

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

VÝPOČET DYNAMICKÝCH SIL JISTIČE 250A

CALCULATION OF ELECTRODYNAMIC FORCES IN 250 A CIRCUIT BREAKER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

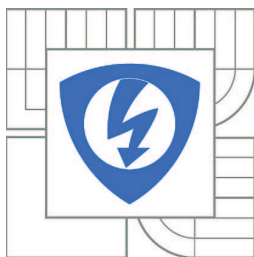
Bc. Michal Görig

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO, 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Michal Görig

ID: 78188

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet dynamických sil jističe 250A

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s konstrukcí a funkcí jednotlivých částí jističe.
2. Zpracujte teoretický rozbor působení dynamických sil v jističi.
3. Vytvořte zjednodušený 3D geometrický model vhodný pro numerický výpočet sil v simulačním programu.
4. Proveďte simulace působení elektrodynamických sil pro zadané stavy.
5. Získané výsledky analyzujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 198

[2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I, VUT v Brně, 1985

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá výpočtem elektrodynamických sil jističe BD250NE305. Hlavními úkoly v této diplomové práci je seznámit se s teoretickým rozбором jednotlivých částí zadaného jističe. Zpracování teoretického rozboru působení těchto sil. Vytvoření 3D modelu proudovodné dráhy a plechů zhášecí komory jedné fáze jističe v programu Autodesk Inventor Professional 2012. Dalším úkolem je následný export modelu do simulačního programu ANSYS MAXWELL. Po provedení simulace zadaných stavů je nutno výsledky zpracovat a v závěru práce je zhodnotit.

Abstract

This master's thesis deals with the calculation of electrodynamic forces breaker BD250NE305. Main tasks in this semester project is to study the theoretical analysis of individual parts specified breakers. Processing theoretical analysis of these forces. Creating a 3D model current path and sheets quenching chamber single phase circuit breaker in Autodesk Inventor Professional 2012. Another challenge is the subsequent export the model into the simulation program ANSYS Maxwell. After simulation, the specified conditions must be processed and the results of the present work is to evaluate.

Klíčová slova

3D Model; elektrodynamická síla; jistič; pohyblivý kontakt; proud; proudovodná dráha; síla; simulace; skin efekt

Keywords

3D Model; electrodynamic force; circuit breaker; moving contact; current; current path; power; simulation; skin effect

Bibliografická citace

GÖRIG, M. *Výpočet dynamických sil jističe 250A*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 79s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *VÝPOČET DYNAMICKÝCH SIL JISTIČE 250A* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

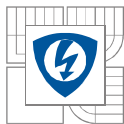
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

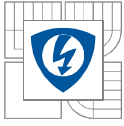
V Brně dne

Podpis autora

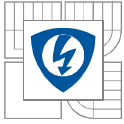


Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM GRAFŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
ÚVOD.....	14
1 DRUHY OCHRANNÝCH A JISTICÍCH PRVKŮ	15
1.1 PROUDOVÝ CHRÁNIČ	15
1.2 POJISTKA	16
1.2.1 PRINCIP POJISTKY	16
1.2.2 DĚLENÍ POJISTEK	17
1.2.3 VLASTNOSTI POJISTEK	17
1.3 MINIATURNÍ JISTIČE (PRO DOMOVNÍ INSTALACE)	18
1.3.1 TEPELNÁ SPOUŠŤ	18
1.3.2 ZKRATOVÁ SPOUŠŤ.....	18
1.3.3 ROZDĚLENÍ JISTIČŮ.....	19
1.3.4 VYPÍNACÍ CHARAKTERISTIKA.....	19
1.3.5 HLAVNÍ ČÁSTI JISTIČE.....	21
1.4 TŘÍFÁZOVÝ KOMPAKTNÍ JISTIČ.....	21
2 TEORETICKÝ ROZBOR PŮSOBNÍ DYNAMICKÝCH SIL V JISTIČI.....	22
2.1 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY VYNIKAJÍCÍ MEZI DVĚMA ROVNOBĚŽNÝMI VODIČI	23
2.2 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY VYNIKAJÍCÍ V ZAHNUTÝCH VODIČÍCH	25
2.3 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY VZNIKAJÍCÍ PŘI ZMĚNĚ PRŮŘEZU VODIČE (MEZI KONTAKTY)	26
2.4 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY V JEDNOFÁZOVÉ SOUSTAVĚ.....	27
2.5 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY V TROJFÁZOVÉ SOUSTAVĚ	28
3 JISTIČ OEZ BD250NE305	30
3.1 KATALOGOVÉ HODNOTY JISTIČE BD250NE305.....	31
3.2 PŘÍSLUŠENSTVÍ JISTIČE BD250NE305	32
3.3 MODEL JISTIČE V PROGRAMU AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2012.....	33
4 SIMULACE STAVŮ JISTIČE BD250NE305 V PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....	38
4.1 IMPORT 3D MODELU PRO PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....	38
4.2 PŘÍRAZENÍ JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ	38
4.3 NASTAVENÍ SEKUNDÁRNÍHO SOUŘADNÉHO SYSTÉMU.....	40
4.4 NASTAVENÍ PARAMETRŮ ANALÝZY A PROUDU	40
4.4.1 PRO STEJNOSMĚRNÝ PROUD (MAGNETOSTATICKÁ ANALÝZA)	40
4.4.2 STRÍDAVÝ SINUSOVÝ PROUD (TRANZIENTNÍ ANALÝZA)	42
4.4.3 STRÍDANÝ NESYMETRICKÝ PROUD (TRANZIENTNÍ ANALÝZA)	44

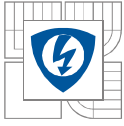


5 MAGNETOSTATICKÁ ANALÝZA	45
5.1 SIMULACE V PROGRAMU ANSYS MAXWELL	45
5.1.1 JEDNOPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY	45
5.2 RUČNÍ VÝPOČET SÍLY V KONTAKTNÍ ÚŽINĚ	47
5.2.1 MAGNETOSTATICKÁ ANALÝZA, JEDNOPÓLOVÝ MODEL.....	47
5.3 VÝSLEDNÁ SÍLA	50
5.3.1 MAGNETOSTATICKÁ ANALÝZA, JEDNOPÓLOVÝ MODEL.....	50
6 TRANZIENTNÍ ANALÝZA	52
6.1 SIMULACE V PROGRAMU ANSYS MAXWELL	52
6.1.1 JEDNOPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, SINUSOVÝ PRŮBĚH.....	52
6.1.2 JEDNOPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, NESYMETRICKÝ PRŮBĚH.....	53
6.1.3 TŘÍPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, SINUSOVÝ PRŮBĚH.....	54
6.1.4 TŘÍPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, NESYMETRICKÝ PRŮBĚH.....	55
6.2 RUČNÍ VÝPOČET SÍLY V KONTAKTNÍ ÚŽINĚ	55
6.2.1 JEDNOPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, SINUSOVÝ PRŮBĚH.....	55
6.2.2 JEDNOPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, NESYMETRICKÝ PRŮBĚH.....	58
6.2.3 TŘÍPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, SINUSOVÝ PRŮBĚH.....	61
6.2.4 TŘÍPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, NESYMETRICKÝ PRŮBĚH.....	63
6.3 VÝSLEDNÁ SÍLA	66
6.3.1 JEDNOPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, SINUSOVÝ PRŮBĚH.....	66
6.3.2 JEDNOPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, NESYMETRICKÝ PRŮBĚH.....	68
6.3.3 TŘÍPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, SINUSOVÝ PRŮBĚH.....	70
6.3.4 TŘÍPÓLOVÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY, NESYMETRICKÝ PRŮBĚH.....	73
7 ZÁVĚR.....	76
LITERATURA	77
PŘÍLOHY	78



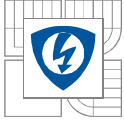
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1-1: Zapojení proudového chrániče [2]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 1-2: Tavná pojistka [4]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 1-3: Působení tepelné a zkratové spouště pro jednotlivé typy jističů [7]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 1-4: Průřez 1 fázovým jističem [5]</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 2-1: Flemingovo pravidlo levé ruky [12]</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2-2: Síla vznikající vzájemným působením dvou vodičů, kterými prochází proud [11] ..</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 2-3: Výpočet síly působící na vodiče, které svírají pravý úhel [11]</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 2-4: Znárodnění průchodu sil zúženými místy (kontakty) [13]</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 2-5: Časový průběh síly způsobené střídavým proudem [11]</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 2-6: Časový průběh sil v trojfázové soustavě [11]</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 3-1: BD250NE305 od Firmy OEZ [08]</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 3-2: Spodní kontakt jističe</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 3-3: Vrchní pohyblivý kontakt jističe</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 3-4: Díl zhášecí komory jističe</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 3-5: Druhý konstrukční prvek zhášecí komory jističe</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 3-6: Kompletní proudovodná dráha jističe</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 3-7: Jiný pohled na proudovodnou dráhu jističe</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 3-8: Detail zhášecí komory modelovaného jističe</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 3-9: Kompletní model proudovodné dráhy jističe</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 4-1: Model proudovodné dráhy jističe vložený do programu ANSYS MAXWELL</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 4-2: Proudovodná dráha jističe s přiřazeným materiálem - měď</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 4-3: Plechy zhášecí komory, kterým je přiřazen materiál - ocel</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 4-4: Globální a sekundární souřadnicový systém</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 4-5: Nastavení vstupního proudu</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 4-6: Nastavení parametrů analýzy pro stejnosměrný proud</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 4-7: Nastavení parametrů analýzy pro stejnosměrný proud v kartě Solver</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 4-8: Nastavení parametrů tranzientní analýzy</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 4-9: Nastavení karty Advanced a Solver</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 5-1: Zadání parametru moment (Torque)</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 5-2: Rozložení magnetické indukce v proudovodné dráze jističe</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 5-3: Rozložení proudové hustoty v proudovodné dráze jističe</i>	<i>46</i>



SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 5-1: Velikosti momentu pro zadané proudy.....</i>	<i>46</i>
<i>Graf 5-2: Průběh momentu působícího na kontakt, Magnetostatická analýza pro jednopólový model.....</i>	<i>48</i>
<i>Graf 5-3: Průběh síly F_z, Magnetostatická analýza pro jednopólový model</i>	<i>49</i>
<i>Graf 5-4: Průběh síly F_u, Magnetostatická analýza pro jednopólový model.....</i>	<i>49</i>
<i>Graf 5-5: Průběh výsledné síly F_{zCelk}, Magnetostatická analýza pro jednopólový model</i>	<i>50</i>
<i>Graf 5-6: Znázornění všech sil působících na kontakt, Magnetostatická analýza pro jednopólový model.....</i>	<i>51</i>
<i>Graf 6-1: Průběh vstupního proudu a momentu, tranzientní analýza sinusový průběh</i>	<i>52</i>
<i>Graf 6-2: Průběh vstupního proudu a síly kontaktu v ose X a Y, transientní analýza sinusový průběh.....</i>	<i>53</i>
<i>Graf 6-3: Průběh vstupního proudu a momentu, tranzientní analýza nesymetrický průběh</i>	<i>53</i>
<i>Graf 6-4: Průběh vstupního proudu a síly kontaktu v ose X a Y, tranzientní analýza nesymetrický průběh.....</i>	<i>54</i>
<i>Graf 6-5: Průběh vstupních proudů a momentů, tranzientní analýza, symetrický průběh</i>	<i>54</i>
<i>Graf 6-6: Průběhy vstupních proudů a momentů, tranzientní analýza, nesymetrický průběh.....</i>	<i>55</i>
<i>Graf 6-7: Průběh momentu působícího na kontakt jističe, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh</i>	<i>56</i>
<i>Graf 6-8: Průběh síly ve směru osy Z, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh</i>	<i>57</i>
<i>Graf 6-9: Průběh síly v kontaktní úžině, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh .</i>	<i>57</i>
<i>Graf 6-10: Průběh momentu, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh.....</i>	<i>59</i>
<i>Graf 6-11: Průběh síly ve směru osy Z, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh</i>	<i>59</i>
<i>Graf 6-12: Průběh síly v kontaktní úžině, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh.....</i>	<i>60</i>
<i>Graf 6-13: Průběh momentu, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh.....</i>	<i>62</i>
<i>Graf 6-14: Průběh síly ve směru osy Z, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh</i>	<i>62</i>
<i>Graf 6-15: Průběh síly v kontaktní úžině, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh.....</i>	<i>63</i>
<i>Graf 6-16: Průběh momentu, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh.....</i>	<i>64</i>
<i>Graf 6-17: Průběh síly ve směru osy Z, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh.....</i>	<i>65</i>
<i>Graf 6-18: Průběh síly v kontaktní úžině, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh... </i>	<i>65</i>
<i>Graf 6-19: Průběh výsledné síly působící na kontakt jističe, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh</i>	<i>67</i>

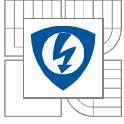


<i>Graf 6-20: Průběhy sil působících na kontakt jističe, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh</i>	<i>67</i>
<i>Graf 6-21: Průběh výsledné síly působící na kontakt jističe, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh</i>	<i>69</i>
<i>Graf 6-22: Průběh sil působících na kontakt jističe, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh</i>	<i>69</i>
<i>Graf 6-23: Průběh celkové síly působící na kontakt jističe, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh</i>	<i>71</i>
<i>Graf 6-24: Průběh sil působících na kontakt v první fázi, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh.....</i>	<i>71</i>
<i>Graf 6-25: Průběh sil působících na kontakt v druhé fázi, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh.....</i>	<i>72</i>
<i>Graf 6-26: Průběh sil působících na kontakt ve třetí fázi, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh.....</i>	<i>72</i>
<i>Graf 6-27: Průběh celkové síly působící na kontakt jističe, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh</i>	<i>74</i>
<i>Graf 6-28: Průběh sil působících na kontakt v první fázi, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh</i>	<i>74</i>
<i>Graf 6-29: Průběh sil působících na kontakt v druhé fázi, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh</i>	<i>75</i>
<i>Graf 6-30: Průběh sil působících na kontakt ve třetí fázi, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh</i>	<i>75</i>



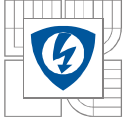
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1-1: Barevné označení závitových pojistek podle jmenovitého proudu</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 1-2: Značení tavných pojistek nízkého napětí</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 3-1: Katalogové hodnoty jističe BD250NE305 [09].....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 3-2: Příslušenství jističe BD250NE305 [09]</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 5-1: Výsledky výpočtu jednopólové Magnetostatické analýzy</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 5-2: Výsledná síla působící na kontakt jističe, Magnetostatická analýza pro jednopólový model</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 6-1: Výsledky výpočtu Tranzientní analýza pro jednopólový sinusový průběh</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 6-2: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 6-3: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 6-4: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 6-5: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 6-6: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 6-7: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 6-8: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh</i>	<i>73</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	proud
B	magnetická indukce
D	plocha kontaktu
d	náhradní plocha kontaktu
F	síla
F_P	síla působící na kontakt
h	vzdálenost od středu
H_B	tvrdost materiálu podle Brinnela
I	elektrický proud
i	okamžitá hodnota elektrického proudu
l	délka
M	moment
r	poloměr
S	plocha
μ	permeabilita
ξ	činitel respektující vliv pružné deformace
φ	magnetický tok
ω	úhlová frekvence



ÚVOD

Tato diplomová práce pojednává o výpočtu dynamických sil jističe OEZ BD250NE305 - 250A. Je důležité znát velikosti a působení těchto sil, protože jistič slouží primárně k ochraně zařízení a jeho správná funkčnost nám pomůže v případě poruchy uchránit zařízení před zničením.

Při poruše může dojít k průchodu proudu, který může být až několika násobkem své jmenovité hodnoty. V této diplomové práci budeme simulovat poruchové stavy a vznik elektromechanických sil.

V úvodu jsou vysvětleny základní pojmy v elektrotechnice, vysvětleny jednotlivé části a funkce jističe, rozbor dynamických sil působících v jističi, 3D model jističe a simulace sil v prostředí Maxwell.

1 DRUHY OCHRANNÝCH A JISTICÍCH PRVKŮ

V elektrotechnice dělíme ochranné prvky na dvě skupiny. První skupinou jsou prvky ochraňující člověka před účinky proudu - nazýváme je chrániče. Jsou takzvanou ochranou doplňkovou, ale i ochranou při poruše. Druhou skupinou jsou prvky, které chrání před účinky poruchových stavů zařízení – jističe a pojistky. Ty tvoří jištění hlavní.

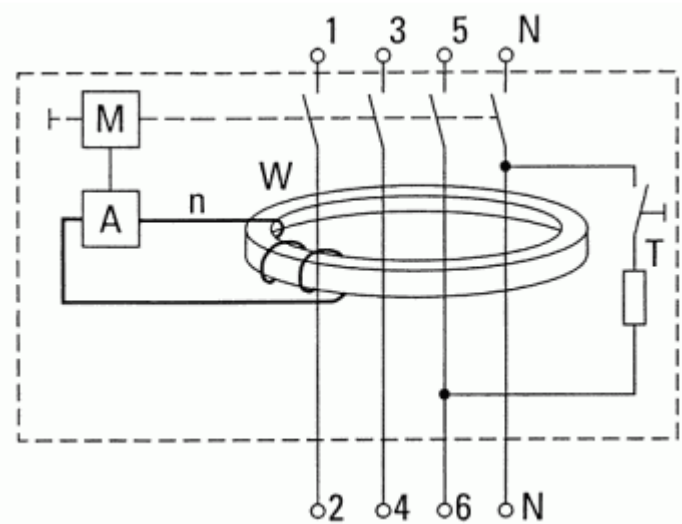
1.1 Proudový chránič

Jeho úkolem je rychlé odpojení od zdroje, které ještě není schopna zaregistrovat hlavní ochrana. Rychlost odpojení se pohybuje pod hranicí 0,2 s.

Nové elektrotechnické instalace již musí být vybaveny touto doplňkovou ochranou.

Principem funkčnosti chrániče je porovnávání vstupujícího a vystupujícího proudu, ten se musí vždy rovnat. Tohoto porovnání je dosaženo diferenciálním transformátorem. Tímto transformátorem musí vést všechny pracovní vodiče, kromě vodiče PE. Jinak by smysl chrániče ztratil význam.

Při normálním chodu je součet všech proudů roven nule a tím se neindukují žádné napětí v sekundární části transformátoru. Při úniku proudu za chráničem z fáze do země dojde k rozdílu porovnávaných proudů, v sekundárním vinutí se naindukují napětí a proud přes relé rychle rozpojí obvod. Názorné zapojení proudového chrániče na obrázku 1-1.



Obrázek 1-1: Zapojení proudového chrániče [2]

„Každý nový a zrekonstruovaný rodinný dům, byt či kancelář, musí být vybaven proudovými chrániči. Norma upravující ochranu před úrazem elektrickým proudem (ČSN 33 2000-4-41 edice 2) nařizuje instalovat tento ochranný prvek ke každému přístupnému elektrickému okruhu.“

1.2 Pojistka

1.2.1 Princip pojistky

Pojistka je jednorázový přístroj chránící elektrická zařízení v obvodu před účinky nadměrného proudu v obvodu.

Principem pojistky je to, že tvoří nejslabší místo v obvodu. Průchodem proudu vzniká na odporovém drátu úbytek napětí a tím ztráty ve formě tepelné. Pojistkový vodič je tímto úbytkem zahříván. Čím větší průchod proudu, tím větší úbytek napětí a vyšší teplota vodiče. Se zvyšujícím se proudem, se zkracuje doba přetavení pojistky a dojde k rozpojení elektrického obvodu.



Obrázek 1-2: Tavná pojistka [4]

Tavná pojistka je tvořena keramickým pouzdrem, uvnitř je tavný vodič uložený v křemičitém písku, který má za úkol, co nejrychleji uhasit vzniklý oblouk. Na přední části je na pérku umístěn barevný terčík, který je určen k signalizaci přetavení pojistky. Jeho barva je také přiřazena k určité hodnotě jmenovitého proudu viz. tabulka 1-1. Spodek pojistky má předepsaný tvar, aby nedošlo k záměně za pojistku s vyšším jmenovitým proudem.

Tabulka 1-1: Barevné označení závitových pojistek podle jmenovitého proudu

Jmenovitý proud [A]	Barva
2	Růžová
4	Hnědá
6	Zelená
10	Červená
16	Šedá
20	Modrá
25	Žlutá
35	Černá
50	Bílá
63	Měděná
80	Stříbrná
100	Červená

Přerušená pojistka se v žádném případě nesmí opravovat, musí se vždy vyměnit za nový kus.

1.2.2 Dělení pojistek

- Válcové pojistky – použití v průmyslových instalacích,
- Nožové pojistky – pro připojení nízkého napětí,
- Závitové (keramické) pojistky – používané v domovních instalacích;

1.2.3 Vlastnosti pojistek

Jmenovitý proud: Proudová mez - jejím překročením dojde k nenávratnému poškození a přetavení pojistky. Rychlost přetavení je dána vypínací charakteristikou a výší nadproudu.

Vypínací charakteristika: Závislost doby vypnutí na velikosti nadproudu.

Jmenovitá vypínací schopnost: Je hodnota předpokládaného proudu, který je pojistka schopna přerušit.

