směrem.

Ve fyzice magnetické pole (magnetic fields) je nastavena už dříve zmíněná podmínka force calculation, která slouží k výpočtu síly. Ostatní podmínky jsou nastaveny defaultně programem COMSOL.



Obrázek 3.20 – Okrajové podmínky modelu 3

Důležitá podmínka je v sekci Multiphysics (multifyzika), kde se nastavuje sdružení jednotlivých polí a to je podmínka Static Current Density Component, kde se nastavuje výpočet a předávání proudové hustoty z elektrického pole do magnetického. To je zobrazeno na následujícím obrázku včetně domén, u kterých dochází k předávání (Obrázek 3.21).



Obrázek 3.21 – Sdružení polí

3.3.3.4 Výsledky

Výsledné pole je podobné jako na předchozí simulaci. Výsledná vypočtená síla přes oba způsoby je zobrazena v tabulce (Tabulka 3.4). Hodnoty odpovídají předchozím výsledkům. Je vidět, že síla vypočtená pomocí Lorentzovy síly se liší od očekávané hodnoty méně a to znovu potvrzuje, že způsob výpočtu přes Lorentzovu sílu je přesnější. **Poznámka:** pro výpočet síly přes Maxwellův tenzor pnutí jsem použil možnost global evaluation a pro Lorentzovu sílu jsem použil volume integration.

Tabulka 3.4 – Výsledná síla působící na vodič, levý sloupec Lorentzova síly, pravý sloupec síla vypočtená pomocí Maxwellova tenzoru pnutí

Lorentz force contribution, x component (N)	Electromagnetic force, x component (N)
1,9917E-07	1,9843E-07

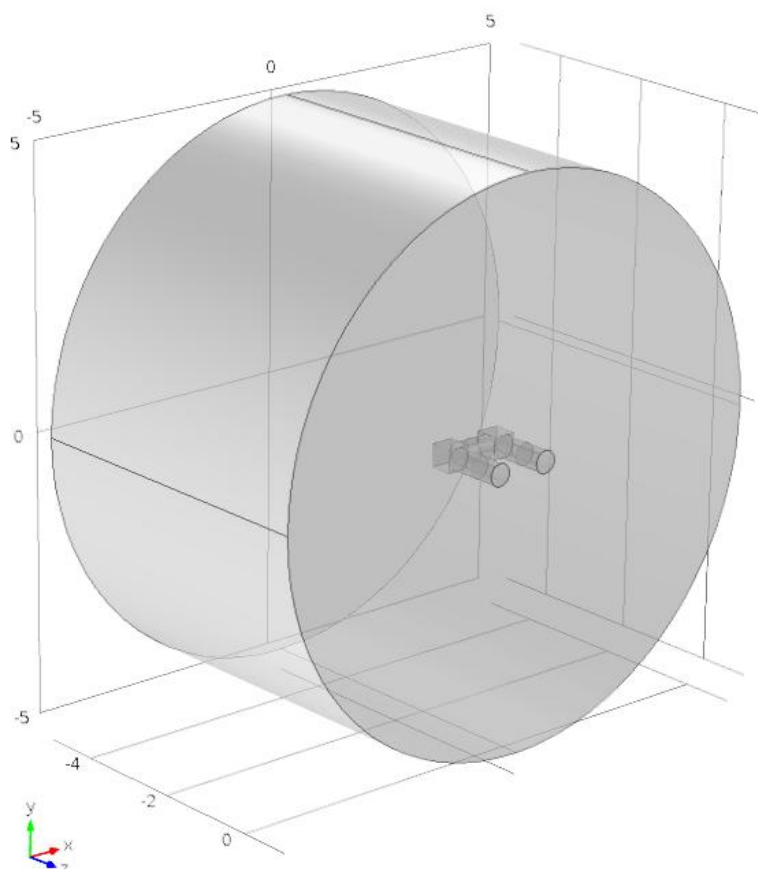
3.3.4 Proudová smyčka, 3D problém, elektrické proudy, magnetické

Předchozí simulace odpovídaly teoretickým předpokladům, a tudíž jsem mohl postoupit k simulování proudových smyček.

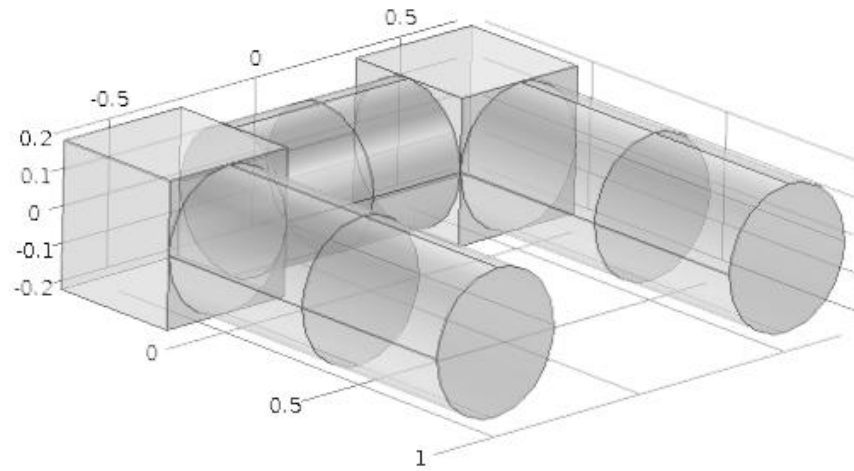
Tato simulace se od předchozí liší v tom, že nyní už se jedná o obvod (proudovou smyčku). Její uspořádání je zobrazeno v kapitole **3.3.4.1 Geometrie**. Jako materiál smyčky byl použit stejný hliník jako v předchozí simulaci.

3.3.4.1 Geometrie

Na následujícím obrázku (Obrázek 3.22) je zobrazena celá 3D geometrie modelu 3. Jedná se o proudovou smyčku, která se již podobá smyčce použité ve finální simulaci. Detail smyčky je zobrazen na dalším obrázku (Obrázek 3.23). Vodiče jsou dlouhé 1 m a vzdálené od sebe také 1 m.



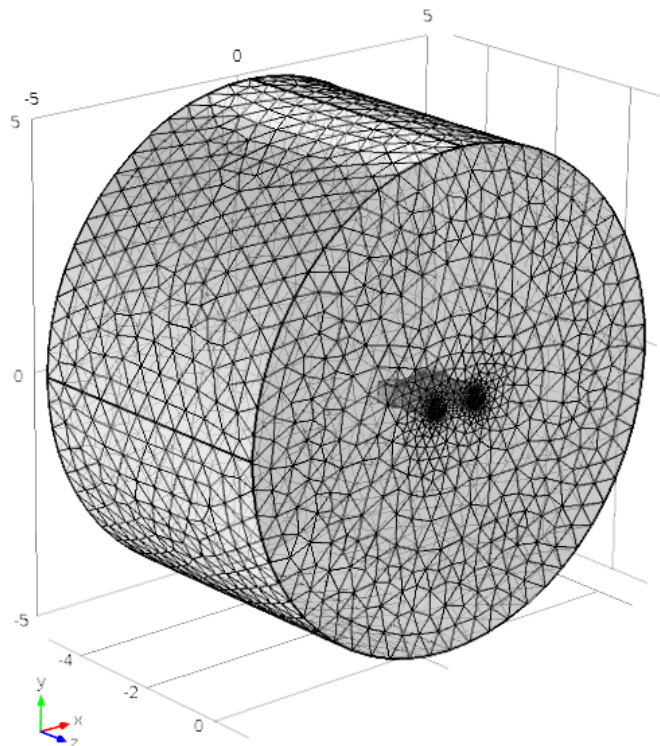
Obrázek 3.22 – Geometrie modelu 4



Obrázek 3.23 – Detail proudové smyčky použité v modelu 4

3.3.4.2 Síť

Na celý model jsem použil fyzikálně kontrolovanou síť se stupněm jemnosti finer.

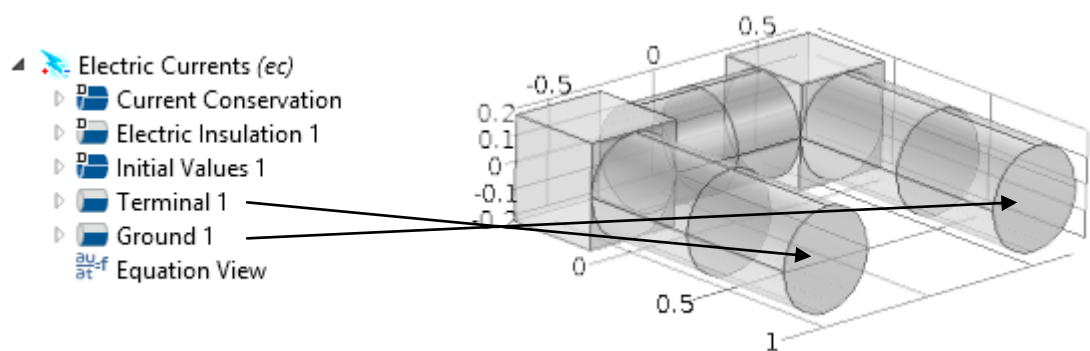


Obrázek 3.24 – Síť modelu 4

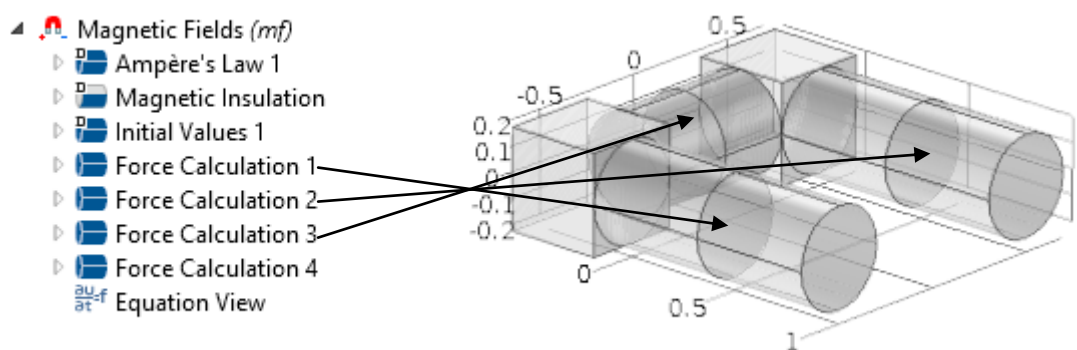
3.3.4.3 Elektrické proudy (electric currents), Magnetické pole (magnetic fields)

Okrajové podmínky jsem použil stejné jako v předchozí simulaci. Na následujícím obrázku (Obrázek 3.25) je popsáno, kde jsem použil zdroj proudu (Terminal) a kde plochu s nulovým potenciálem.

Na dalším obrázku (Obrázek 3.26) je popsáno kde jsem aplikoval podmínku pro výpočet síly, pro zajímavost jsem nechal vypočíst i sílu na příčný vodič. V sekci multifyzika (multiphysics) je nastaveno vše stejně jako v předchozí simulace.



Obrázek 3.25 – Aplikování proudu a plochy s nulovým potenciálem



Obrázek 3.26 – Aplikování podmínek pro výpočet síly

3.3.4.4 Výsledky

Výsledná vypočtená síla přes oba způsoby je zobrazena v tabulce (Tabulka 3.5). Jsou vypočteny síly na všechny tři vodiče (dva paralelní a jeden příčný). Síly na vodič 1 a 2 jsou