Značení tavných pojistek vysvětluje následující tabulka:

Tabulka 1-2: Značení tavných pojistek nízkého napětí

Funkční třída	Kategorie použití
g: jištění v celém rozsahu	G: všeobecné použití
	Tr: jištění transformátorů
	M: jištění motorů
a: vypíná pouze část nadproudů	R: jištění polovodičů
	L: jištění vedení

1.3 Miniaturní jističe (pro domovní instalace)

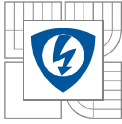
Jistič je elektrický přístroj určený k spínání a ochraně elektrických obvodů a zařízení proti nadproudům. Nadproudy se dále rozumí zkratové proudy a přetížení proudem vyšším než je dovolený jmenovitý proud. Na rozdíl od pojistky se jedná o nedestruktivní jisticí přístroj a je možné po vypnutí (vybavení spouště) ho opětovně použít. Správnou funkci jističe zajišťuje tepelná a zkratová spoušť. Mimo to může být jistič navíc jako přídatným zařízením vybaven podpěťovou, podproudovou, nebo vypínací spouští.

1.3.1 Tepelná spoušť

Tepelná spoušť je u jističe tvořena bimetalovým (dvojkov) páskem, vloženým do proudové dráhy. Tepelná spoušť chrání zařízení nebo vedení proti přetížení proudem větším než jmenovitým. Princip činnosti u bimetalové spouště je velmi jednoduchý, pásek je tvořen dvěma kovy s rozdílnou tepelnou roztažností tzn., vlivem tepla se každý z kovů roztahuje jinou rychlostí. Při průchodu proudem bimetalem se tento zahřívá a vlivem rozdílné tepelné roztažnosti nastává jeho deformace, pásek se prohne a uvolní západku vypínacího mechanismu. Tím dochází k vybavení (vypnutí) jističe. Rychlost reakce tepelné spouště závisí na velikosti nadproudu, pohybuje se řádově v rozmezí několika desítek sekund, až několika desítek minut u proudů jen málo přesahující jmenovitý proud viz. vypínací charakteristika jističů.

1.3.2 Zkratová spoušť

V případě zkratových proudů je nutné chráněný obvod co nejrychleji odpojit, to zajišťuje elektromagnetická zkratová spoušť. Tu tvoří cívka vložená do proudové dráhy v jističi, v případě, že došlo v chráněném obvodu ke zkratu a cívkou protéká zkratový proud. Vytvoří se elektromagnetické pole a cívka přitáhne kotvu vypínající jistič. Zkratová spoušť při zkratu působí v téměř okamžité, její reakce je v řádu desítek milisekund.



1.3.3 Rozdělení jističů

Podle počtu modulů - trojfázové
- jednofázové

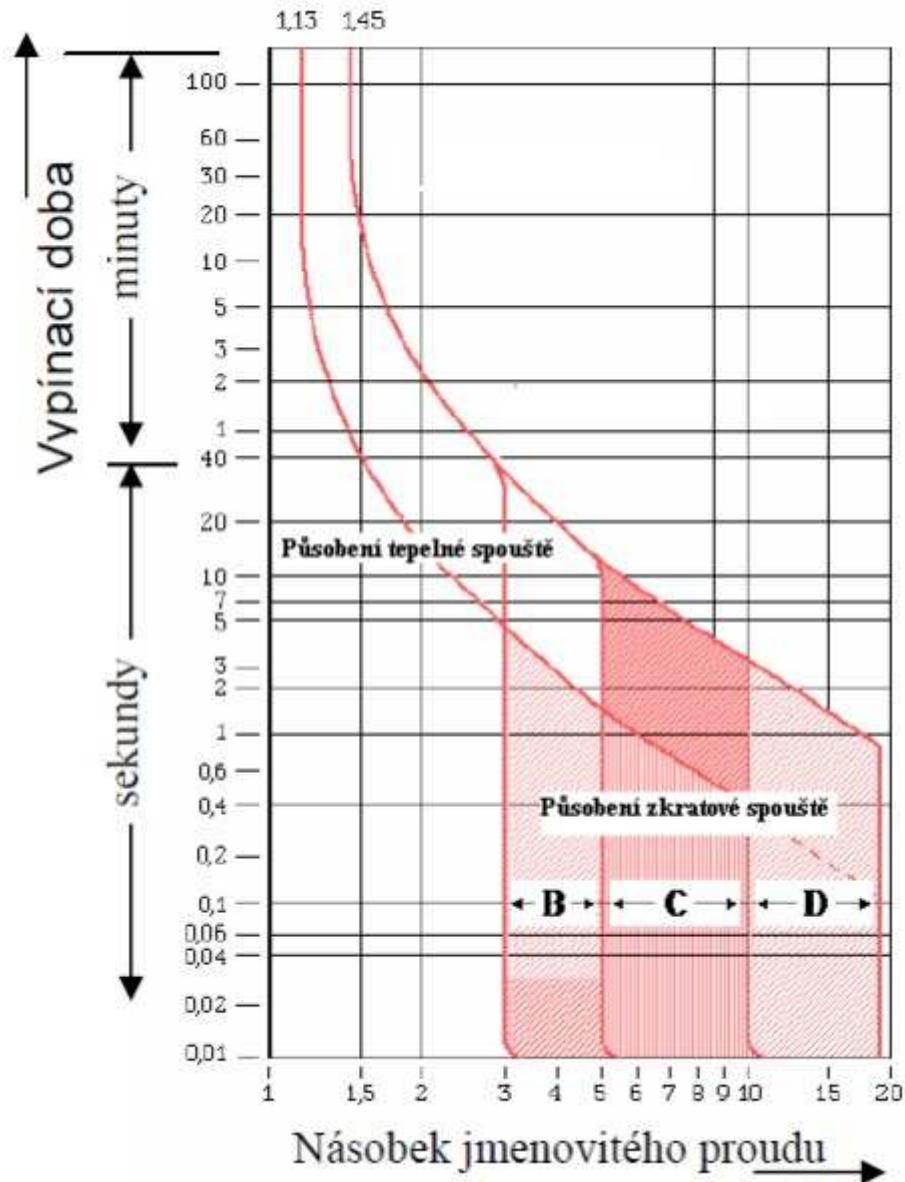
Podle vypínací charakteristiky - A – jištění polovodičů
- B – jištění vedení
- C – jištění spotřebičů včetně menších motorů
- D – jištění motorů s těžkým rozběhem a transformátorů

Podle účelu použití - drobné jističe s IN do 25A
- výkonové jističe s IN nad 25A
- motorové jističe s pomalejší reakcí a nastavitelnou tepelnou spouští
- ochranné jističe – jističe s ochranou funkcí
- jističe s elektronickou spouští

1.3.4 Vypínací charakteristika

Jistič, při proudu přesahující jeho jmenovitou hodnotu I_n , nevypíná chráněný obvod okamžitě.

Závislost doby vypnutí (reakce) na velikosti nadproudu nám udává vypínací charakteristika jističe. Nejběžněji se v domovních a průmyslových instalacích setkáváme s jističi charakteristik B, C, D. Jističe s charakteristikou B reagují na nadproud v nejkratším čase (nejrychleji), hodí se proto pro jištění zařízení, kde při rozběhu nedochází k velkým nadproudům. Naproti tomu jističe s charakteristikou D reagují nejpomaleji a používají se pro jištění zařízení, kde například při rozběhu dochází k velkým nadproudům a není žádoucí, aby jistič reagoval na tyto nadproudy vypnutím. Jističe s charakteristikou C se nachází mezi výše zmíněnými a hodí se pro jištění běžných spotřebičů a například zásuvkových obvodů.



Obrázek 1-3: Působení tepelné a zkratové spouště pro jednotlivé typy jističů [7]

Důležité pojmy:

I_n - jmenovitý proud - proud, který jistič trvale propouští bez vybavení (vypnutí).

U_n - jmenovité napětí - napětí, pro které je jistič určen.

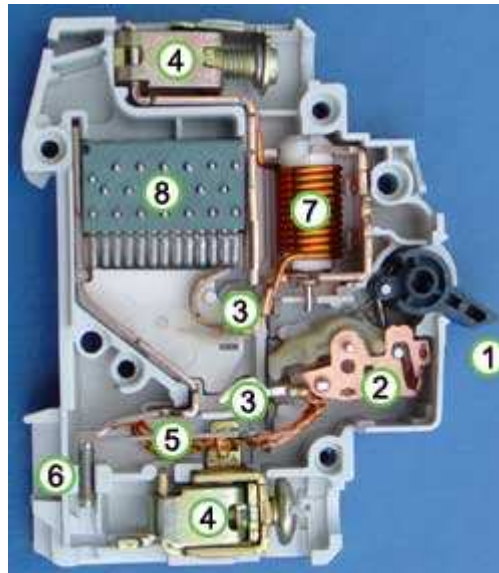
Smluvený vypínací proud – proud, při jehož překročení dojde k vybavení (vypnutí) jističe většinou 1,45 násobek I_n .

Zkratová vypínací schopnost (odolnost) – velikost zkratového proudu, který je ještě jistič schopen vypnout (cca 6 až 25 kA) [7]

1.3.5 Hlavní části jističe

V této kapitole si popíšeme hlavní mechanické části jističe a jejich funkci.

1. ovládací páčka
2. aretační mechanismus
3. kontakty
4. přívodní šroubová svorka
5. bimetalový člen pro vybavení přetížením
6. regulační prvek nastavení citlivosti (u běžných domovních jističů nebývá přítomen)
7. elektromagnetická spoušť pro vybavení zkratem
8. zhášecí komora [5]



Obrázek 1-4: Průřez 1 fázovým jističem [5]

1.4 Třífázový kompaktní jistič

Třífázové jističe mají v podstatě stejné vlastnosti jako jističe jednofázové, ale dané vlastnosti mají pro každou fázi zvlášť.

Bližší specifikací třífázových jističů se budu zabývat v další kapitole, jenž je praktickou částí této diplomové práce.

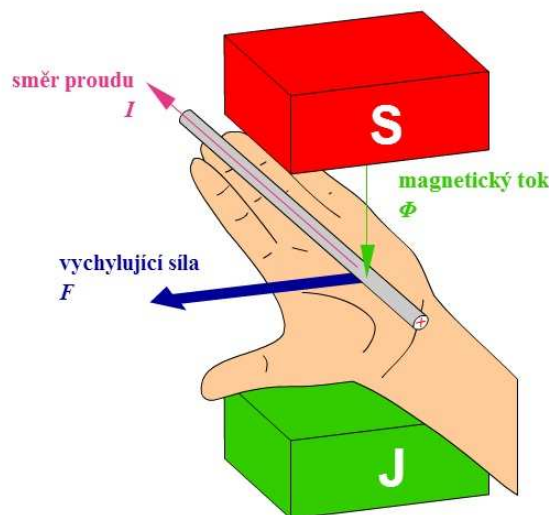
2 TEORETICKÝ ROZBOR PŮSOBENÍ DYNAMICKÝCH SIL V JISTIČI

Dojde-li ke zkratu v síti, může jističem procházet až několikanásobek jmenovitého proudu. Protože se vodiče jističe, kterými prochází zkratový proud, nacházejí v magnetickém poli, dochází ke vzniku značných sil, které se snaží deformovat jak vodiče, tak i izolátory, na niž jsou vodiče uloženy. V krajních případech dosahují síly až několik desítek tun, takže v jističi může dojít k destrukci mechanických částí.

Chceme-li určit elektrodynamické síly, musíme určit sílu, kterou působí magnetické pole na vodiče, jimiž prochází proud.

$$df = i dl * B \quad (2.1)$$

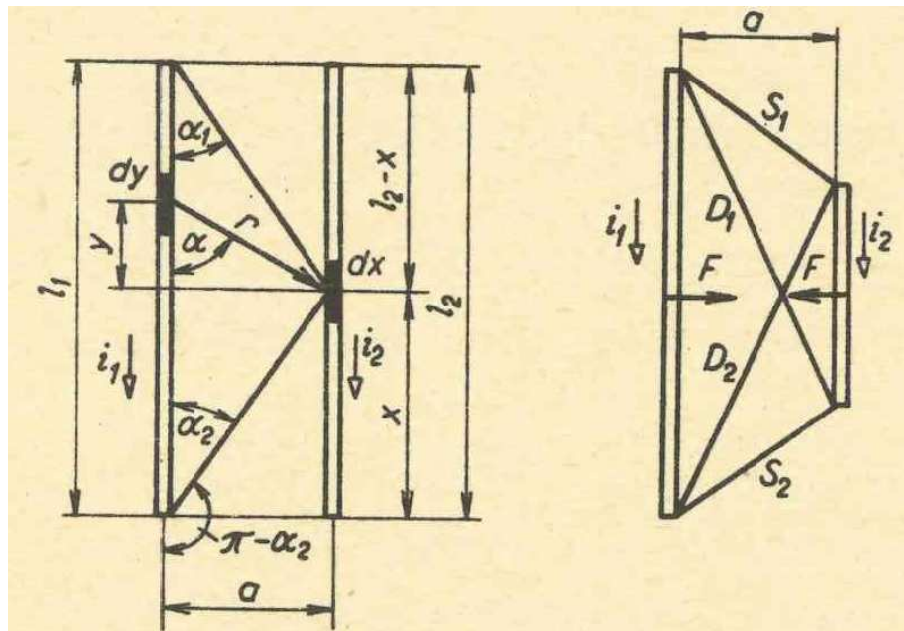
Směr indukčních čar vytvořených proudem, který prochází vodičem, lze snadno stanovit pravidlem levé ruky. Položíme-li dlaň tak, aby do ní vstupovaly indukční čáry magnetického pole, přičemž prsty ukazují směr proudu procházejícího vodičem, ukazuje palec směr síly, která působí na vodič.



Obrázek 2-1: Flemingovo pravidlo levé ruky [12]

2.1 Elektrodynamické síly vynikající mezi dvěma rovnoběžnými vodiči

Uvažujeme-li dva nekonečné tenké rovnoběžné vodiče, kterými prochází proudy i_1 a i_2 . Podle Biotova-Savartova-Laplaceova zákona vzniká působením proudu i_1 , procházejícího elementem dráhy dy v místě elementu dx , magnetická indukce.



Obrázek 2-2: Síla vznikající vzájemným působením dvou vodičů, kterými prochází proud [11]

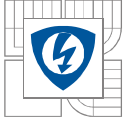
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{i_1 * dy}{r^2} * \sin\alpha \quad (2.2)$$

Magnetickou indukci, způsobenou v místě dx vodičem délky l_1 a proudem i_1 stanovíme z rovnice

$$B = \frac{\mu_0 * i_1}{4\pi} * \frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{a} \quad (2.3)$$

Poté síla vytvořená vodičem délky l a působící na element dx je

$$dF = \frac{\mu_0}{4\pi} * \frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{a} * i_2 dx \quad (2.4)$$



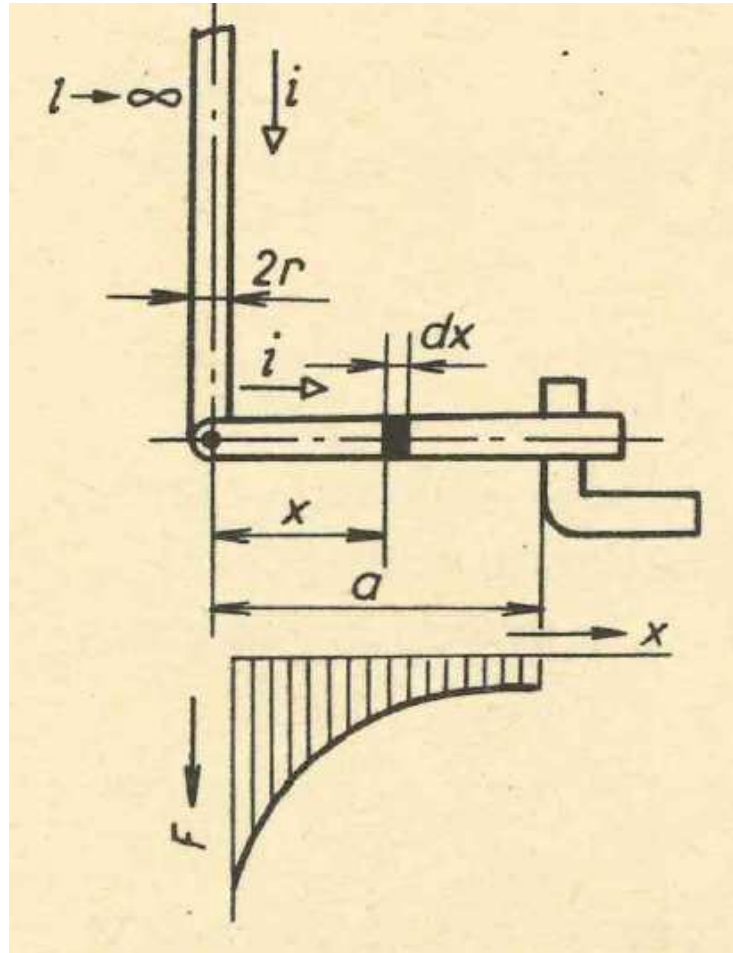
Je-li vzdálenost mezi vodiči podstatně menší, než jejich délka $a/l \leq 0,1$, dostaneme pro výpočet síly vztah

$$Fx = i_1 * i_2 * \frac{2l}{a} * 10^{-7} \quad (2.5)$$

Chyba tohoto vztahu nepřesahuje hodnotu 5%. [11]

2.2 Elektrodynamické síly vynikající v zahnutých vodičích

V elektrických přístrojích nacházíme velice často případ naznačený na následujícím obrázku.



Obrázek 2-3: Výpočet síly působící na vodiče, které svírají pravý úhel [11]

Dvě části elektrického obvodu, jimiž prochází proud, svírají pravý úhel. Podle naznačeného uspořádání, můžeme zjistit sílu vznikající v jističi v pohyblivém kontaktu.

Síla působící na element kontaktu

$$df = i \, dl * B \quad (2.6)$$

$$F = i * \int dl * B \quad (2.7)$$

Magnetická indukce

$$Bx = \frac{\mu_0 * i_1}{4\pi x} * (\cos\beta_2 - \cos\beta_1) \quad (2.8)$$

$$Bx = \frac{\mu_0 * i_1^2}{4\pi} \int_r^l (\cos\beta_2 - \cos\beta_1) \frac{dx}{x} \quad (2.9)$$

$$\cos\beta_1 = 0; \quad \cos\beta_2 = \frac{h}{\sqrt{h^2 + x^2}} \quad (2.10)$$

Poté bude vztah pro sílu

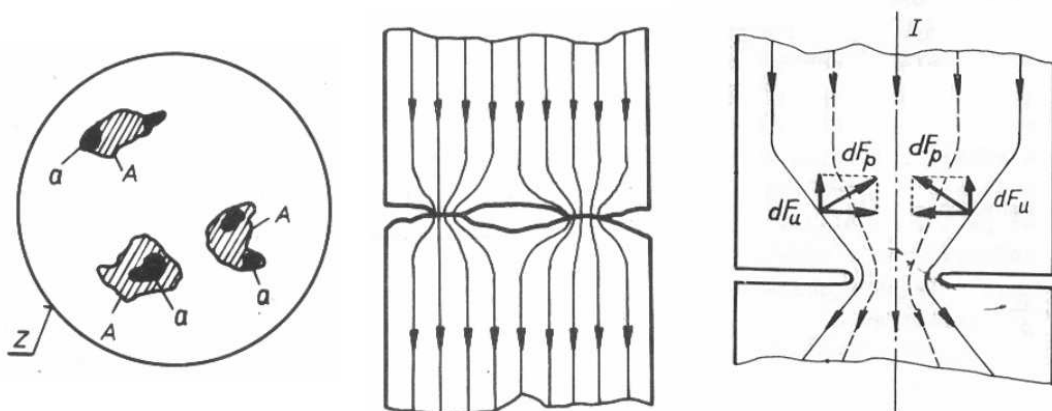
$$F = i^2 * \ln * \frac{l(h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r(h + \sqrt{h^2 + l^2})} * 10^{-7} \quad (2.11)$$

2.3 Elektrodynamické síly vznikající při změně průřezu vodiče (mezi kontakty)

Vlivem mikroskopických nerovností ploch kontaktů (Obrázek 2-4 vlevo) se průchod proudu mezi kontakty realizuje v mikroskopických ploškách styku kovu. Pro celkový průřez těchto kontaktních plošek lze psát

$$S = \frac{F_k}{\xi * H_B} \quad (2.12)$$

kde F_k je síla přitlačující obě kontaktní plochy k sobě, ξ je činitel respektující vliv pružné deformace a H_{B+} je tvrdost materiálu podle Brinella.



Obrázek 2-4: Znárodnění průchodu sil zúženými místy (kontakty) [13]

Soustředěním proudnic do stykové plošky dojde k jejich individuálnímu zakřivení, jak je vidět z Obrázku 2-4 uprostřed. Pokud by nedošlo k tomuto soustředění, ale proud by protékal celým povrchem kontaktů, měla by magnetická síla snažící se přemístit jednotlivá proudová vlákna do středu pouze radiální složku. Při změně průřezu ovšem dojde i ke vzniku složky axiální, jak je vidět z Obrázku 2-4 vpravo. Jelikož se v místě styku průřez zmenšuje, působí vzniklá síla vždy proti kontaktnímu přitlaku a zmenšuje jej. Tato síla je úměrná čtverci proudu.