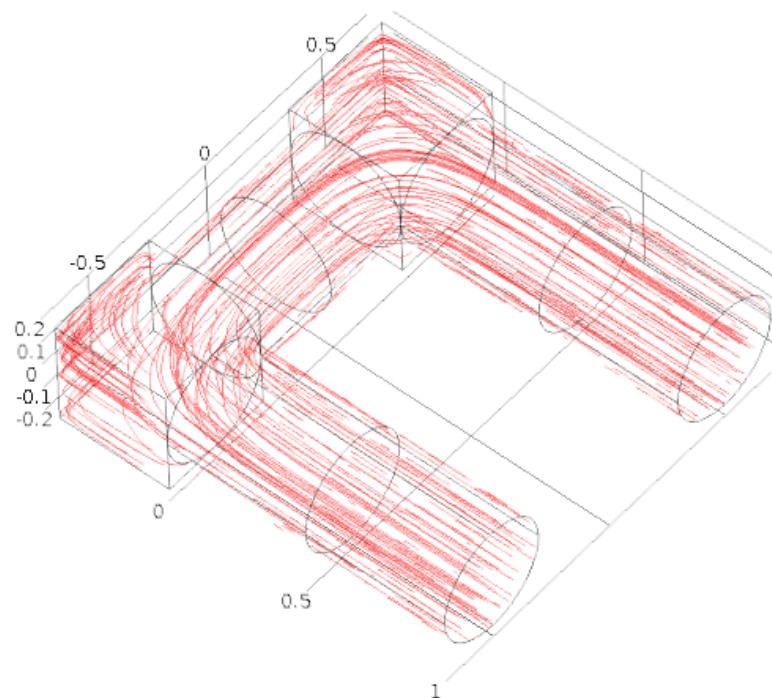
přibližně stejné pro oba způsoby, pouze mají opačné znaménko, což odpovídá teoretickým předpokladům. Pro zajímavost jsem přiložil i sílu na třetí (příčný vodič).

Usuzuji, že výsledek je správný. Oproti paralelním vodičům je síla větší, to je způsobeno přítomností třetího příčného vodiče, který působí magnetickou indukci B na oba paralelní vodiče.

Tabulka 3.5 – Výsledné síly působící na všechny tři vodiče, první řádek Lorentzova síla, druhý řádek Maxwellův tenzor pnutí

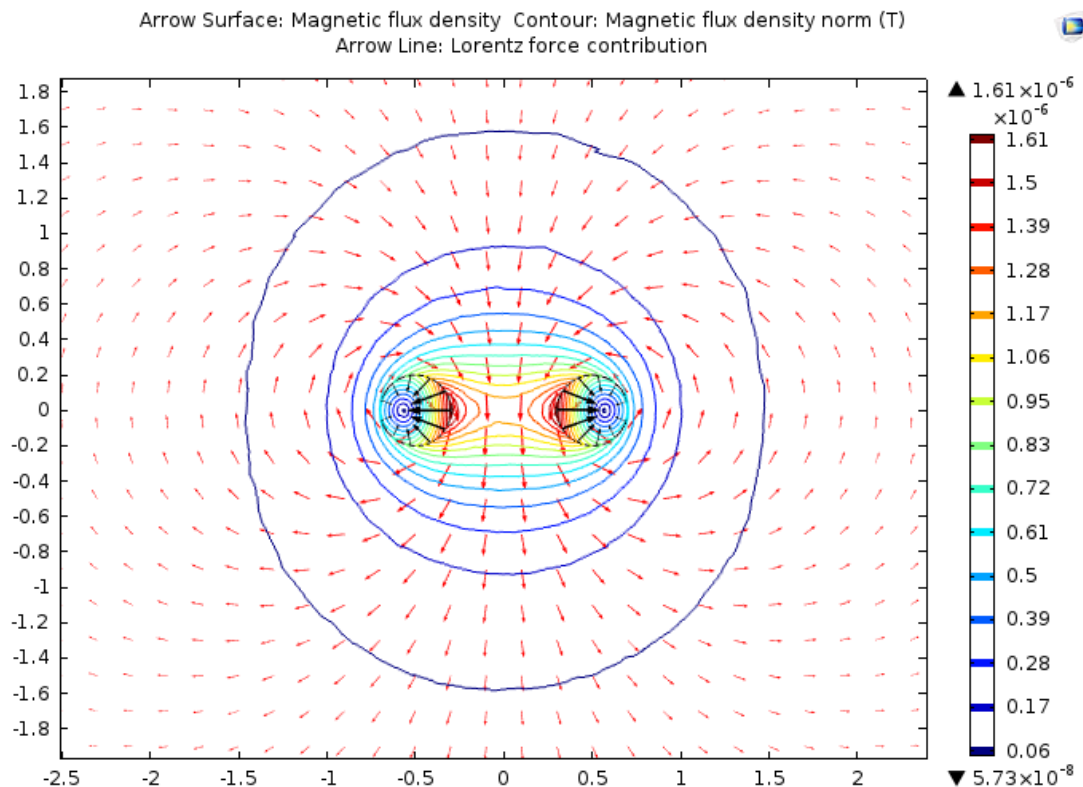
	Vodič 1	Vodič 2	Vodič 3
Lorentz force contribution, x component (N)	-3,2079E-07	3,2079E-07	-2,6996E-07
Electromagnetic force, x component (N)	-3,1990E-07	3,1984E-07	-2,6929E-07

Na následujícím obrázku (Obrázek 3.27) je zobrazen průchod proudu skrz smyčku. Je vidět, že proud prochází smyčkou tak, jak je předpokládáno.



Obrázek 3.27 – Průchod proudu skrz smyčku

Na tomto obrázku (Obrázek 3.28) je zobrazeno magnetické pole v řezu smyčky. Červené šipky ukazují směr magnetické indukce B , černé šipky směr síly (vodiče se oddalují) a kontury místa se stejnou magnetickou indukcí B . Magnetické pole se podobá poli dvou paralelních vodičů.



Obrázek 3.28 – Magnetické pole v řezu smyčky

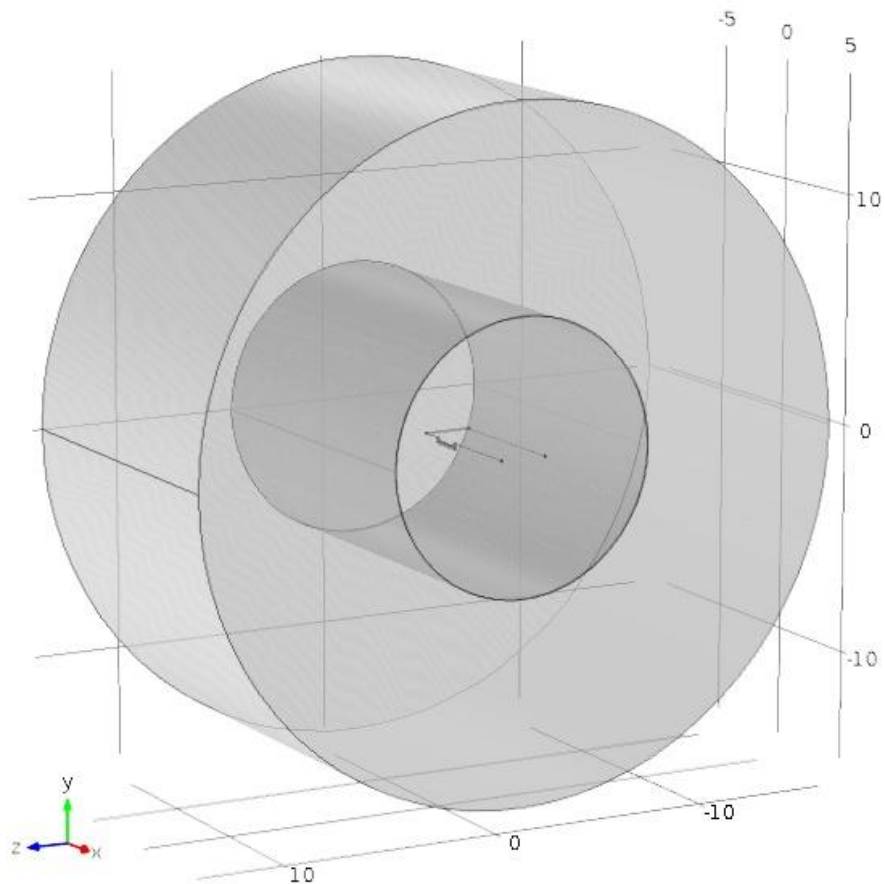
Po provedení této simulace jsem měl vše připraveno pro závěrečnou simulaci a mohl jsem postoupit k simulaci proudové smyčky tak, jak je uvedena v normě a se vstupními proudy podle datového listu odpojovače. Dosavadní simulace vycházeli podle teoretických předpokladů a získané poznatky jsem tedy mohl aplikovat v závěrečné simulaci.

3.3.5 Proudová smyčka odpovídající normě, 3D problém, elektrické proudy, magnetické pole

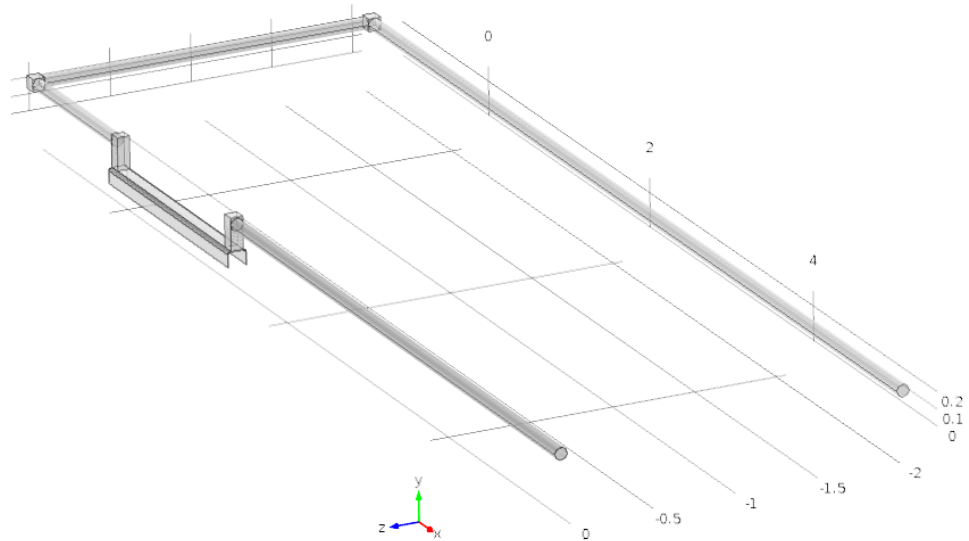
Jedná se o finální simulaci, která zohledňuje rozměry proudové smyčky tak, jak jsou uvedeny v normě. Vycházel jsem z poznatků zjištěných ze všech předchozích simulací. Jako materiál smyčky byl použit stejný hliník jako v předchozích případech.

3.3.5.1 Geometrie

Na následujících obrázcích (Obrázek 3.29, Obrázek 3.30) je zobrazena celá 3D geometrie finálního modelu se vzduchovým okolím a detail odpojovače. Rozměry smyčky jsou uvedeny v kapitole 3.2.2.4. Poloměr vzduchového okolí je 15 m.