Ze vzorce pro celkový průřez vyplývá, že velikost vzniklé elektrodynamické síly je úměrná zakřivení proudnic. Při menší kontaktní síle je tedy menší plocha, větší zakřivení proudnic, a tím i větší vzniklá elektrodynamická síla.

Jestliže je výsledná elektrodynamická odpudivá síla na pohyblivý kontakt větší, než přitlačná, dojde k odskoku kontaktů. Aby nedocházelo ke zpětným dosedům kontaktů při určitých proudech, což by mohlo způsobit svaření kontaktů, je nutné nosič pohyblivého kontaktu po odskoku zajistit proti návratu. [13]

2.4 Elektrodynamické síly v jednofázové soustavě

Nyní si popíšeme síly, které vznikají mezi vodiči v jednofázové síti. Musíme předpokládat, že časový průběh proudu neobsahuje aperiodickou složku a je sinusový, takže ho můžeme popsat rovnicí

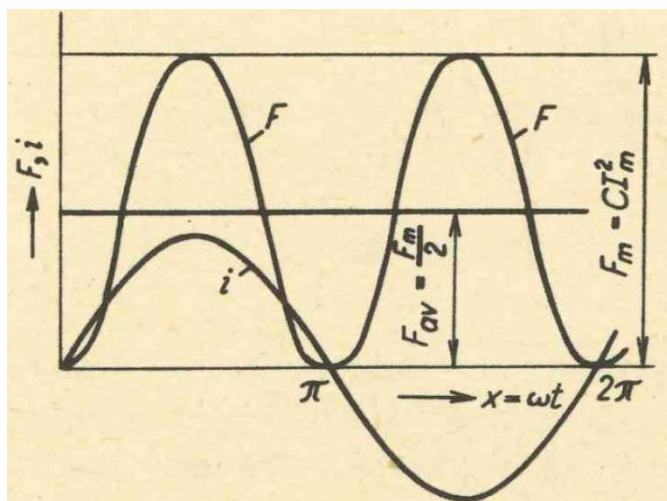
$$i = i_m \sin \omega t \quad (2.13)$$

Jestliže proudy v obou vodičích v jednofázové síti procházejí stejným směrem, přitahují se vzájemně silou

$$F = cI_m^2 \sin^2 \omega t \quad (2.14)$$

c je zde konstantou, jejíž velikost je určena geometrií obvodu

F_M maximální hodnota síly F



Obrázek 2-5: Časový průběh síly způsobené střídavým proudem [11]

Střední hodnotu síly vypočteme ze vzorce

$$F_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T F dt \quad (2.15)$$

Připojíme-li střídavé napětí na obvod, který se nachází ve zkratu, objeví se v průběhu také aperiodická složka

$$i = I_M(e^{-\frac{t}{T}} - \cos \omega t) \quad (2.16)$$

Budeme-li respektovat přechodnou složku proudu, je elektrodynamická síla určena vztahem

$$F = cI_M^2(e^{-\frac{t}{T}} - \cos \omega t) \quad (2.17)$$

2.5 Elektrodynamické síly v trojfázové soustavě

Stanovme síly působící mezi rovnoběžnými vodiči trojfázové soustavy, uložené v jedné rovině. Pro jednoduchost předpokládejme, že vzdálenost mezi vodiči je nepatrná ve srovnání s jejich délkou. Jednotlivé fázové proudy jsou kladné, jejich časový průběh určují rovnice

$$i_1 = I_M \sin \omega t \quad (2.18)$$

$$i_2 = I_M \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (2.19)$$

$$i_3 = I_M \sin(\omega t - 4\pi/3) \quad (2.20)$$

Síly působící na vodiče

$$F_1 = F_{12} + F_{13} \quad (2.21)$$

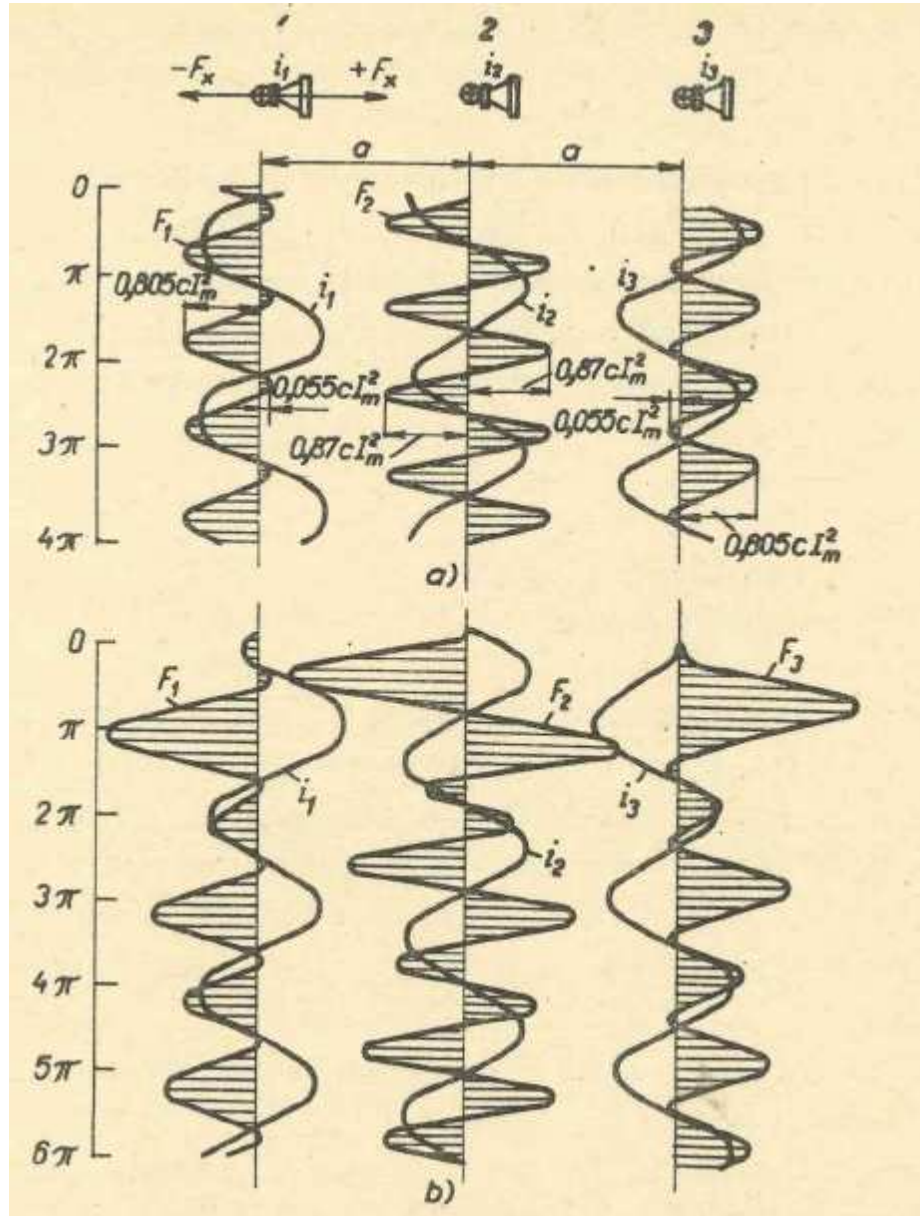
$$F_{12} = c_1 I_M^2 \sin \omega t \sin \omega t (\omega t - 2\pi/3) \quad (2.22)$$

$$F_{13} = 0,5c_1 I_M^2 \sin \omega t \sin \omega t (\omega t - 4\pi/3) \quad (2.23)$$

Konstanta

$$c_1 = 2 * 10^{-7} \frac{l}{a} \quad (2.24)$$

Na následujícím obrázku můžeme vidět časový průběh sil.



Obrázek 2-6: Časový průběh sil v trojfázové soustavě [11]

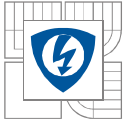
3 JISTIČ OEZ BD250NE305

Mým úkolem, v této diplomové práci, je výpočet dynamických sil v kompaktním jističi BD250NE305 od Firmy OEZ.

Kompaktní jističe firmy OEZ jsou určeny pro jištění a méně časté spínání elektrických zařízení od 40 A do 1600 A. Hlavní výhodou je promyšlená stavebnicovost příslušenství. Díky tomu si může nadproudové spouště a další příslušenství uživatel sám snadno vyměnit. Snadná montáž jističů zkracuje termíny realizace zakázek. Jističe dokáží řešit náhrady starších jističů bez úprav rozváděče. Jsou vhodné pro jištění vedení, transformátorů, motorů a generátorů.
[10]



Obrázek 3-1: BD250NE305 od Firmy OEZ [08]



3.1 Katalogové hodnoty jističe BD250NE305

Tabulka 3-1: Katalogové hodnoty jističe BD250NE305 [09]

Jmenovitý pracovní proud	100 A, 160 A, 200 A, 250 A
Jmenovité pracovní napětí	690 V a.c.
Jmenovitý kmitočet	50-60 Hz
Kategorie užití (režim spínání) / 690 V a.c.	AC-23B
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost / 230 V	60 kA/100 kA
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost / 400 V	36 kA/65 kA
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost / 500 V	16 kA/25 kA
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost / 690 V	10 kA/13 kA
Jmenovitá zkratová zapínací schopnost / 415 V a. c.	75 kA/140 kA

3.2 Příslušenství jističe BD250NE305

Kompaktní jistič MODEION BD250NE305 je vybaven řadou příslušenství. To z něj dělá velice univerzální jistič se širokou škálou použití.

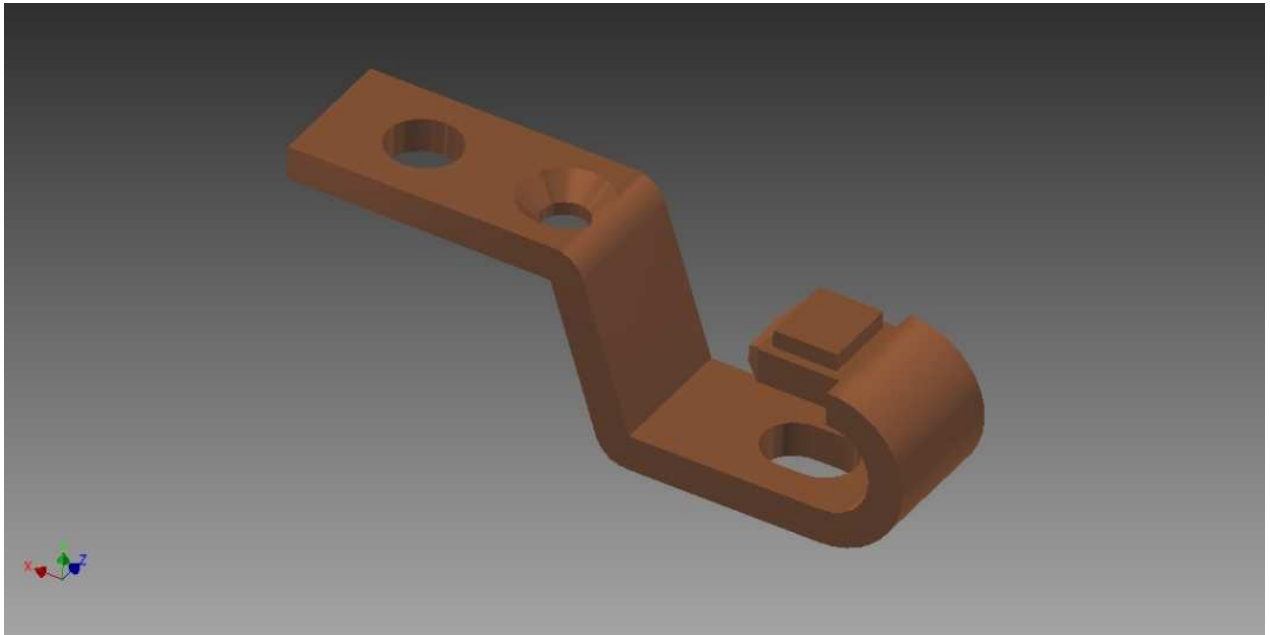
Tabulka 3-2: Příslušenství jističe BD250NE305 [09]

Výsuvné provedení	✓
Odnímatelné provedení	✓
Pomocný spínač	✓
Relativní spínač	✓
Návěstní spínač	✓
Napěťová spoušť	✓
Podpěťová spoušť	✓
Podpěťová spoušť s předstihovým spínačem	✓
Ruční pohon - čelní/boční	+ / +
Ruční pohon se stavitelnou pákou	✓
Motorový pohon	✓

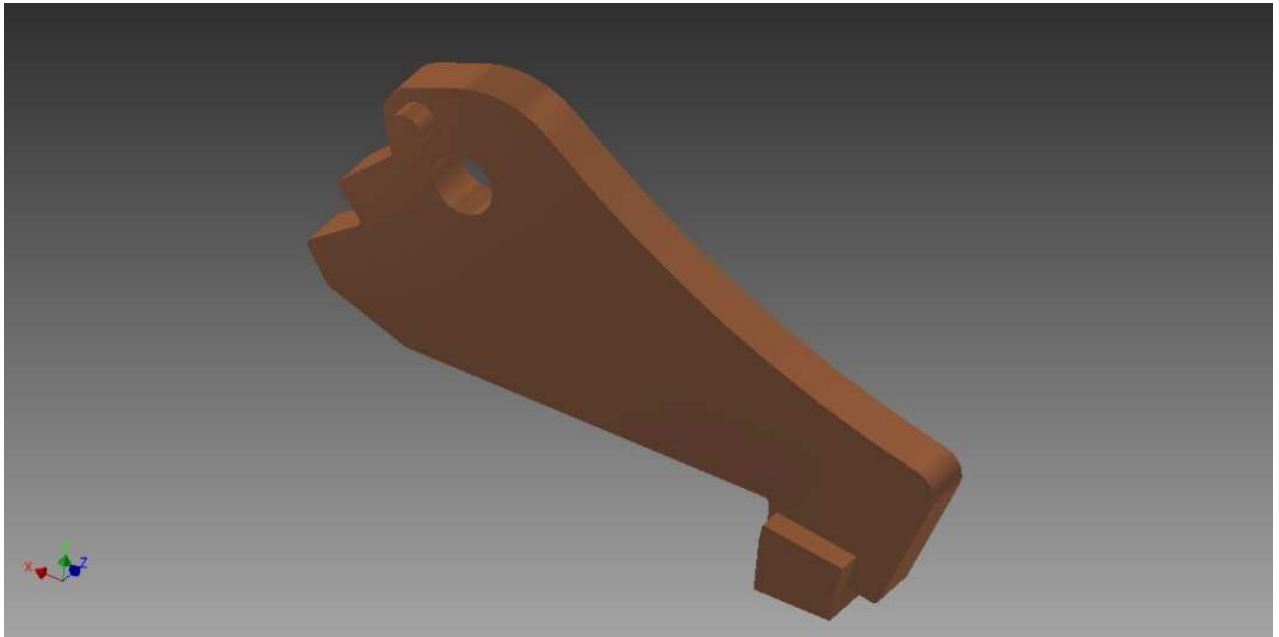
3.3 Model jističe v programu Autodesk Inventor Professional 2012

Prvním úkolem, v praktické části této diplomové práce, bylo nakreslení proudovodné dráhy jističe v 3D programu. Jako nejlepší volba pro mě byl Autodesk Inventor Professional 2012. Tento program celkem dobře ovládám a umí exportovat soubory s příponou .SAT, které poté použiji v simulačním programu Ansys Maxwell.

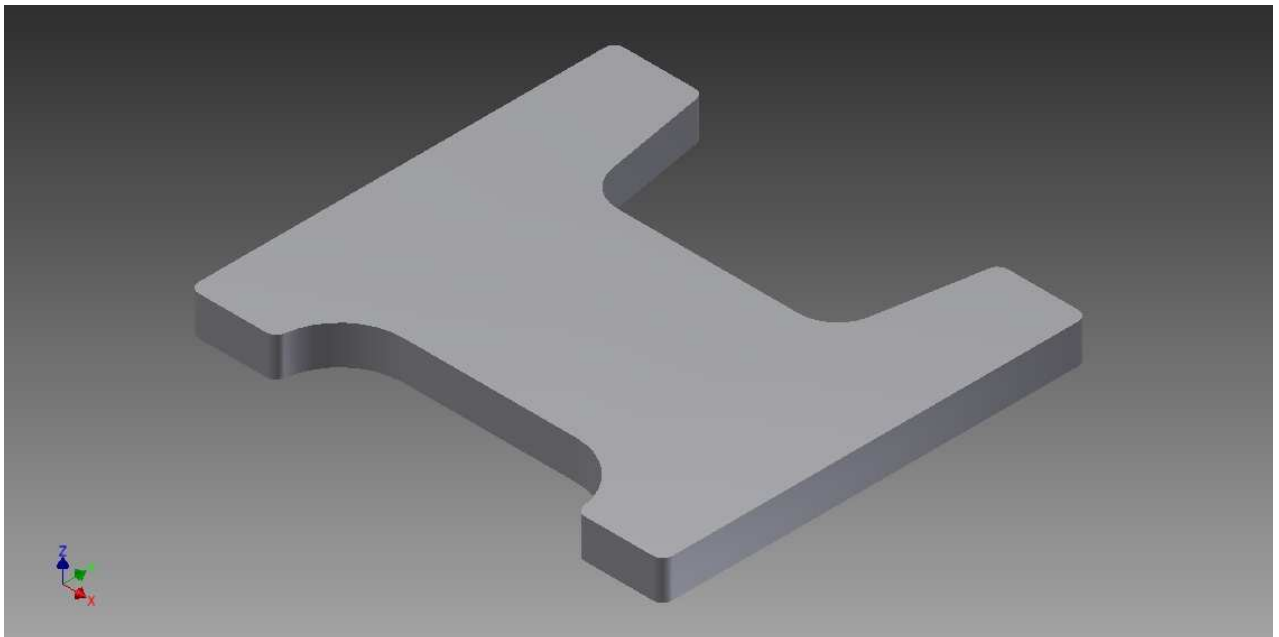
První jsem nakreslil jednotlivé části proudovodné dráhy jističe jako samostatné modely. Jejich velikost jsem ověřoval pomocí posuvného měřítka přímo z reálného jističe, který jsem měl k dispozici. Bylo velice nutné dodržet velikosti, tloušťky a mezery, aby následná simulace odpovídala skutečnosti.



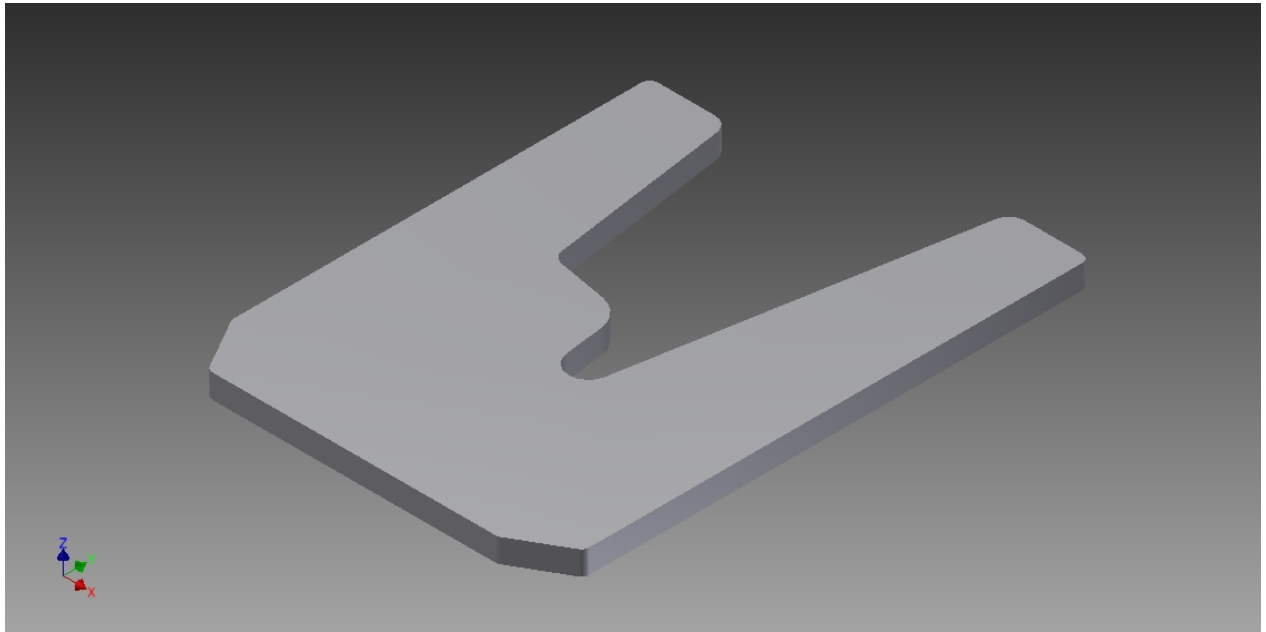
Obrázek 3-2: Spodní kontakt jističe



Obrázek 3-3: Vrchní pohyblivý kontakt jističe



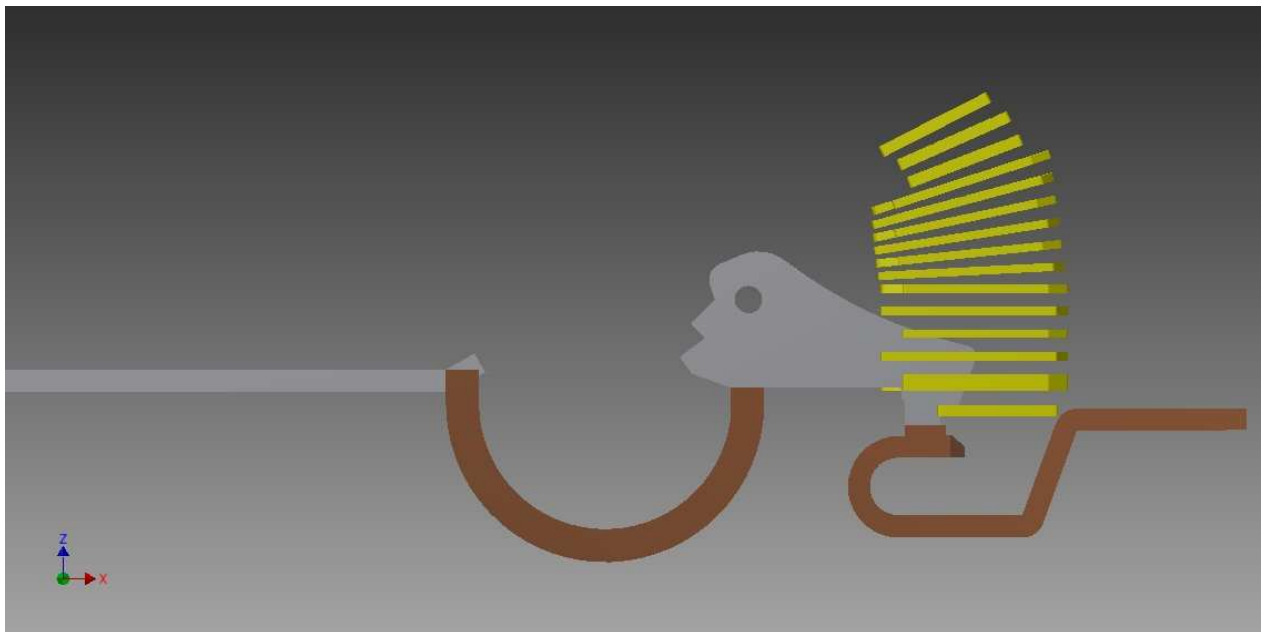
Obrázek 3-4: Díl zhašecí komory jističe



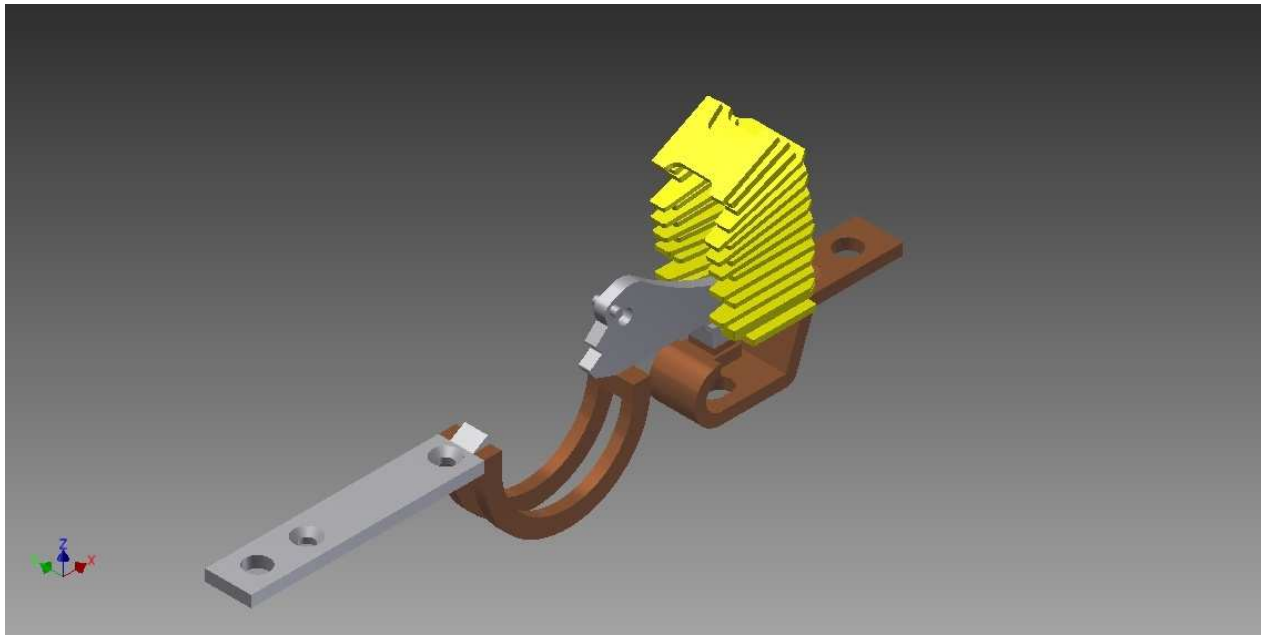
Obrázek 3-5: Druhý konstrukční prvek zhášecí komory jističe

V programu bylo nutné nahradit pohyblivou část vrchního kontaktu (tzv. spletenec) pevnou částí mědi.

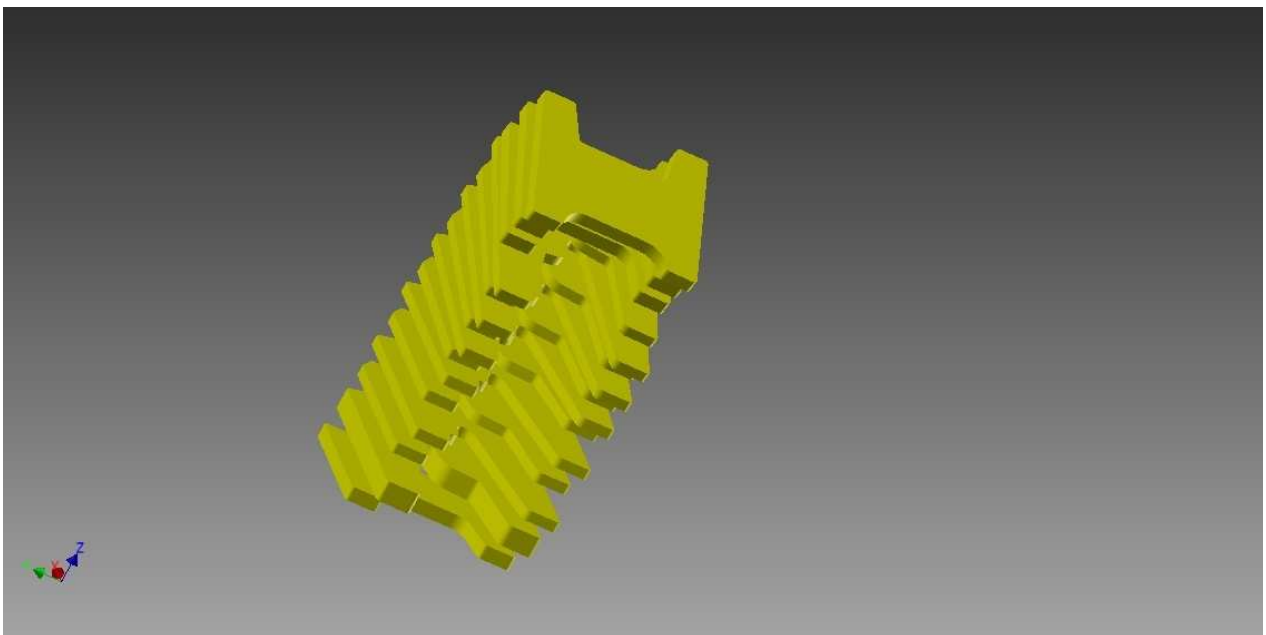
Další částí nákresu modelu v 3D programu Autodesk Inventor Professional 2012 bylo spojení jednotlivých dílů do jednoho pevného modelu.



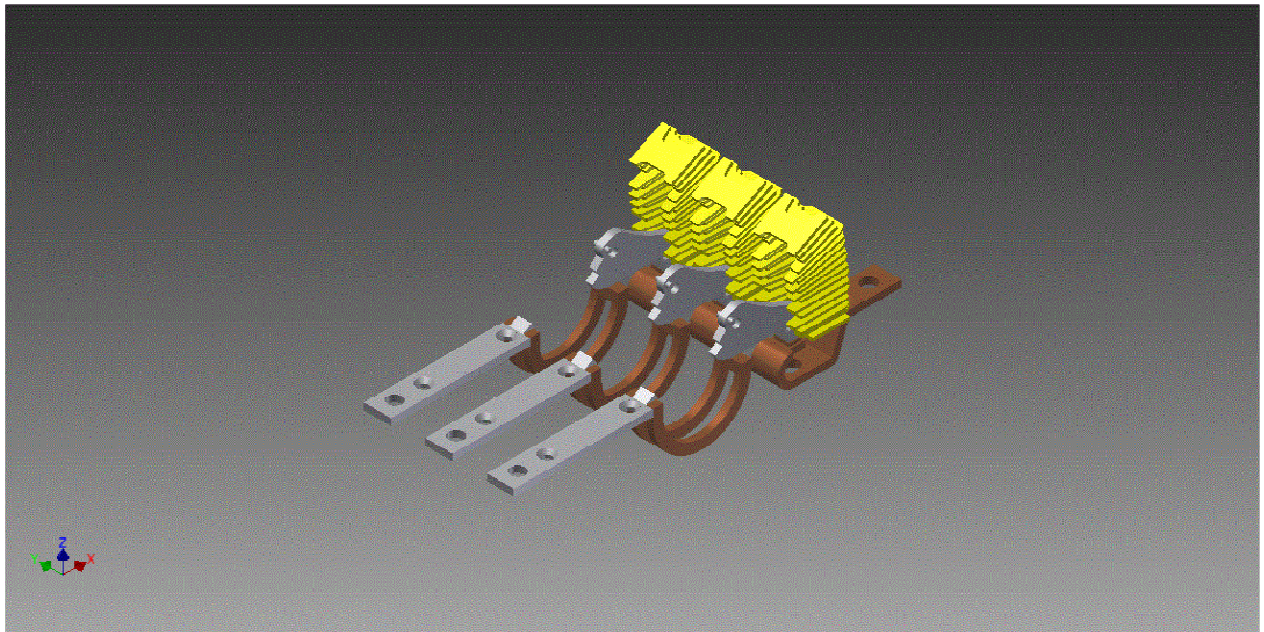
Obrázek 3-6: Kompletní proudovodná dráha jističe



Obrázek 3-7: Jiný pohled na proudovodnou dráhu jističe



Obrázek 3-8: Detail zhášecí komory modelovaného jističe



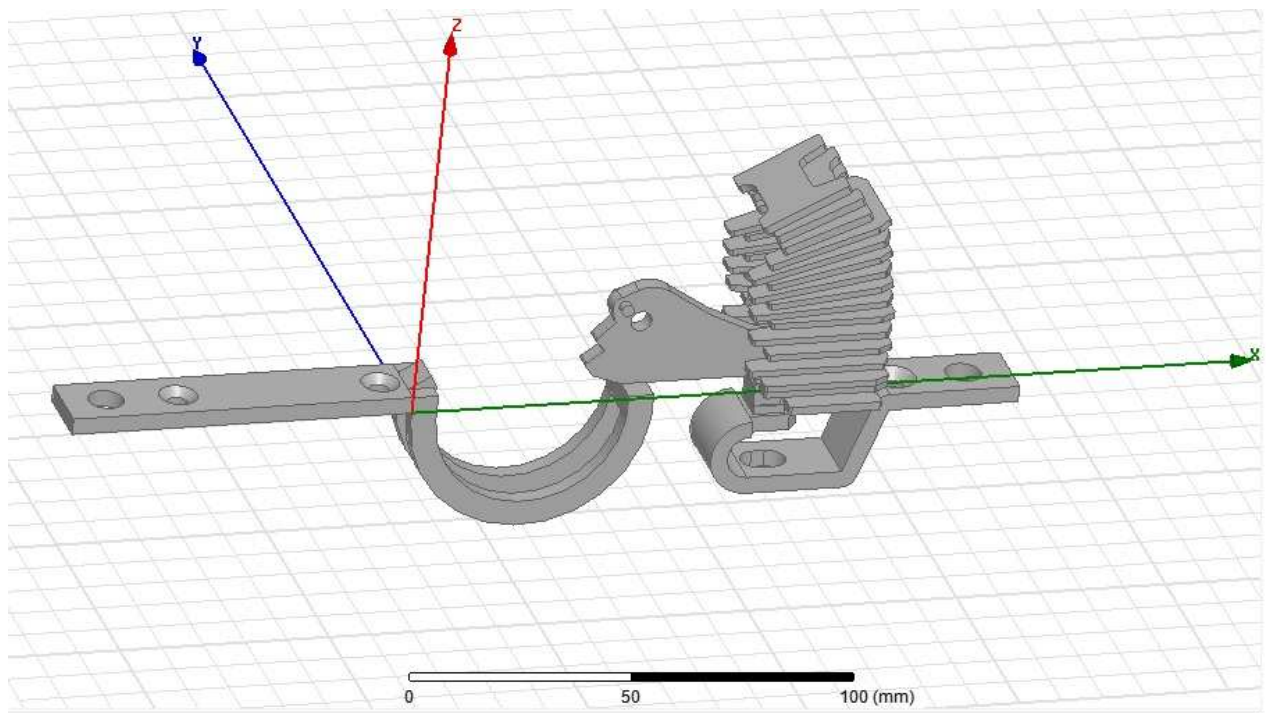
Obrázek 3-9: Kompletní model proudovodné dráhy jističe

4 SIMULACE STAVŮ JISTIČE BD250NE305 V PROGRAMU ANSYS MAXWELL

Dalším úkolem je import vytvořeného modelu proudovodné dráhy jističe do programu ANSYS MAXWELL. V tomto programu přiřadím materiály k jednotlivým částem proudovodné dráhy jističe, nastavím okrajové podmínky a provedu zadané analýzy.

4.1 Import 3D modelu pro program ANSYS MAXWELL

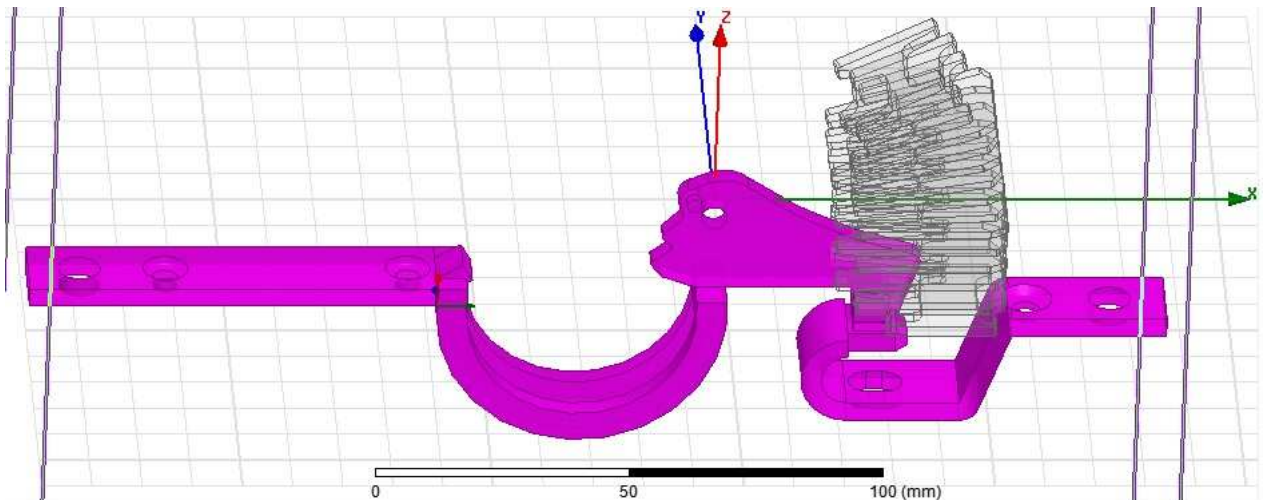
Z programu Inventor Professional 2012 jsem exportoval nakreslený model proudovodné dráhy s příponou .SAT. Následně jsem do programu ANSYS MAXWELL importoval tuto soustavu.



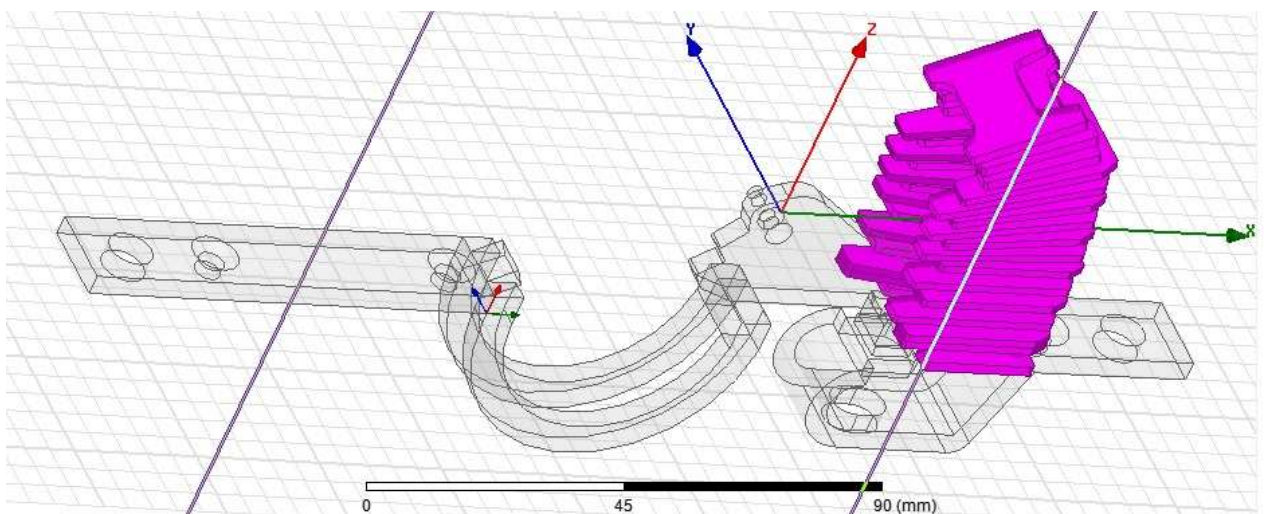
Obrázek 4-1: Model proudovodné dráhy jističe vložený do programu ANSYS MAXWELL

4.2 Přiřazení jednotlivých materiálů

Dalším úkolem bylo přiřadit jednotlivé druhy materiálů všem částem proudovodné dráhy a zhášecí komory. Proudovodné dráze jsem přiřadil materiál měď – cooper. Měděnou proudovodnou dráhu můžeme vidět na následujícím obrázku 4-2. Plechy zhášecí komory jsou v reálném jističi z oceli – steel_1008. Tento materiál jsem jim přiřadil i ve výpočetním programu. Plechy zhášecí komory zobrazuje obrázek 4-3.



Obrázek 4-2: Proudovodná dráha jističe s přiřazeným materiálem - měď

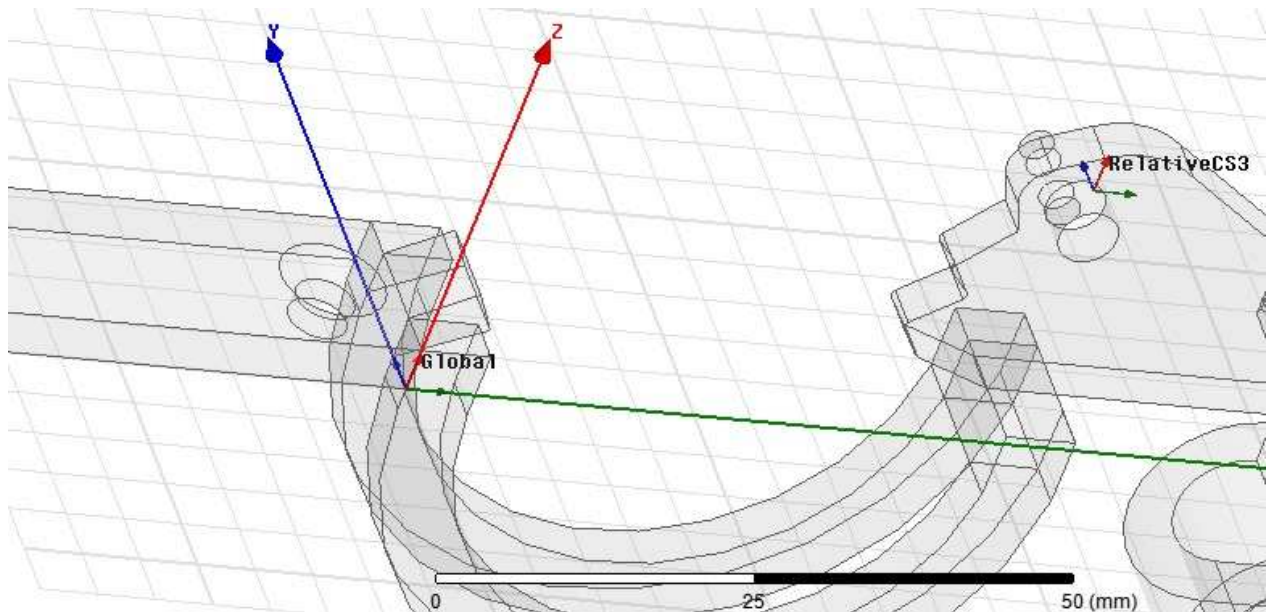


Obrázek 4-3: Plechy zhášecí komory, kterým je přiřazen materiál - ocel

Důležitým krokem bylo také vytvoření okolního prostředí, aby simulace probíhala v reálných podmínkách. Vybral jsem vakuum, jelikož v něm platí téměř shodné podmínky jako ve vzduchovém prostředí. Region jsem nastavil tak, aby vstupní a výstupní hrana proudovodné dráhy byla na jeho začátku.