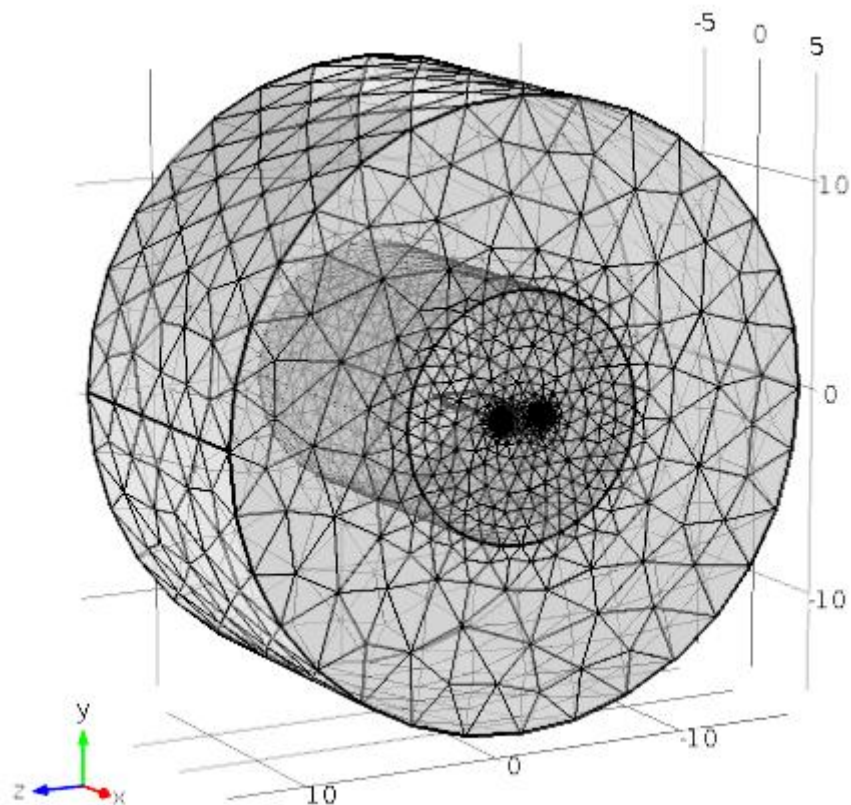
Obrázek 3.29 – Geometrie finálního modelu se vzduchovým okolím



Obrázek 3.30 – Detail proudové smyčky s odpojovačem

3.3.5.2 Síť

Na celý model jsem použil volnou čtyřbokou (free tetrahedral) síť. U krajní oblasti s jemností normal, oblast u odpojovače s jemností extra fine a samotnou smyčku s extremely fine jemností.



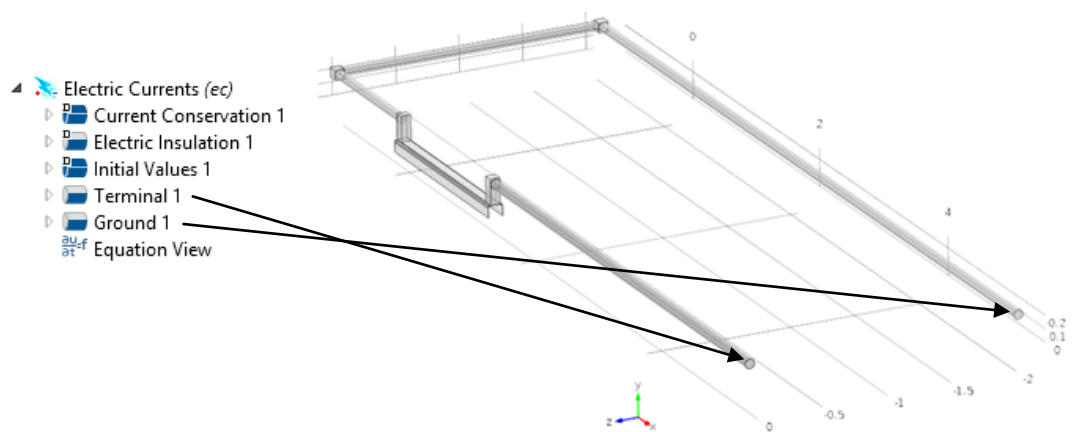
Obrázek 3.31 – Síť finálního modelu

3.3.5.3 Elektrické proudy (electric currents), Magnetické pole (magnetic fields)

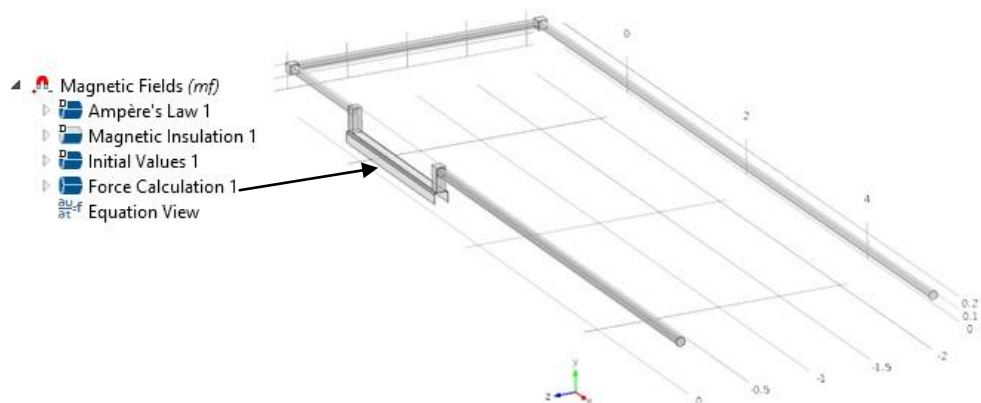
Okrajové podmínky jsem použil stejné jako v předchozí simulaci. Na následujícím obrázku (Obrázek 3.32) je popsáno, kde jsem použil zdroj proudu (Terminal) a kde plochu s nulovým potenciálem.

Na dalším obrázku (Obrázek 3.33) je popsáno kde jsem aplikoval podmínku pro výpočet síly. V sekci multifyzika (multiphysics) je nastaveno vše stejně jako v předchozí simulaci a to předávání vypočtené proudové hustoty v proudové smyčce z fyziky Electric currents do fyziky Magnetic fields.

Odpojovač byl zatěžován čtyřmi proudy, které jsou uvedeny v tabulce v kapitole 3.2.1 (Tabulka 3.1) a to proudy 63 kA, 80 kA, 100 kA, 125 kA.