4.3 Nastavení sekundárního souřadného systému

Posledním krokem nastavení parametrů je vytvoření sekundárního souřadného systému. Ten je nutno umístit do bodu otáčení pohyblivého kontaktu proudovodné dráhy jističe. Globální a sekundární souřadný systém (relative CS3) je znázorněn na následujícím obrázku.

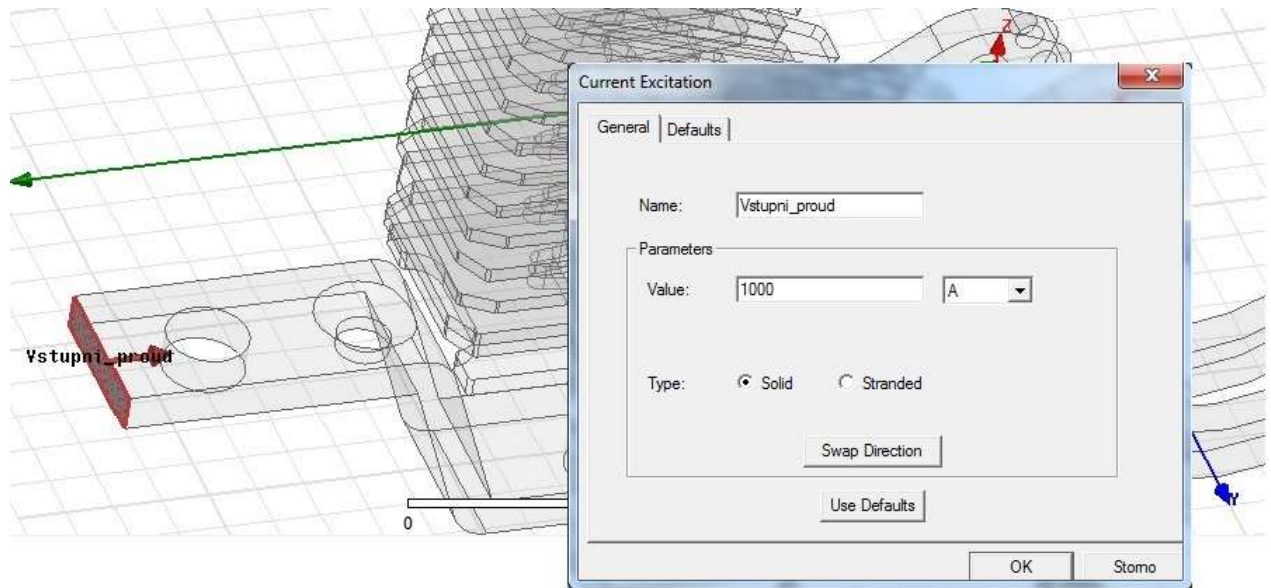


Obrázek 4-4: Globální a sekundární souřadnicový systém

4.4 Nastavení parametrů analýzy a proudu

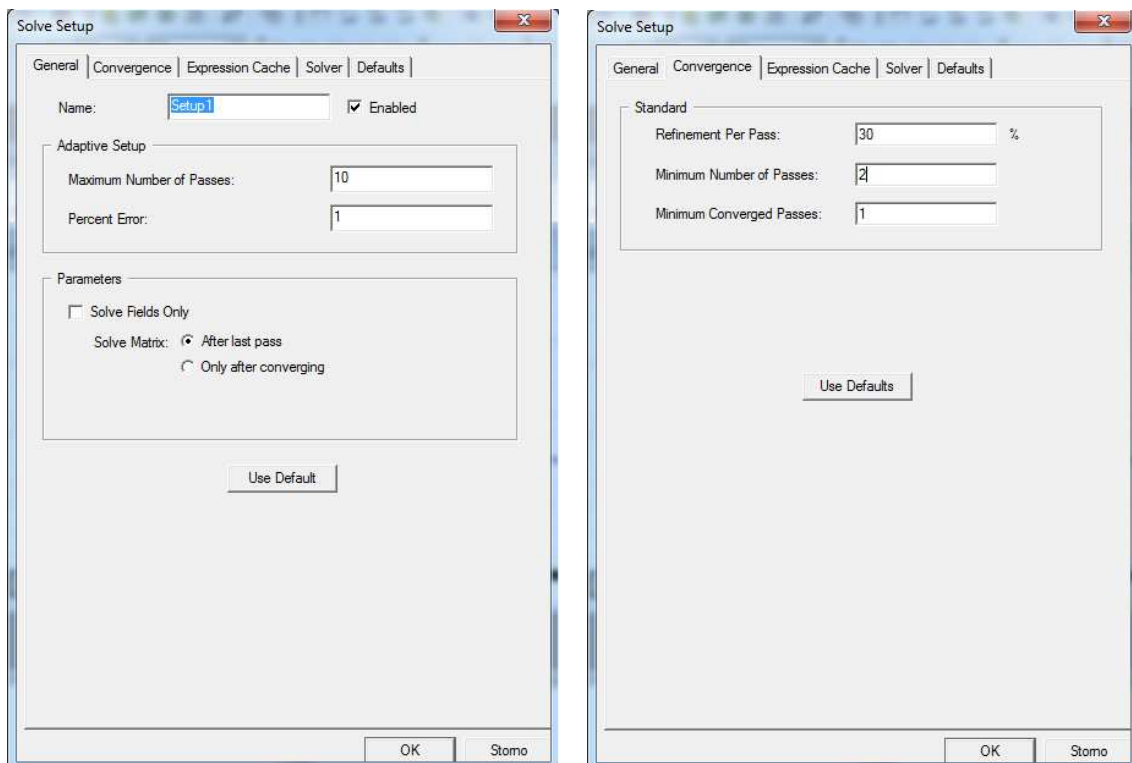
4.4.1 Pro stejnosměrný proud (magnetostatická analýza)

Prvním úkolem je nastavení průchodu stejnosměrného proudu jednou fází jističe. Pro nastavení proudu v modelu je důležité nastavit plochu pro vstup a výstup proudu na hranici prostředí. Nastavení tohoto parametru se provádí v menu Excitations. Nastavení vstupního proudu je na obrázku 4-5. Nastavení výstupního proudu se provede podobným způsobem.

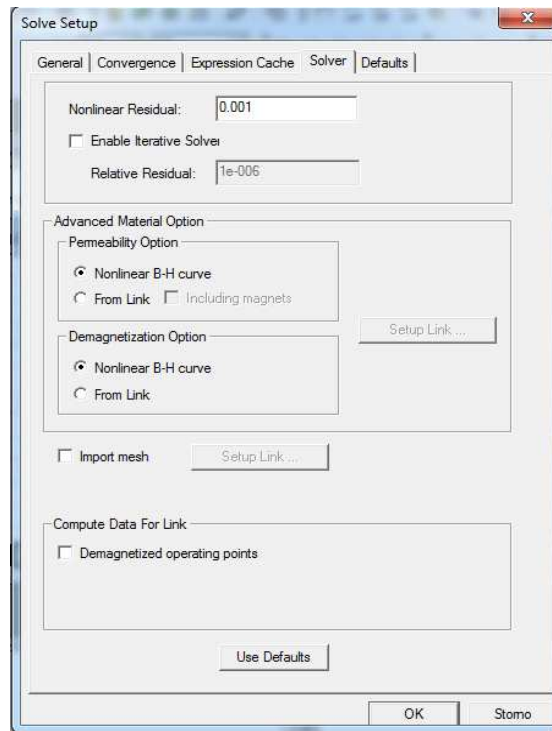


Obrázek 4-5: Nastavení vstupního proudu

Nastavení parametrů analýzy jsem provedl v záložce analysis a v setup1 v záložkách general, convergence a solver. Přesné parametry zobrazují následující obrázky 4-6 a 4-7.



Obrázek 4-6: Nastavení parametrů analýzy pro stejnosměrný proud



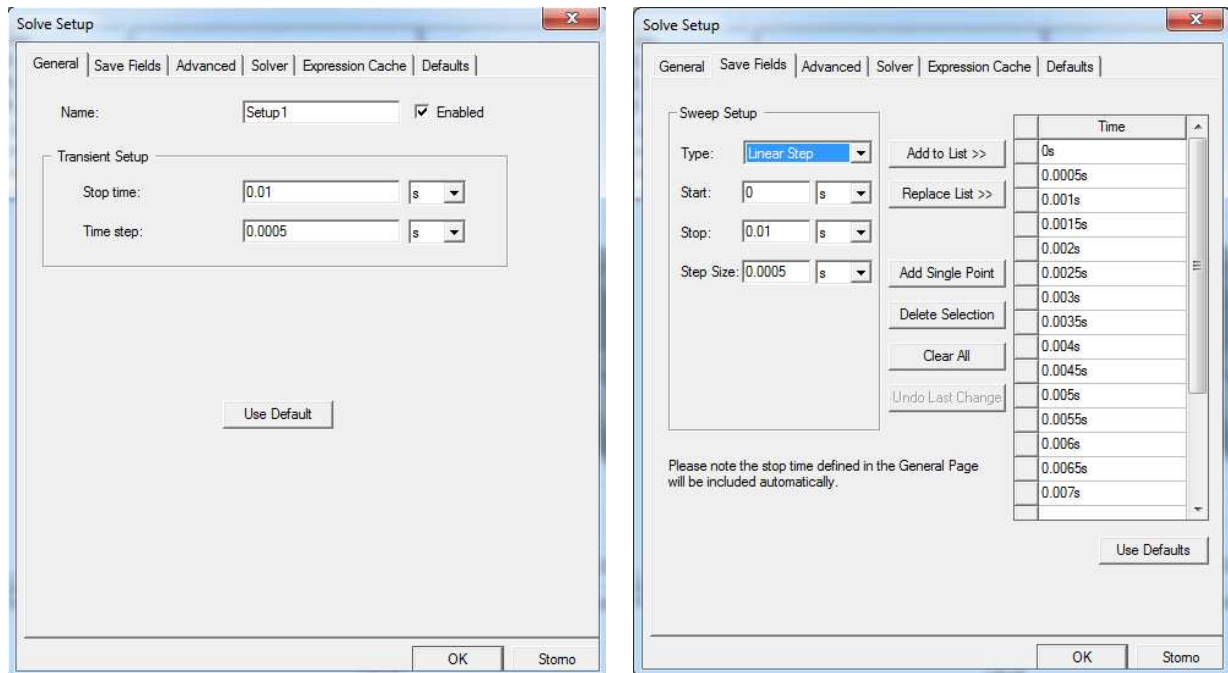
Obrázek 4-7: Nastavení parametrů analýzy pro stejnosměrný proud v kartě Solver

4.4.2 Střídavý sinusový proud (tranzientní analýza)

Je nutno zadat velikost procházejícího střídavého proudu. Pro svůj model jsem zvolil následující velikost

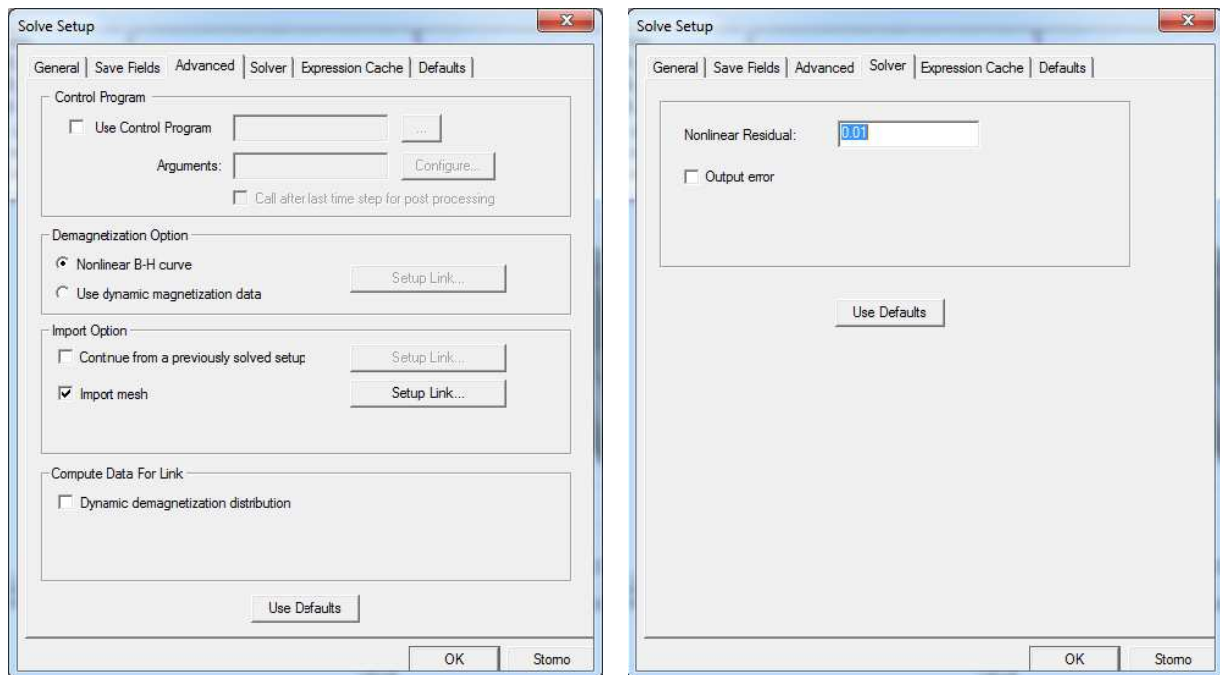
$$10000 * 1.41 * (\sin(314 * \text{TIME})) \quad (4.1)$$

Nastavení parametrů pro tranzientní analýzu spočívalo ve zkopírování parametrů původní magnetostatické analýzy a přidání parametru Winding - vinutí s vloženými Coil Terminal – konce cívek v záložce Excitations. Což je vlastně vyznačení směru průběhu proudu jističem. Nastavení samotných parametrů analýzy je provedeno v záložce Analysis a v menu setup1. V kartě General a Save fields nastavíme parametry zobrazené níže.



Obrázek 4-8: Nastavení parametrů tranzientní analýzy

Dalším nastavením analýzy se zabývají karty Advanced a Solver. Jejich přesné nastavení jsem pro jednoduchost zobrazil na obrázku 4-9.



Obrázek 4-9: Nastavení karty Advanced a Solver

4.4.3 Střídavý nesymetrický proud (tranzientní analýza)

Nastavení proudu pro tuto situaci se může zdát příliš velké. Je důležité vědět, že tento stav slouží k simulaci zkratu. Odtud název exponenciálně klesající proud.

Pro svou simulaci jsem v kartě winding zadal následující velikost proudu

$$10000 * 1.41 * (\sin(314 * \text{TIME} + 3.14/2) - \sin(3.14/2) * \exp(-\text{TIME}/0.0055)) \quad (4.2)$$

Nastavení parametrů pro tento proud, je shodné s nastavením pro sinusový proud. Pouze v záložce General změníme stop time z hodnoty 0,01 na 0,02.

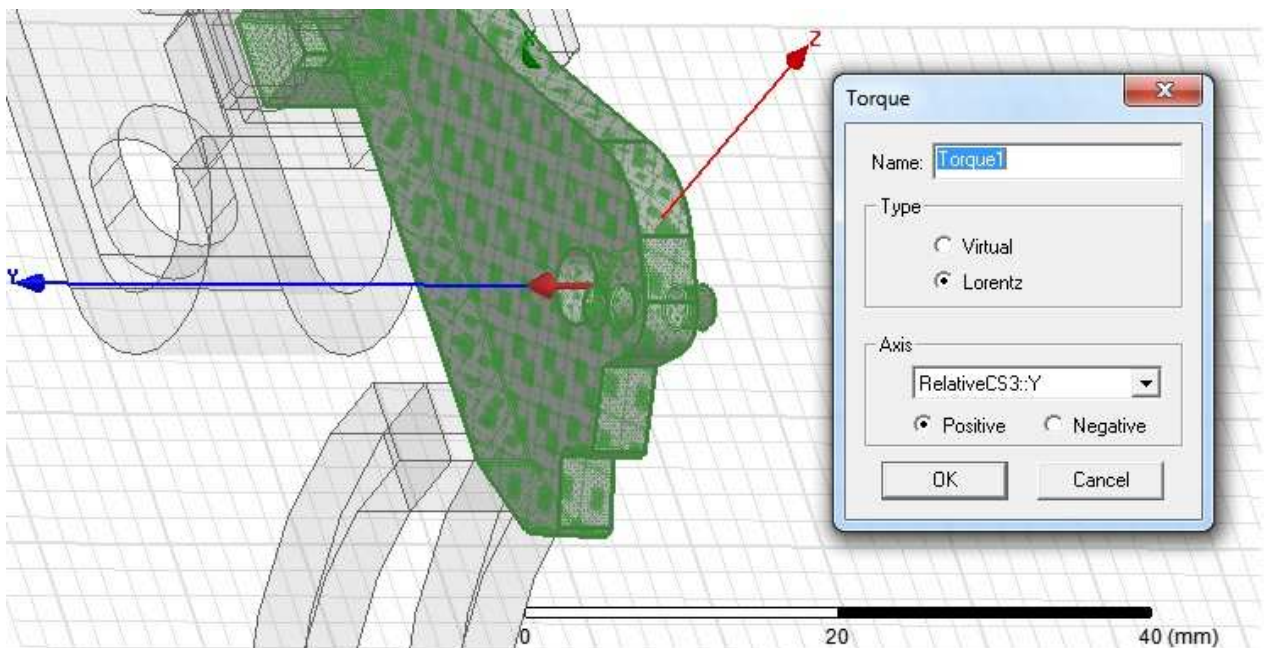
5 MAGNETOSTATICKÁ ANALÝZA

5.1 Simulace v programu Ansys Maxwell

5.1.1 Jednopolový model proudovodné dráhy

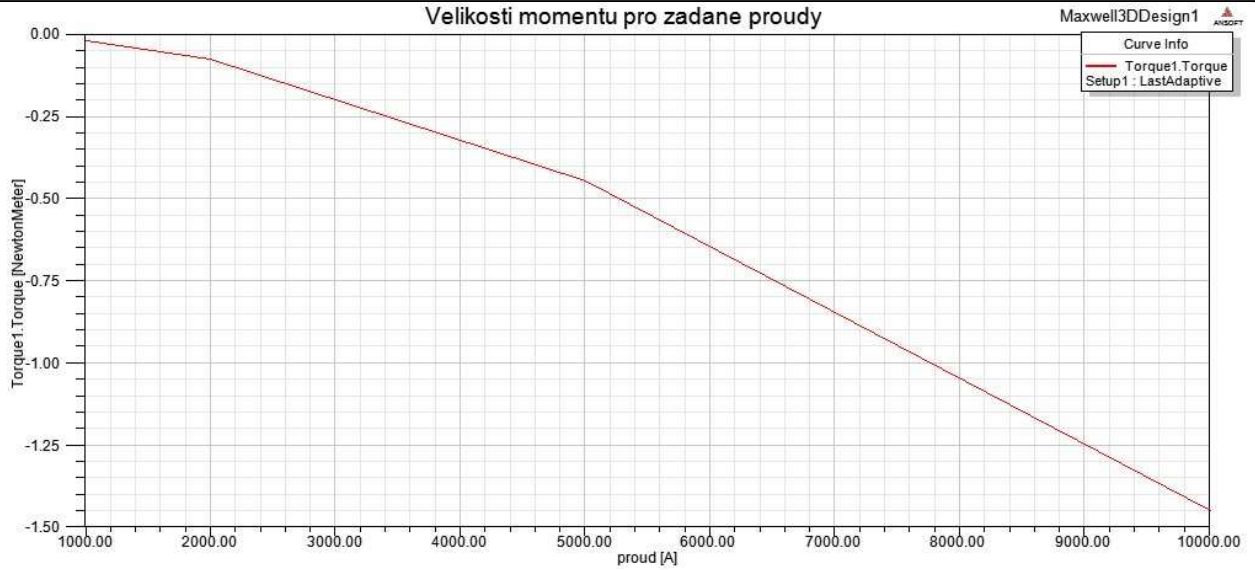
První simulací bylo určení momentu působícího na kontakt jističe. Zvolil jsem hodnoty proudu o velikosti 1 000, 2 000, 5 000 a 10 000 A. Bylo potřeba, v záložce parameters, vytvořit parametr Torque - moment. Pro výpočet jsem použil Lorentzovu sílu (type Lorentz).