Obrázek 3.32 – Aplikování proudu a plochy s nulovým potenciálem



Obrázek 3.33 – Aplikování podmínek pro výpočet síly

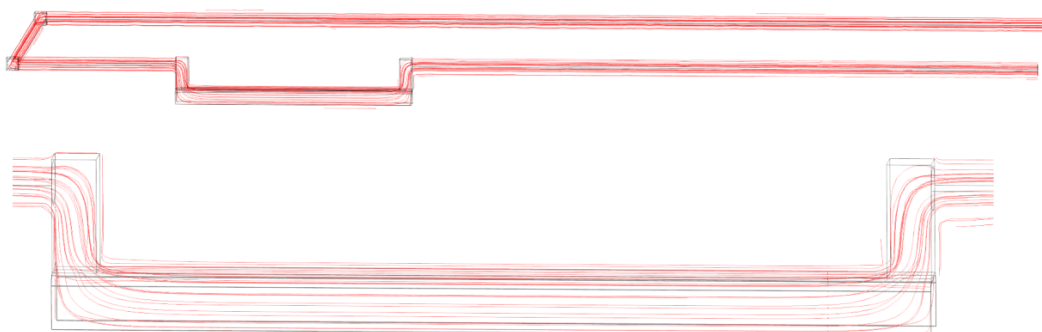
3.3.5.4 Výsledky

Výsledná síla v závislosti na průchozím proudu působící na odpojovač je zobrazena v následující tabulce (Tabulka 3.6). Hodnoty vypočtené přes Maxwellův tenzor pnutí se od hodnot vypočtených přes Lorentzovu sílu liší maximálně o 5%, což je podobné jako u předchozích simulací.

Tabulka 3.6 – Výsledné síly působící na odpojovač, levý sloupec Lorentzova síla, pravý sloupec Maxwellův tenzor pnutí

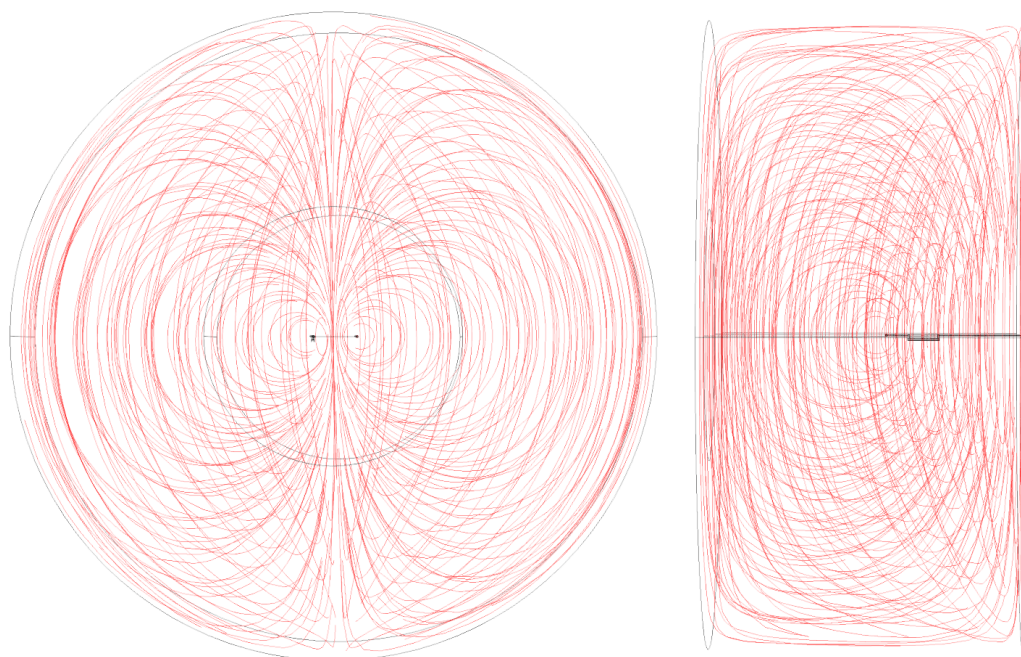
Proud (kA)	Lorentz force contribution, x component (N)	Electromagnetic force, x component (N)
63	680,02	651,4
80	1096,5	1050,4
100	1713,3	1641,2
125	2677,1	2564,4

Na následujícím obrázku (Obrázek 3.34) je zobrazen průchod proudu skrz proudovou smyčku a detail průchodu proudu odpojovačem. Tento proud je poté předán z fyziky elektrické proudy (electric currents) do fyziky magnetického pole (magnetic fields) přes automatické sdružení. Tento obrázek odpovídá proudu odpojovačem 125 kA, pro ostatní proudy by vypadal podobně.

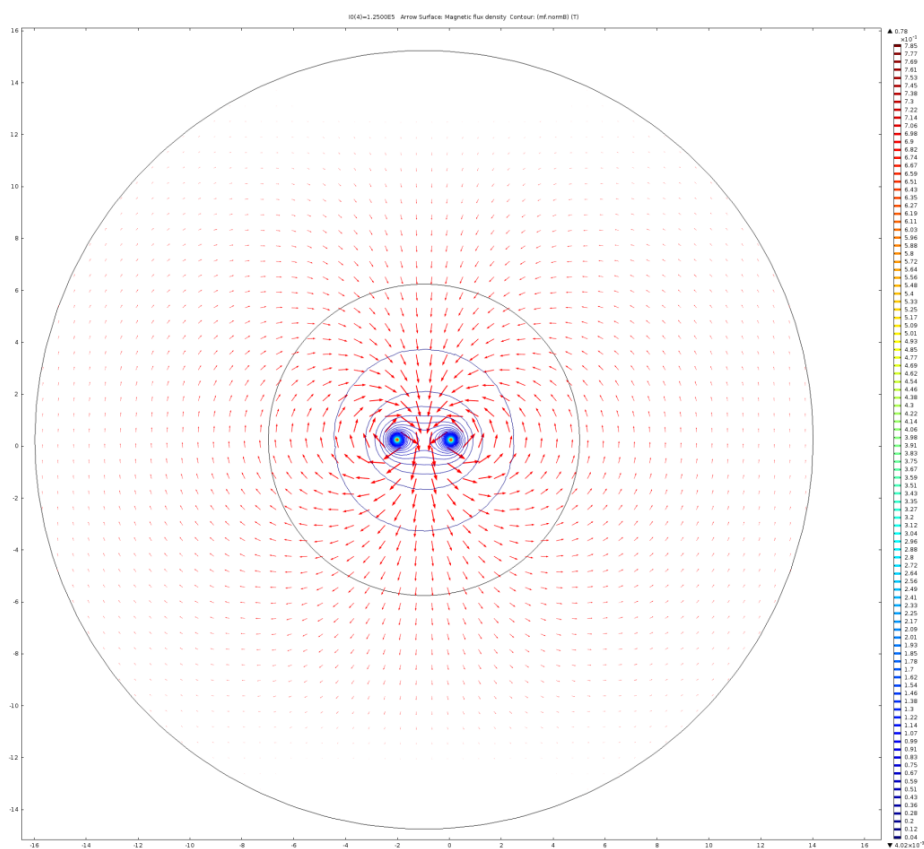


Obrázek 3.34 – Průchod proudu proudovou smyčkou a detail průchodu proudu odpojovačem

Na následujícím obrázku (Obrázek 3.35) je zobrazené rozložení magnetické indukce B okolo proudové smyčky. Zobrazené rozložení je pro proudové zatížení 125 kA, pro ostatní proudy by rozložení vypadalo obdobně.