Vytvoření těchto parametrů znázorňuje následující obrázek 5-1.

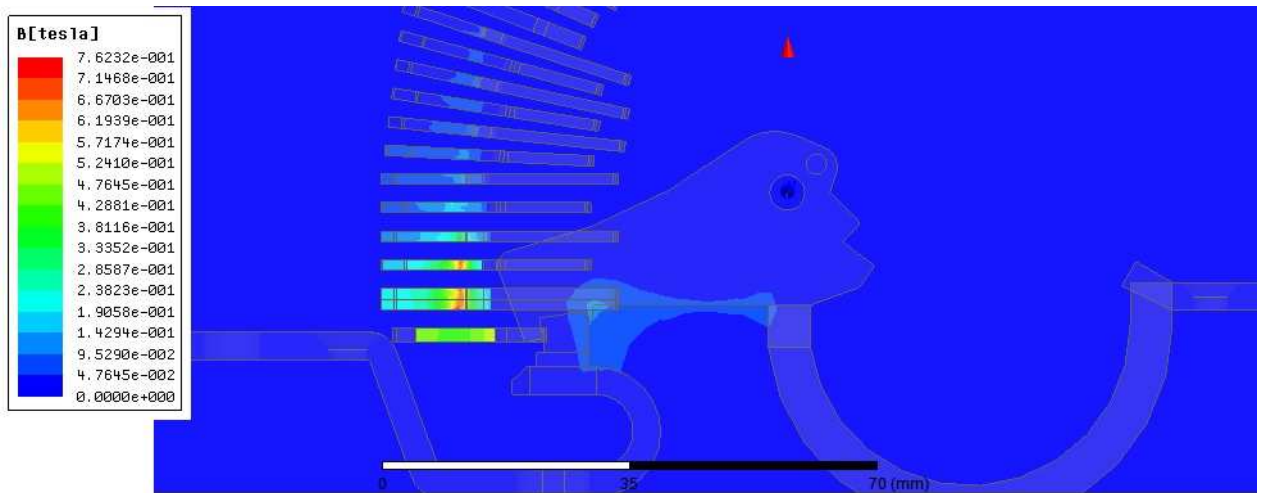


Obrázek 5-1: Zadání parametru moment (Torque)

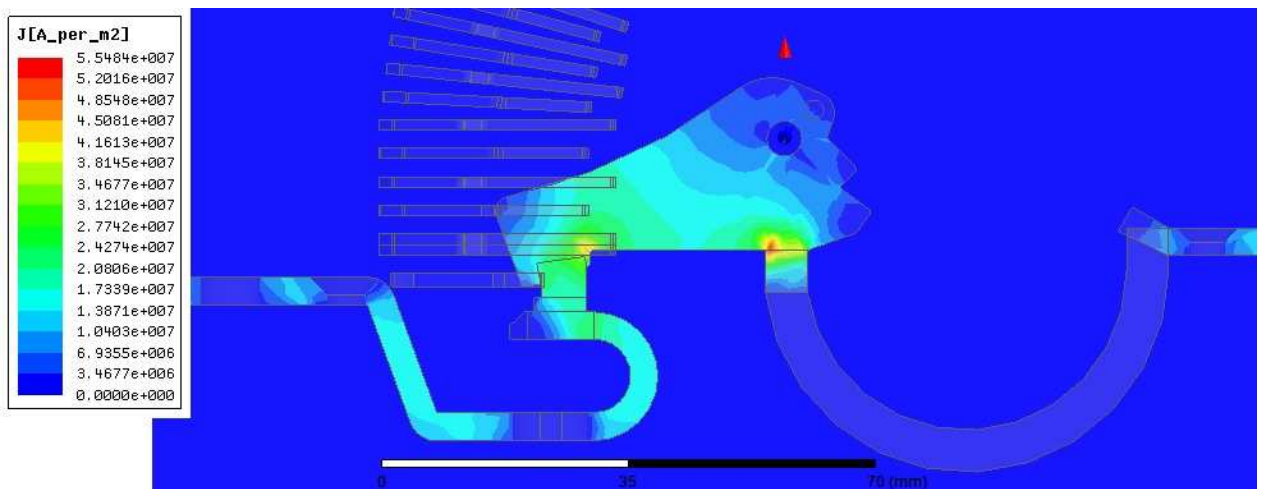
Po zadání momentu jsem spustil analýzu pro jednotlivé proudy. Výsledný graf momentu působícího na pohyblivý kontakt je na následujícím grafu 5-1. Pro přehlednost a bližší ponoření do výsledků jsem připojit i rozložení magnetické indukce a proudovou hustotu v proudovodné dráze jističe. Rozložení magnetické indukce si můžeme prohlédnout na obrázku 5-2. Následující obrázek 5-3 znázorňuje rozložení proudové hustoty v proudovodné dráze jističe.



Graf 5-1: Velikosti momentu pro zadané proudy



Obrázek 5-2: Rozložení magnetické indukce v proudovodné dráze jističe



Obrázek 5-3: Rozložení proudové hustoty v proudovodné dráze jističe

5.2 Ruční výpočet síly v kontaktní úžině

5.2.1 Magnetostatická analýza, jednopólový model

Dalším úkolem mé diplomové práce bylo teoreticky dopočítat sílu v kontaktní úžině jističe. Kontaktní úžinou se rozumí styková plocha mezi pevným a pohyblivým pólem jističe. Při výpočtu vycházíme ze základního vzorce

$$F = \frac{M}{l} [N] \quad (5.1)$$

F celková síla, která působí na kontakt (nutno rozložit na sílu ve směru osy X a osy Z)

M moment vypočtený simulačním programem

l délka ramene pohyblivého kontaktu jističe

$$F_X = \sin\alpha * F [N] \quad (5.2)$$

$$F_Z = \cos\alpha * F [N] \quad (5.3)$$

F_X síla působící ve směru osy X

F_Z síla působící ve směru osy Z

Při svém výpočtu budu uvažovat sepnutý kontakt proudovodné dráhy jističe. Z modelu jsem odečetl úhel 13,5°.

Důležitým vztahem pro výpočet síly v kontaktní úžině je

$$F_U = I^2 * \ln \frac{D}{d} * 10^{-7} [N] \quad (5.4)$$

F_U síla v kontaktní úžině

I proud vypočtený simulačním programem

D průměr kontaktu

d náhradní průměr plochy kontaktu

$$D = \sqrt{a * b} = \sqrt{5 * 7} = 5,916 \text{ mm}^2 \quad (5.5)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 * F_P}{\pi * H_B}} = \sqrt{\frac{4 * 18}{\pi * 410}} = 0,236 \text{ mm}^2 \quad (5.6)$$

F_P síla působící na kontakt (zadáno 18)

H_B tvrdost podle Brinella (zadáno 410)

Nyní můžeme spočítat naši požadovanou sílu v kontaktní úžině. Výpočet provádím pro zadané proudy 1, 2, 5 a 10 kA

Příklad výpočtu pro proud 1 kA.

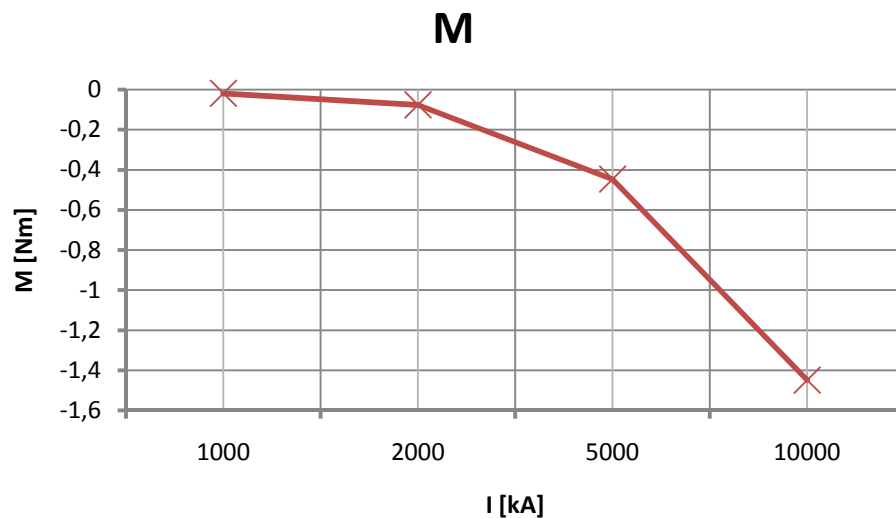
$$F_U = I^2 * \ln \frac{D}{d} * 10^{-7} = 1000^2 * \ln \frac{5,916}{0,236} * 10^{-7} = 0,321 \text{ N} \quad (5.7)$$

Dalším krokem je výpočet síly F

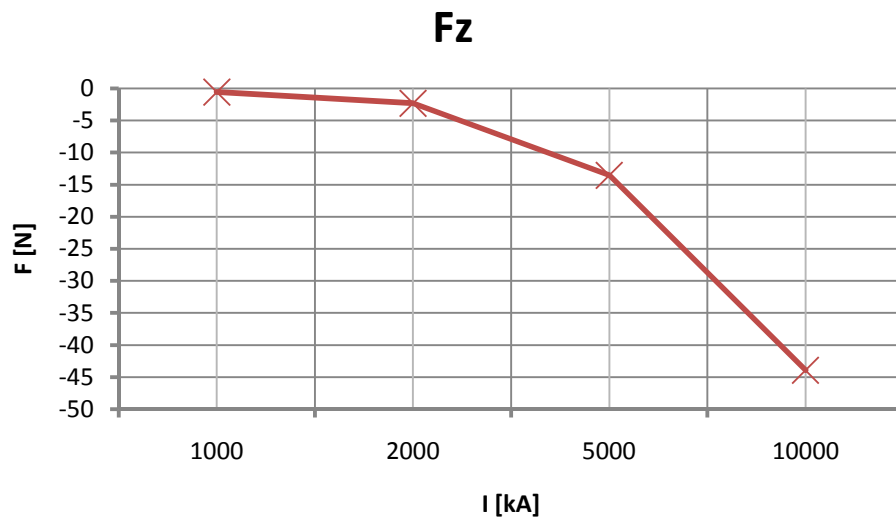
$$F = \frac{M}{l} = \frac{-0,019}{35 * 10^{-3}} = -0,581 \text{ N} \quad (5.8)$$

Tabulka 5-1: Výsledky výpočtu jednopólové Magnetostatické analýzy

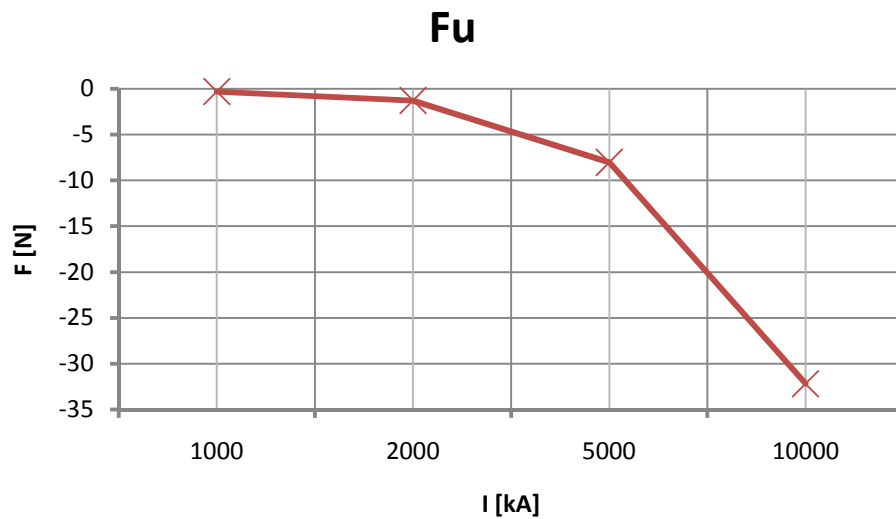
I [A]	M [NM]	FZ [N]	FU [N]
1000	-0,01919378	-0,58163	-0,32198
2000	-0,07658712	-2,32082	-1,28791
5000	-0,4473701	-13,5567	-8,04946
10000	-1,449596	-43,9272	-32,1978



Graf 5-2: Průběh momentu působícího na kontakt, Magnetostatická analýza pro jednopólový model



Graf 5-3: Průběh síly F_z , Magnetostatická analýza pro jednopólový model



Graf 5-4: Průběh síly F_u , Magnetostatická analýza pro jednopólový model

5.3 Výsledná síla

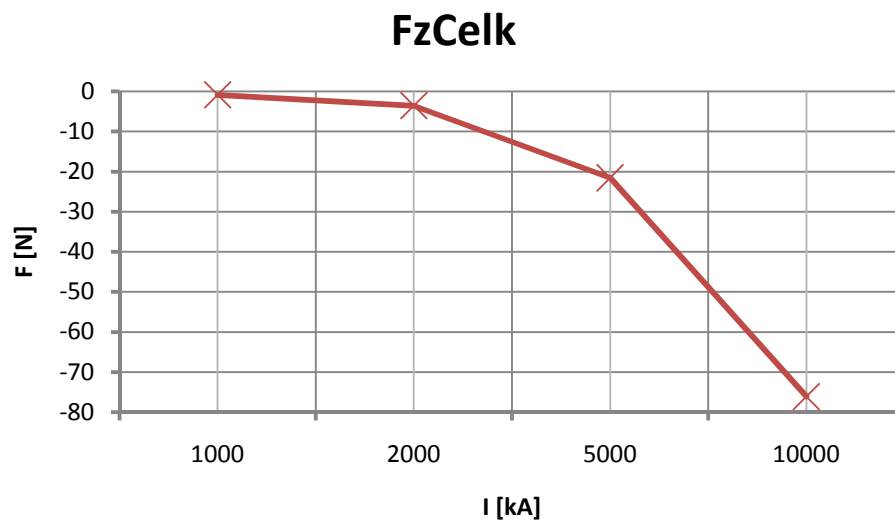
5.3.1 Magnetostatická analýza, jednopólový model

Výsledná síla, která působí ve směru osy Z, se vypočte jako součet síly F a síly v kontaktní úžině F_U .

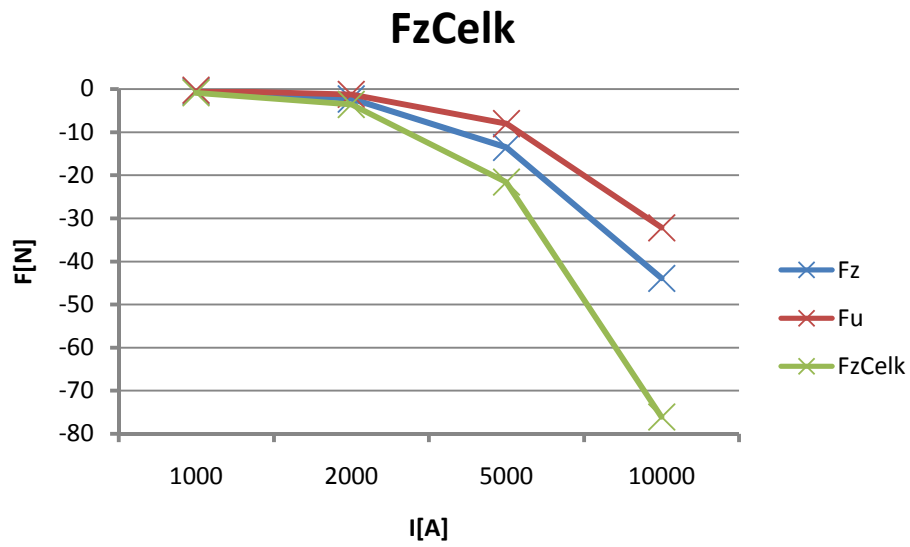
$$F_{Z\text{ celk}} = F_Z + F_U = -0,581 + (-0,321) = -0,903 \text{ N} \quad (5.7)$$

Tabulka 5-2: Výsledná síla působící na kontakt jističe, Magnetostatická analýza pro jednopólový model

$F_{Z\text{CEKL}} [\text{N}]$
-0,9036081
-3,6087356
-21,606131
-76,124996



Graf 5-5: Průběh výsledné síly $F_{z\text{Celk}}$, Magnetostatická analýza pro jednopólový model



Graf 5-6: Znáznornění všech sil působících na kontakt, Magnetostatická analýza pro jednopólový model

6 TRANZIENTNÍ ANALÝZA

6.1 Simulace v programu Ansys Maxwell

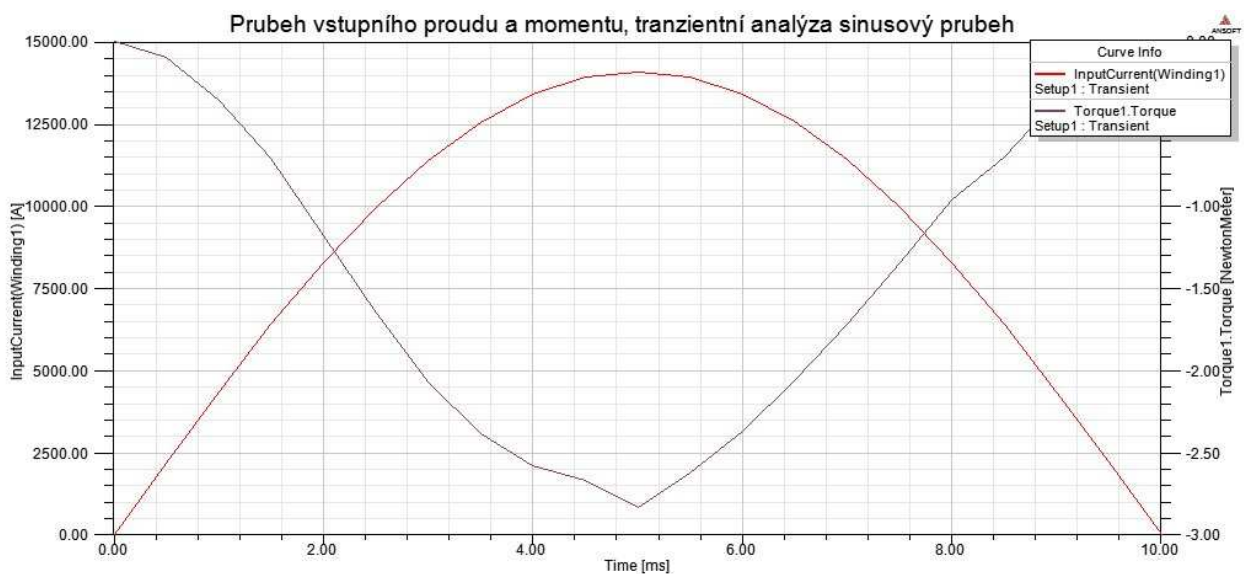
6.1.1 Jednopolový model proudovodné dráhy, sinusový průběh

Jak již z názvu vyplývá, jedná se o časovou analýzu. Dle zadání je nutno tuto analýzu provést pro sinusový průběh a pro nesymetrický průběh. Jako první jsem simuloval sinusový stav. Svou roli hraje u této analýzy také skin efekt (povrchový jev).

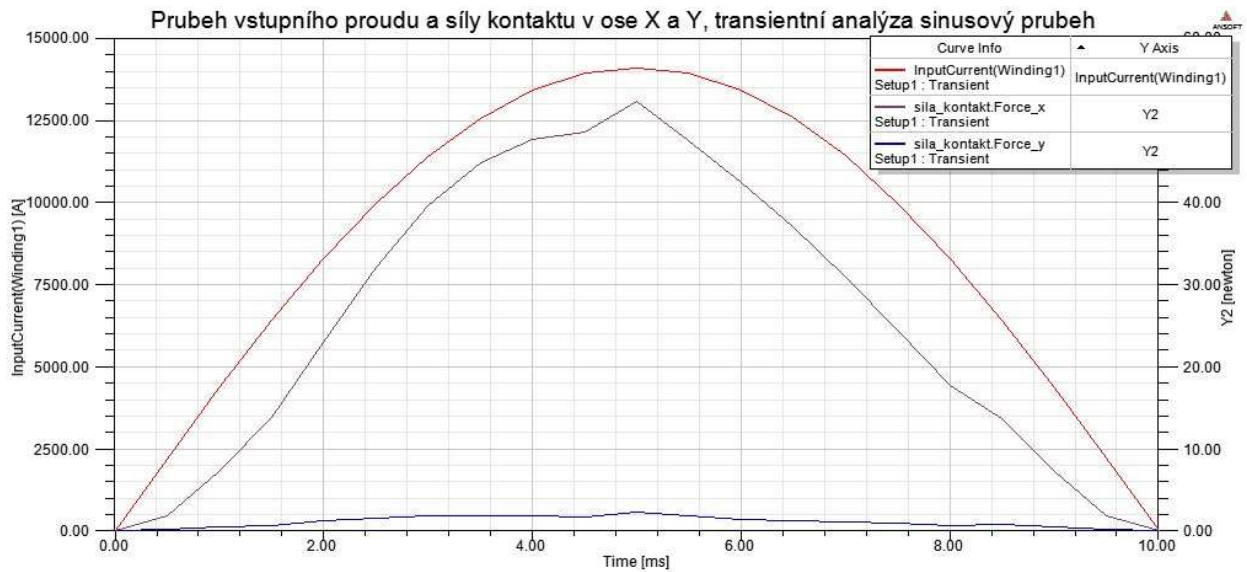
Skin efekt je fyzikální děj, při kterém dochází k vytlačování elektrického proudu k povrchu vodiče. Elektrický střídavý proud procházející vodičem uzavírá kolem sebe siločáry magnetického (indukčního) toku (též toku magnetické indukce). Část tohoto toku prochází i tím samým vodičem a indukuje v něm uzavřené vířivé proudy. Tyto vířivé proudy mají blíže ke středu vodiče opačný směr než původní elektrický proud a odečítají se od něj, kdežto blíže k povrchu jsou směry souhlasné a proudy se sčítají.