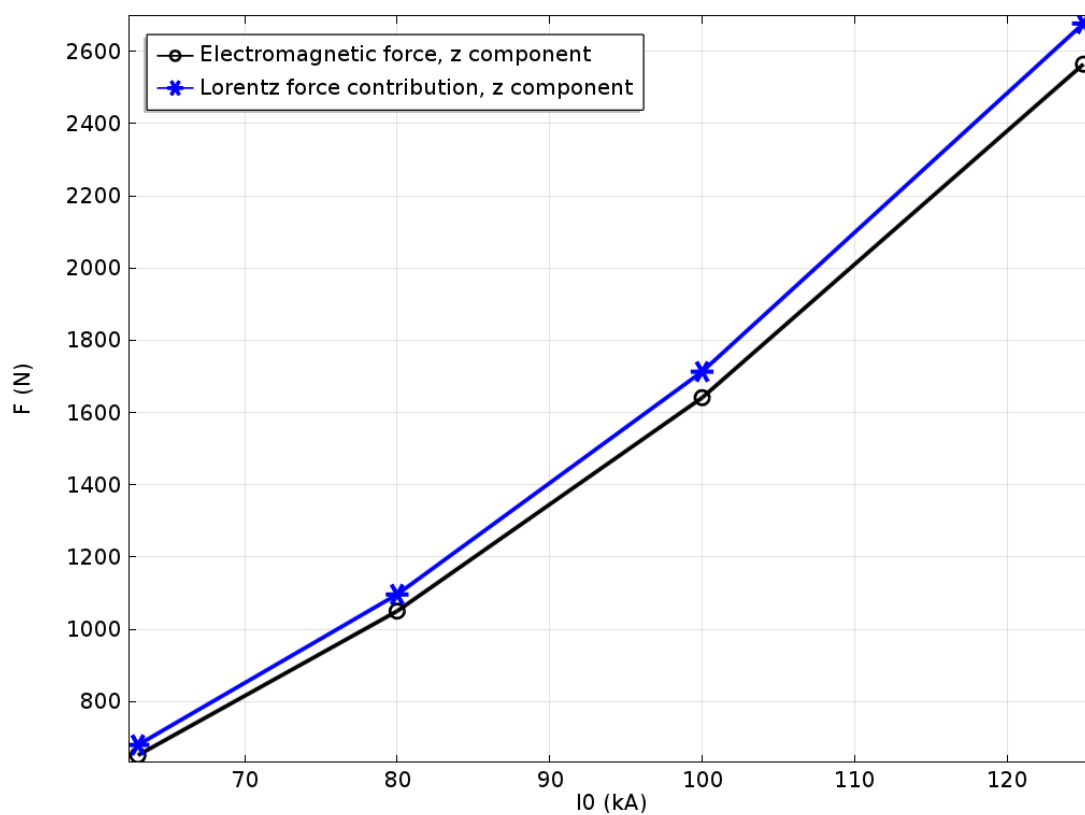
Obrázek 3.35 – Rozložení magnetické indukce B okolo proudové smyčky



Obrázek 3.36 – Rozložení magnetické indukce B zobrazené pomocí vektorů a kontur

Na obrázku (Obrázek 3.36) je zobrazené rozložení magnetické indukce B zobrazené pomocí vektorů a kontur. Zobrazené rozložení je pro proudové zatížení 125 kA, pro ostatní proudy by rozložení vypadalo obdobně, ale šípek by bylo méně a měly by menší velikost. Délky vektorů jsou v logaritmickém měřítku pro lepší zobrazení, v lineárním měřítku by jich bylo mnohem méně a měli by menší velikost.

Na spodním obrázku (Obrázek 3.37) je zobrazena závislost vypočtené síly (přes Lorentzovu sílu a Maxwellův tenzor pnutí) na proudovém zatížení.



Obrázek 3.37 – Závislost síly na proudovém zatížení

Výsledné zhodnocení nasimulovaných výsledků bude provedeno v následující kapitole včetně porovnání s datovým listem odpojovače a analyticky vypočtených výsledků.

3.4 Zhodnocení výsledků

V předchozí kapitole jsem provedl několik simulací, ve kterých jsem vypočítal sílu pomocí Lorentzovy síly a Maxwellova tenzoru pnutí. První tři simulace byly odvozeny od definice jednoho ampéru a výsledky jsem porovnával se známou hodnotou síly mezi paralelními vodiči. Poté jsem získané znalosti aplikoval na jednoduchou proudovou smyčku. Všechny výsledky odpovídaly teoretickým předpokladům, a proto jsem mohl postoupit k simulaci proudové smyčky tak, jak je uvedena v normě.

V následující kapitole popíši, jak jsem nasimulované hodnoty sil porovnával s analyticky vypočtenými hodnotami a hodnotami uvedených v tabulce, která popisuje parametry odpojovače (Tabulka 3.1).