K povrchovému jevu nedochází při průchodu stejnosměrného proudu vodičem. Při frekvenci 50 Hz používané v síťových rozvodech je obvykle zanedbatelný.

Výsledky tranzientní analýzy pro sinusový průběh znázorňují Grafy 6-1 a 6-2.



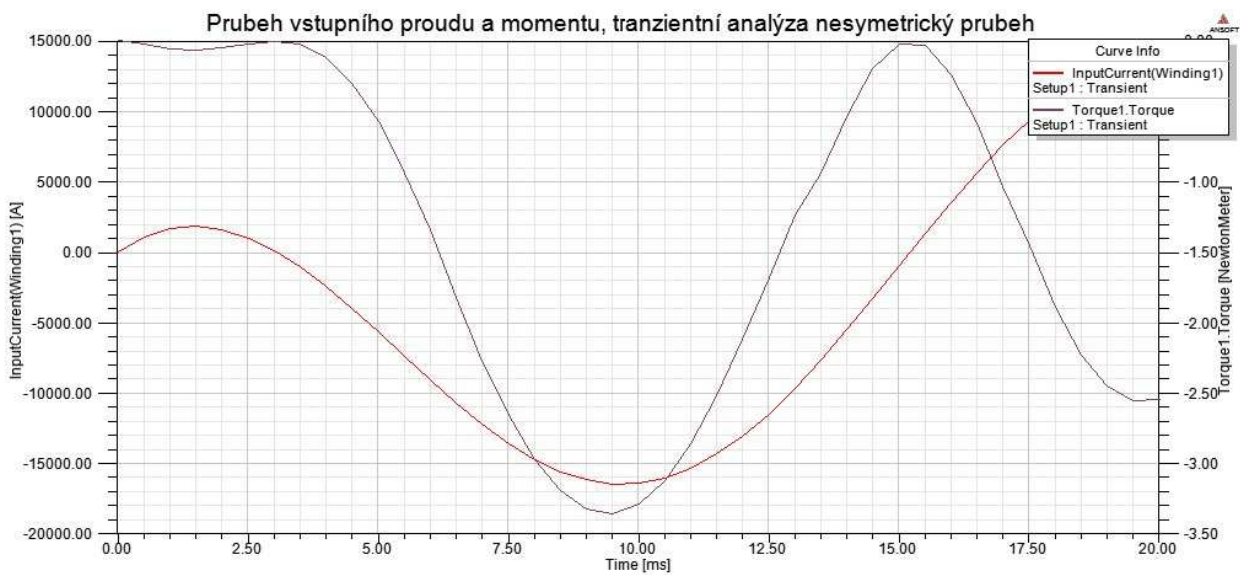
Graf 6-1: Průběh vstupního proudu a momentu, tranzientní analýza sinusový průběh



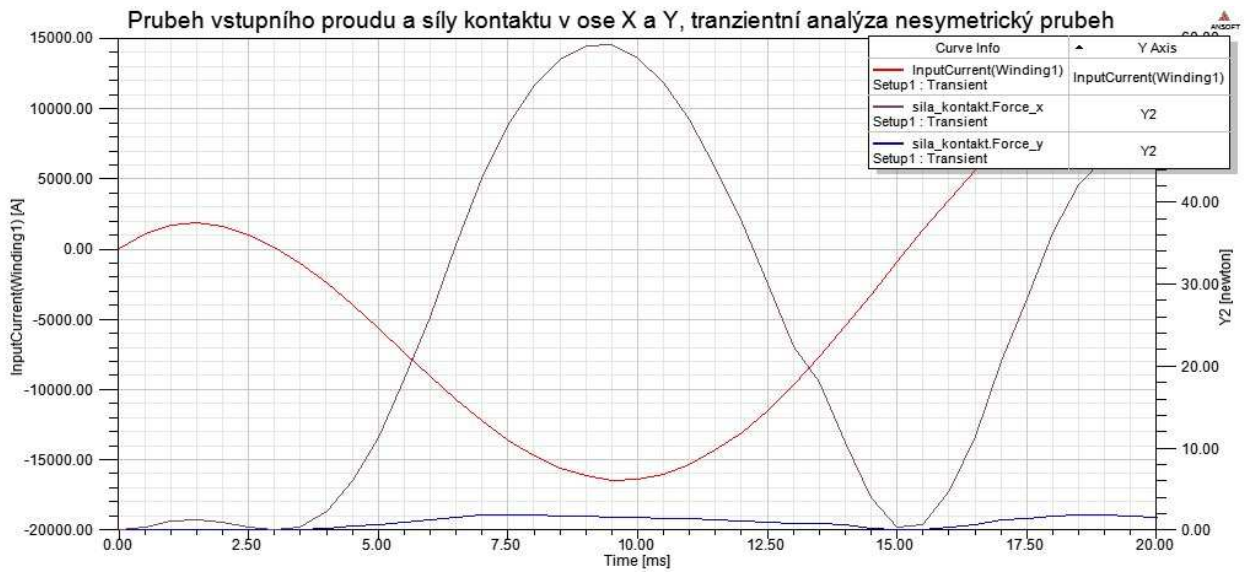
Graf 6-2: Průběh vstupního proudu a síly kontaktu v ose X a Y, transientní analýza sinusový průběh

6.1.2 Jednopolový model proudovodné dráhy, nesymetrický průběh

Druhým úkolem bylo simulovat stav při průchodu nesymetrického střídavého proudu.



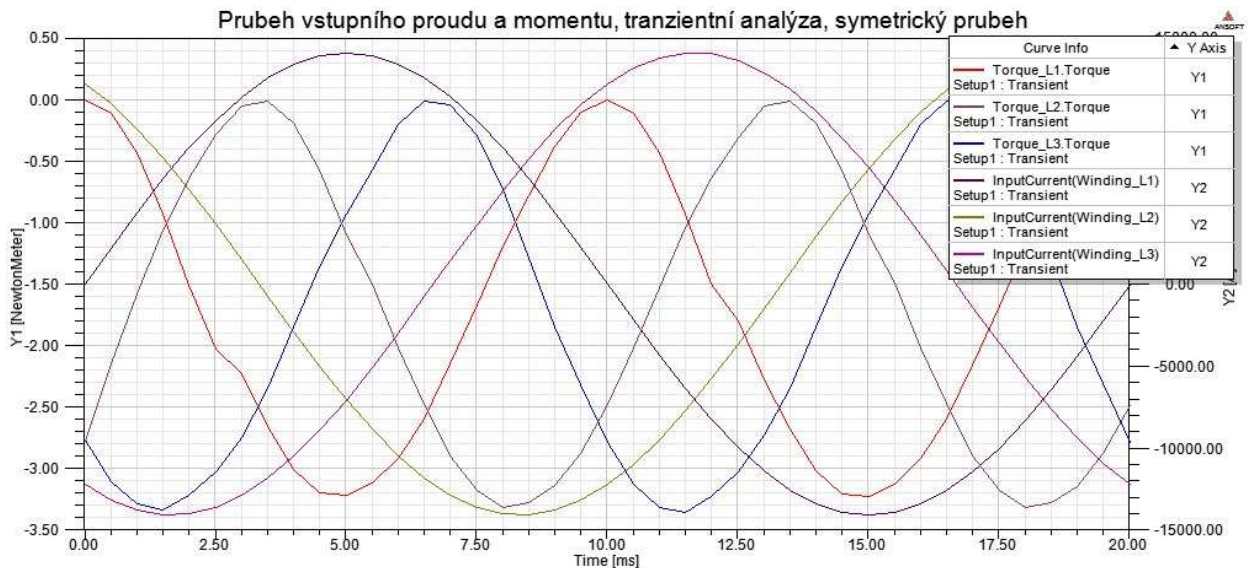
Graf 6-3: Průběh vstupního proudu a momentu, transientní analýza nesymetrický průběh



Graf 6-4: Průběh vstupního proudu a síly kontaktu v ose X a Y, tranzientní analýza nesymetrický průběh

6.1.3 Třípólový model proudovodné dráhy, sinusový průběh

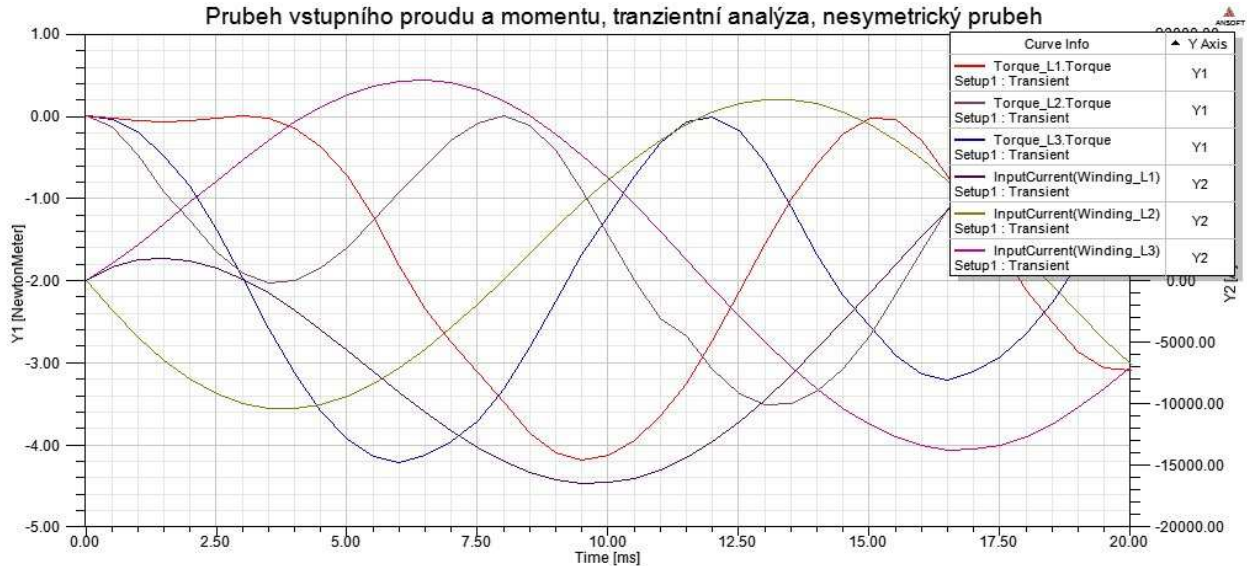
Dalším úkolem bylo simulovat průběh v kompletním třípólovém jističi.



Graf 6-5: Průběh vstupních proudů a momentů, tranzientní analýza, symetrický průběh

6.1.4 Třífázový model proudovodné dráhy, nesymetrický průběh

A to samé bylo nutno provést pro nesymetrický průběh proudu.



Graf 6-6: Průběhy vstupních proudů a momentů, tranzientní analýza, nesymetrický průběh

6.2 Ruční výpočet síly v kontaktní úžině

Výpočet vychází ze stejných předpokladů, jako při výpočtu v Magnetostatické analýze, pouze pro třífázový model musíme spočítat síly pro každou fázi zvlášť.

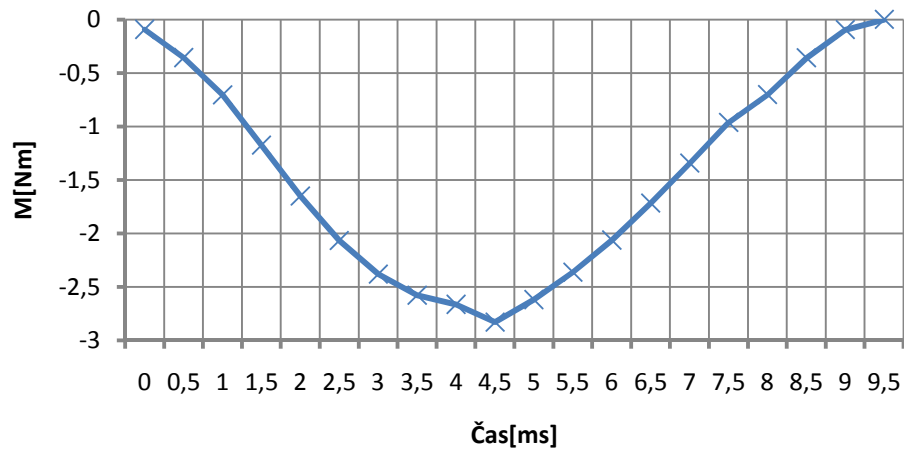
6.2.1 Jednopolový model proudovodné dráhy, sinusový průběh

Tabulka 6-1: Výsledky výpočtu Tranzientní analýza pro jednopolový sinusový průběh

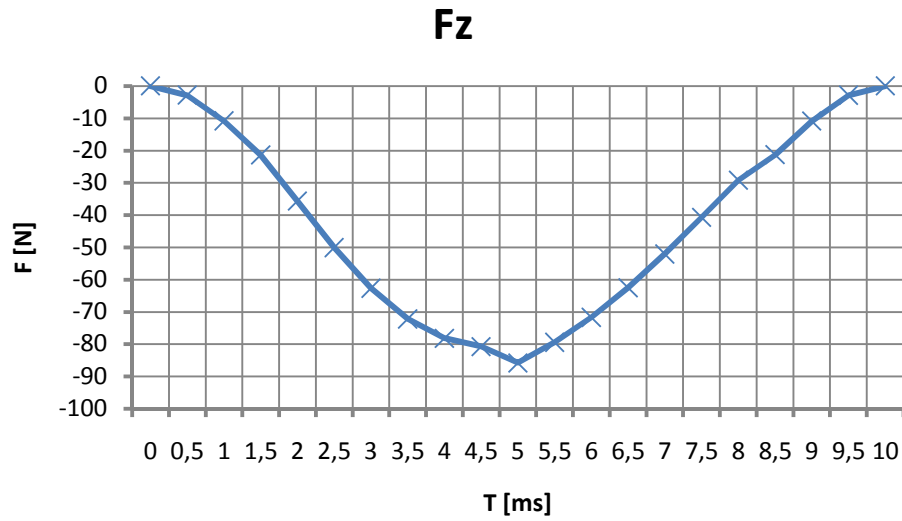
T [MS]	I [A]	M [NM]	FZ [N]	FU [N]
0	0	0	0	0
0,5	2204,62000	-0,09405	-2,84998	-1,56493
1	4355,00000	-0,35761	-10,83658	-6,10665
1,5	6398,26000	-0,70513	-21,36761	-13,18107
2	8284,14000	-1,17611	-35,63970	-22,09641
2,5	9966,24000	-1,65212	-50,06424	-31,98081
3	11403,20000	-2,06799	-62,66636	-41,86781
3,5	12559,60000	-2,38145	-72,16515	-50,79002
4	13407,10000	-2,57881	-78,14576	-57,87573
4,5	13924,80000	-2,66439	-80,73909	-62,43164
5	14100,00000	-2,83038	-85,76909	-64,01254

5,5	13928,30000	-2,61970	-79,38485	-62,46303
6	13414,10000	-2,36454	-71,65273	-57,93618
6,5	12569,80000	-2,06308	-62,51758	-50,87255
7	11416,40000	-1,71790	-52,05758	-41,96480
7,5	9982,11000	-1,34359	-40,71485	-32,08274
8	8302,30000	-0,96313	-29,18582	-22,19339
8,5	6418,27000	-0,70276	-21,29573	-13,26364
9	4376,36000	-0,35881	-10,87300	-6,16670
9,5	2226,79000	-0,09565	-2,89840	-1,59656
10	22,45640	-0,00001	-0,00030	-0,00016

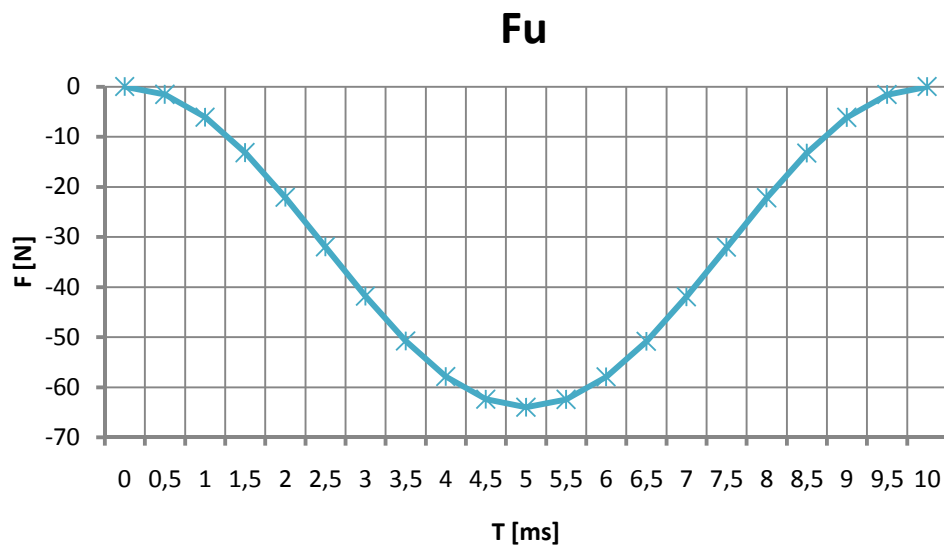
M



Graf 6-7: Průběh momentu působícího na kontakt jističe, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh



Graf 6-8: Průběh síly ve směru osy Z, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh



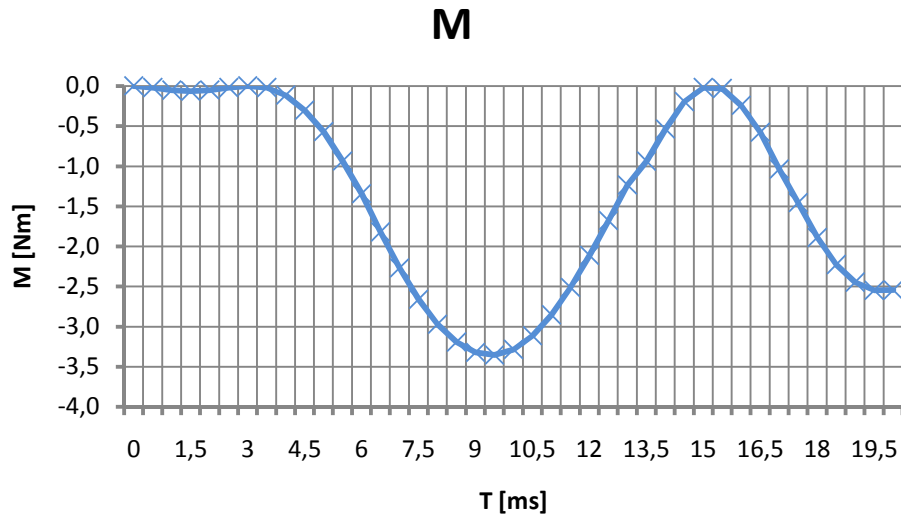
Graf 6-9: Průběh síly v kontaktní úžině, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh

6.2.2 Jednopolový model proudovodné dráhy, nesymetrický průběh

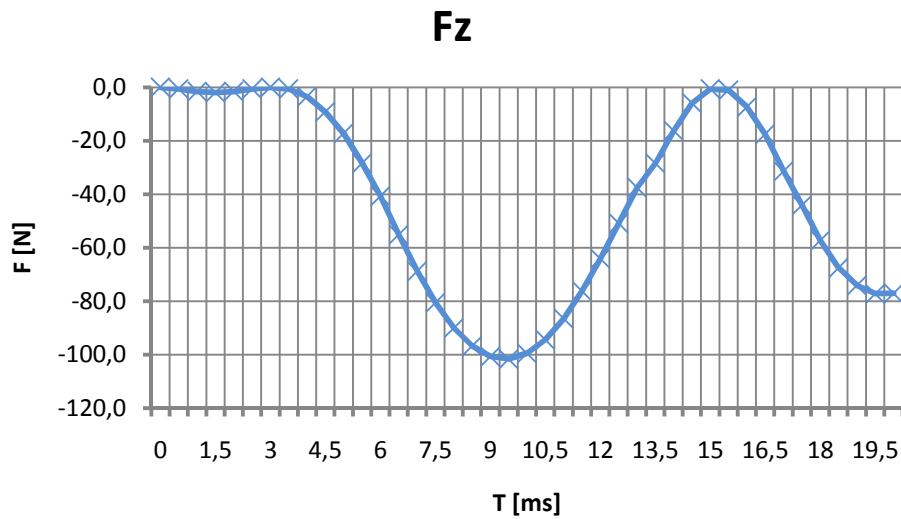
Tabulka 6-2: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopolový průběh