3.4.1 Porovnání analyticky vypočtené síly, simulace a jmenovité dynamické síly

Pro vypočtení těchto sil jsem použil následující rovnici (rovnice 4.3). Jedná se o rovnici z kapitoly 2.1.1.

$$F_m = BIl \sin \alpha \quad [\text{N}] \quad (4.3)$$

Magnetická indukce B se vypočte podle rovnice 4.4. Rozměry jako délka l , vzdálenost vodičů r odpovídají modelu uvedeného v kapitole 4.2.2.4. Proud I jsou podle tabulky popisující parametry odpojovače (Tabulka 3.1).

$$B = \frac{I \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad [\text{T}] \quad (4.4)$$

Vycházel jsem tedy z jednoduchého modelu vodiče a odpojovače vzdálených od sebe 2 m a délky 1,5 m (podle modelu). Příčný vodič jsem zanedbal a reálná síla tedy bude o několik desítek až stovek N větší než síla vypočtená.

Níže je uvedena tabulka analyticky vypočtených hodnot sil působících na odpojovače. (Obrázek 3.7)

Pro přehlednost přikládám i tabulku (Tabulka 3.6), která uvádí hodnoty vypočtené

pomocí simulace (Maxwellův tenzor pnutí a Lorentzova síla).

Tabulka 3.7 – Tabulka analyticky vypočtené síly na odpojovač.

Proud (kA)	Analyticky vypočtená síla (N)
63	595
80	960
100	1500
125	2343

Tabulka 3.8 – Výsledné síly působící na odpojovač, levý sloupec Lorentzova síla, pravý sloupec Maxwellův tenzor pnutí

Proud (kA)	Lorentz force contribution, x component (N)	Electromagnetic force, x component (N)
63	680,1	651,4
80	1096,5	1050,4
100	1713,3	1641,2
125	2677,1	2564,4

Po porovnání tabulek více vidíme, že se hodnoty liší maximálně o 20%. To je způsobeno tím, že jsem při analytickém výpočtu zanedbal příčný vodič, použil jsem v podstatě výpočet síly na dva paralelní vodiče resp. vodič a odpojovač. Podobný rozdíl jsem popisoval i v kapitole 3.3.4.

Podle tabulky, která udává parametry odpojovače (Tabulka 3.1), je jmenovitě dynamické mechanické namáhání přípojnicových svorek 2500 N. Po porovnání výsledků simulace s touto hodnotou, je výsledná síla působící na odpojovač pro první tři proudové zatížení (63 kA, 80 kA, 100 kA) nižší než tato hodnota. Pro nejvyšší proudové zatížení (125 kA) již výsledná síla působící na odpojovač tuto hodnotu překračuje a to o 177,1 N pro způsob výpočtu pomocí Lorentzovy síly a o 64,4 N pomocí Maxwellova tenzoru pnutí. Výsledky simulací tedy přibližně odpovídají analytickým výpočtům. U nejvyššího proudového zatížení síla překračuje jmenovitou dynamickou hodnotu síly na přípojnicové svorky.

Na tuto diplomovou práci bych mohl navázat rozšířením simulací. Například vytvořit transientní analýzu, případně simulaci rozšířit o tepelné pole. Simulaci by bylo vhodné porovnat s měřením, ačkoliv měření může být pro tento případ obtížnější. Poté simulaci s měřením porovnat a z toho vyvodit příslušné závěry.

Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na elektrodynamické účinky zkratového proudu na odpojovač. V úvodní kapitole jsem se zabýval odpojovačem obecně včetně zkoušení odpojovače podle norem. Na tuto kapitolu navázala kapitola, ve které jsem se zabýval silami v elektromagnetickém poli. Znalosti získané z těchto kapitol jsem použil v kapitole následující.

V této kapitole jsem se zaměřil na simulaci elektrodynamických účinků zkratového proudu na odpojovač. Aby bylo dosaženo optimálních výsledků simulace, provedl jsem několik verifikačních simulací. Postupoval jsem od nejjednoduššího modelu dvou paralelních vodičů až po samotnou simulaci proudové smyčky tak, jak je definována v normě. Výsledky každé verifikační simulace byly porovnávány s analytickými výpočty, abych mohl určit, zda výsledky simulací odpovídají teoretickým předpokladům. U první simulace jsem navíc provedl analýzu rychlosti konvergence dvou způsobů výpočtu síly působící na proudovodič a to přes Maxwellův tenzor pnutí a přes Lorentzovu sílu.

Z porovnání nasimulovaných výsledků a výsledků vypočtených je patrné, že hodnoty u verifikačních modelů se od teoretických předpokladů příliš neliší a použitý postup u dalších simulací by tedy měl být správný. Stejně tak rozdíl mezi finální simulací proudové smyčky s odpojovačem a analytickými výpočty byl zanedbatelný. Z toho tedy vyvozují závěr, že zvolený postup simulace byl správný.

Jako další etapa, by bylo možné navázat simulací na pevnostní analýzu a výsledné deformace mnohem detailnějšího modelu porovnat s měřením vysokorychlostní kamerou během zkratu. Případně provést simulaci 3F asymetrického zkratu, nicméně tato simulace by si vyžádala vysoké nároky na výpočetní výkon a bylo by nutné použít odpovídající hardwarové vybavení.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HODLOVÁ, Miluše, KOLOUCH, Pavel a SCHEJBAL, Konstantin. Elektrické přístroje. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1979. 252 s.
- [2] HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. 436 s.
- [3] BÁRTA, Karel a VOSTRACKÝ, Zdeněk. Spínací přístroje velmi vysokého napětí. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 445 s.
- [4] ČSN EN 62 271-1. Česká technická norma: Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení. Ed.7. 2009
- [5] ČSN EN 62 271-102. Česká technická norma: Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení. – Část 102: Odpojovače a uzemňovače
- [6] KINDL, Vladimír. *Modelování polí v elektrických strojích*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. Podpůrný text pro výuku KEV/MPS
- [7] MAYER, Daniel. Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. 538 s. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [8] MAYER, Daniel. Elektrodynamika v energetice. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 278 s. ISBN 80-7300-164-0.
- [9] KUPILÍK, Martin. Dynamický ohřev kabelových vodičů. Bakalářská práce. 2013
- [10] COMSOL Multiphysics Users Guide. Manuál k programu COMSOL Multiphysics
- [11] COMSOL AC DC Module Users Guide. Manuál k AC/DC modulu programu COMSOL Multiphysics