T [MS]	I [A]	M [NM]	F _Z [N]	F _U [N]	F ₂ CELK [N]
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,5	1053,620	-0,021	-0,651	-0,357	1053,620
1	1658,140	-0,053	-1,614	-0,885	1658,140
1,5	1835,480	-0,065	-1,976	-1,085	1835,480
2	1614,850	-0,050	-1,530	-0,840	1614,850
2,5	1032,330	-0,021	-0,624	-0,343	1032,330
3	130,248	0,000	-0,010	-0,005	130,248
3,5	-1043,640	-0,021	-0,638	-0,351	-1043,640
4	-2437,110	-0,115	-3,484	-1,912	-2437,110
4,5	-3994,590	-0,303	-9,184	-5,138	-3994,590
5	-5658,300	-0,569	-17,234	-10,309	-5658,300
5,5	-7369,530	-0,938	-28,429	-17,487	-7369,530
6	-9069,980	-1,344	-40,721	-26,487	-9069,980
6,5	-10703,000	-1,820	-55,164	-36,884	-10703,000
7	-12214,900	-2,271	-68,827	-48,040	-12214,900
7,5	-13556,100	-2,661	-80,641	-59,169	-13556,100
8	-14682,400	-2,971	-90,043	-69,410	-14682,400
8,5	-15555,700	-3,194	-96,789	-77,912	-15555,700
9	-16145,200	-3,323	-100,710	-83,929	-16145,200
9,5	-16427,800	-3,355	-101,660	-86,893	-16427,800
10	-16388,700	-3,285	-99,554	-86,480	-16388,700
10,5	-16021,600	-3,116	-94,429	-82,649	-16021,600
11	-15329,200	-2,855	-86,503	-75,660	-15329,200
11,5	-14322,400	-2,514	-76,189	-66,048	-14322,400
12	-13020,500	-2,115	-64,078	-54,586	-13020,500
12,5	-11450,700	-1,680	-50,904	-42,217	-11450,700
13	-9646,930	-1,238	-37,504	-29,964	-9646,930
13,5	-7649,480	-0,939	-28,444	-18,840	-7649,480
14	-5503,670	-0,537	-16,282	-9,753	-5503,670
14,5	-3258,830	-0,198	-5,985	-3,419	-3258,830
15	-967,016	-0,018	-0,550	-0,301	-967,016
15,5	1318,270	-0,034	-1,019	-0,560	1318,270
16	3543,460	-0,243	-7,349	-4,043	3543,460
16,5	5656,210	-0,578	-17,523	-10,301	5656,210
17	7606,760	-1,038	-31,440	-18,631	7606,760
17,5	9349,120	-1,457	-44,155	-28,143	9349,120
18	10842,300	-1,891	-57,299	-37,850	10842,300
18,5	12051,200	-2,229	-67,532	-46,761	12051,200

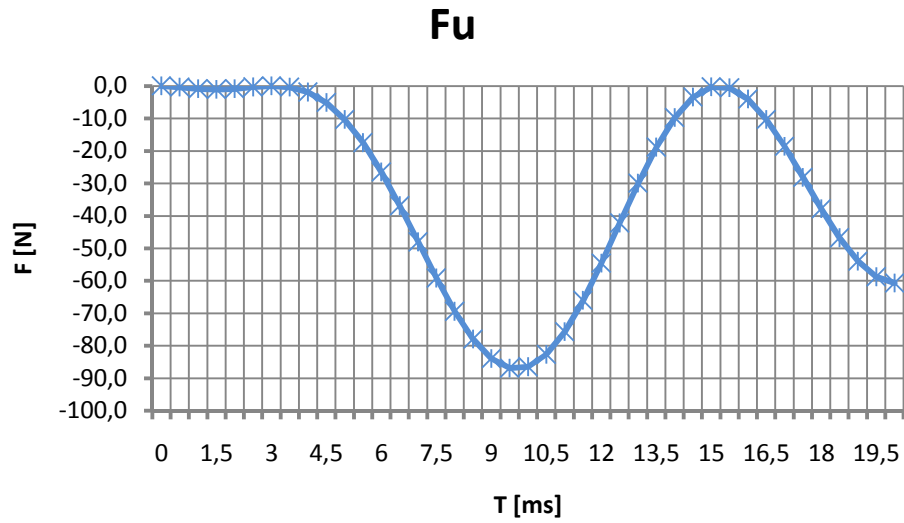
19	12947,600	-2,448	-74,171	-53,977	12947,600
19,5	13510,800	-2,550	-77,262	-58,774	13510,800
20	13728,400	-2,544	-77,105	-60,683	13728,400



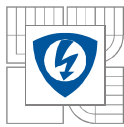
Graf 6-10: Průběh momentu, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh



Graf 6-11: Průběh síly ve směru osy Z, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh



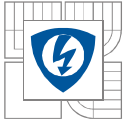
Graf 6-12: Průběh síly v kontaktní úžině, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednofázový průběh



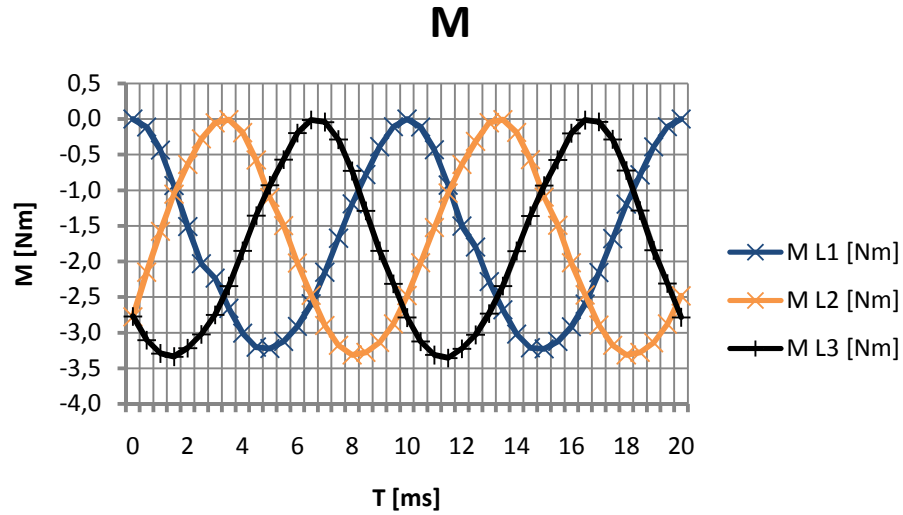
6.2.3 Třípólový model proudovodné dráhy, sinusový průběh

Tabulka 6-3: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh

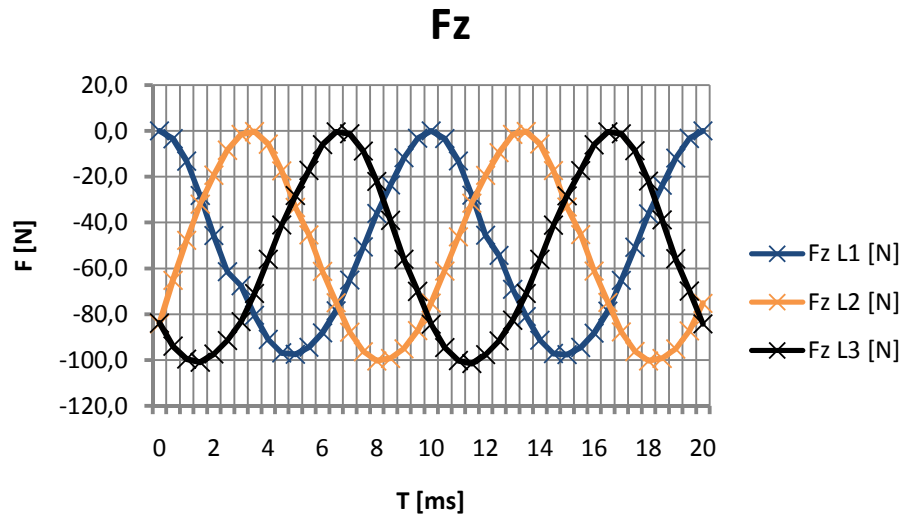
T [MS]	I L1 [A]	I L2 [A]	I L3 [A]	M L1 [NM]	M L2 [NM]	M L3 [NM]	FZ L1 [N]	FZ L2 [N]	FZ L3 [N]	FU L1 [N]	FU L2 [N]	FU L3 [N]
0	0,0	12218,4	-12196,0	0,0	-2,8	-2,8	0,0	-84,2	-84,0	0,0	-48,1	-47,9
0,5	2204,6	10967,9	-13152,3	-0,1	-2,2	-3,1	-3,4	-65,2	-94,1	-1,6	-38,7	-55,7
1	4355,0	9447,5	-13785,2	-0,4	-1,6	-3,3	-13,2	-47,8	-99,7	-6,1	-28,7	-61,2
1,5	6398,3	7694,8	-14078,9	-0,9	-1,1	-3,3	-28,3	-32,0	-101,1	-13,2	-19,1	-63,8
2	8284,1	5752,8	-14026,3	-1,5	-0,6	-3,2	-45,7	-19,4	-97,4	-22,1	-10,7	-63,3
2,5	9966,2	3669,2	-13628,7	-2,0	-0,3	-3,0	-61,5	-8,5	-91,6	-32,0	-4,3	-59,8
3	11403,2	1495,4	-12895,9	-2,2	-0,1	-2,7	-67,6	-1,6	-83,3	-41,9	-0,7	-53,5
3,5	12559,6	-715,1	-11845,8	-2,7	0,0	-2,3	-80,5	-0,3	-71,1	-50,8	-0,2	-45,2
4	13407,1	-2908,1	-10504,3	-3,0	-0,2	-1,9	-91,1	-5,8	-56,1	-57,9	-2,7	-35,5
4,5	13924,8	-5029,6	-8904,5	-3,2	-0,6	-1,4	-97,0	-17,5	-41,1	-62,4	-8,1	-25,5
5	14100,0	-7027,3	-7085,6	-3,2	-1,1	-0,9	-97,6	-33,4	-28,2	-64,0	-15,9	-16,2
5,5	13928,3	-8852,2	-5092,5	-3,1	-1,5	-0,6	-94,5	-45,4	-17,3	-62,5	-25,2	-8,3
6	13414,1	-10459,3	-2974,0	-2,9	-2,0	-0,2	-88,2	-61,3	-6,0	-57,9	-35,2	-2,8
6,5	12569,8	-11809,1	-782,4	-2,6	-2,5	0,0	-78,6	-75,0	-0,5	-50,9	-44,9	-0,2
7	11416,4	-12868,5	1428,4	-2,1	-2,9	0,0	-65,1	-87,8	-1,3	-42,0	-53,3	-0,7
7,5	9982,1	-13611,3	3604,1	-1,7	-3,2	-0,3	-50,7	-96,4	-8,8	-32,1	-59,7	-4,2
8	8302,3	-14019,3	5691,2	-1,2	-3,3	-0,7	-36,1	-100,4	-22,1	-22,2	-63,3	-10,4
8,5	6418,3	-14082,4	7638,2	-0,8	-3,3	-1,3	-23,6	-99,3	-39,1	-13,3	-63,9	-18,8
9	4376,4	-13799,2	9397,4	-0,4	-3,1	-1,8	-11,7	-95,1	-56,1	-6,2	-61,3	-28,4
9,5	2226,8	-13176,5	10925,4	-0,1	-2,9	-2,3	-3,2	-87,2	-70,1	-1,6	-55,9	-38,4
10	22,5	-12229,6	12184,7	0,0	-2,5	-2,8	0,0	-75,1	-84,5	0,0	-48,2	-47,8
10,5	-2182,4	-10982,0	13144,2	-0,1	-2,0	-3,1	-3,3	-61,2	-94,7	-1,5	-38,8	-55,6
11	-4333,6	-9464,2	13780,4	-0,4	-1,5	-3,3	-13,1	-46,2	-100,4	-6,0	-28,8	-61,1
11,5	-6378,3	-7713,6	14077,6	-0,9	-1,0	-3,4	-28,1	-31,5	-101,6	-13,1	-19,2	-63,8
12	-8266,0	-5773,3	14028,6	-1,5	-0,6	-3,2	-45,5	-19,4	-97,8	-22,0	-10,7	-63,4
12,5	-9950,3	-3690,9	13634,5	-1,8	-0,3	-3,0	-54,4	-9,5	-91,8	-31,9	-4,4	-59,9
13	-11390,0	-1517,8	12904,9	-2,3	-0,1	-2,7	-69,2	-1,6	-82,7	-41,8	-0,7	-53,6
13,5	-12549,4	692,7	11858,0	-2,7	0,0	-2,3	-81,1	-0,3	-71,0	-50,7	-0,2	-45,3
14	-13400,1	2886,1	10519,3	-3,0	-0,2	-1,9	-91,5	-5,7	-56,2	-57,8	-2,7	-35,6
14,5	-13921,3	5008,6	8921,9	-3,2	-0,6	-1,4	-97,3	-17,3	-41,2	-62,4	-8,1	-25,6
15	-14100,0	7007,8	7105,0	-3,2	-1,1	-0,9	-97,7	-33,3	-28,4	-64,0	-15,8	-16,3
15,5	-13931,8	8834,7	5113,4	-3,1	-1,5	-0,6	-94,6	-45,2	-17,4	-62,5	-25,1	-8,4
16	-13421,0	10444,2	2996,0	-2,9	-2,0	-0,2	-88,3	-61,2	-6,1	-58,0	-35,1	-2,9
16,5	-12580,0	11796,8	804,8	-2,6	-2,5	0,0	-78,7	-74,9	-0,5	-51,0	-44,8	-0,2
17	-11429,5	12859,3	-1406,1	-2,2	-2,9	0,0	-65,3	-87,8	-1,3	-42,1	-53,2	-0,6
17,5	-9998,0	13605,4	-3582,4	-1,7	-3,2	-0,3	-50,8	-96,3	-8,7	-32,2	-59,6	-4,1
18	-8320,4	14016,9	-5670,6	-1,2	-3,3	-0,7	-36,2	-100,4	-22,0	-22,3	-63,3	-10,4



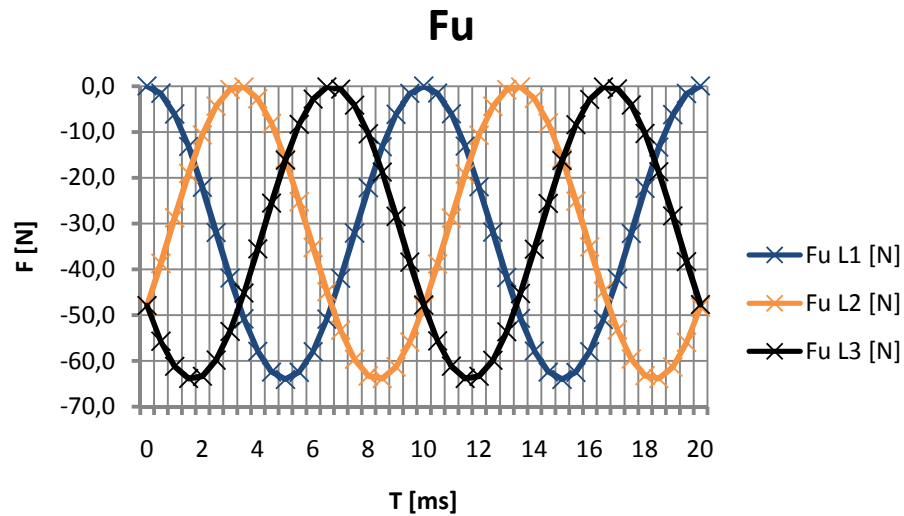
18,5	-6438,3	14083,5	-7619,4	-0,8	-3,3	-1,3	-23,7	-99,3	-38,9	-13,3	-63,9	-18,7
19	-4397,7	13803,7	-9380,7	-0,4	-3,1	-1,8	-11,8	-95,2	-55,9	-6,2	-61,4	-28,3
19,5	-2249,0	13184,4	-10911,2	-0,1	-2,9	-2,3	-3,3	-87,3	-70,0	-1,6	-56,0	-38,3
20	-44,9	12240,8	-12173,4	0,0	-2,5	-2,8	0,0	-75,3	-84,3	0,0	-48,2	-47,7



Graf 6-13: Průběh momentu, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh



Graf 6-14: Průběh síly ve směru osy Z, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh

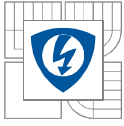


Graf 6-15: Průběh síly v kontaktní úžině, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh

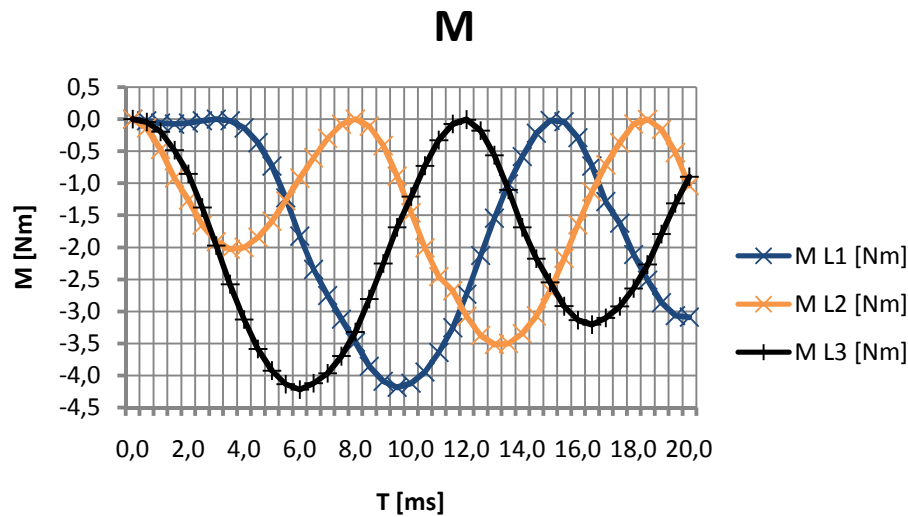
6.2.4 Třípólový model proudovodné dráhy, nesymetrický průběh

Tabulka 6-4: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh

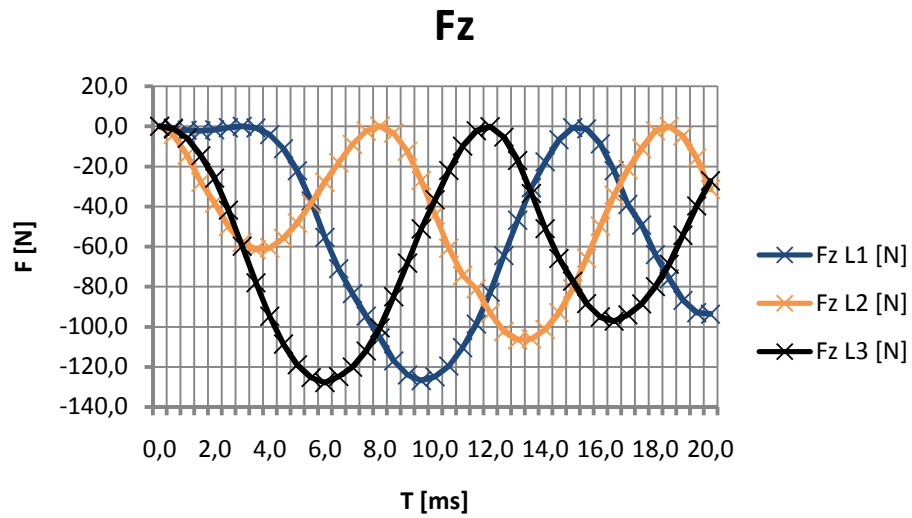
T [MS]	I L1 [A]	I L2 [A]	I L3 [A]	M L1 [NM]	M L2 [NM]	M L3 [NM]	FZ L1 [N]	FZ L2 [N]	FZ L3 [N]	FU L1 [N]	FU L2 [N]	FU L3 [N]
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	1053,6	-2435,5	1377,4	0,0	-0,1	0,0	-0,8	-4,1	-1,3	-0,4	-1,9	-0,6
1,0	1658,1	-4600,3	2933,7	-0,1	-0,5	-0,2	-1,9	-14,4	-5,9	-0,9	-6,8	-2,8
1,5	1835,5	-6459,2	4611,9	-0,1	-0,9	-0,5	-2,3	-27,9	-14,6	-1,1	-13,4	-6,8
2,0	1614,9	-7983,5	6354,0	-0,1	-1,3	-0,9	-1,8	-38,2	-25,9	-0,8	-20,5	-13,0
2,5	1032,3	-9150,8	8101,6	0,0	-1,7	-1,4	-0,7	-50,0	-41,8	-0,3	-27,0	-21,1
3,0	130,2	-9946,4	9797,9	0,0	-1,9	-2,0	0,0	-58,0	-59,8	0,0	-31,9	-30,9
3,5	-1043,6	-10363,5	11388,1	0,0	-2,0	-2,6	-0,8	-61,5	-78,1	-0,4	-34,6	-41,8
4,0	-2437,1	-10403,4	12821,4	-0,1	-2,0	-3,1	-4,2	-60,6	-94,8	-1,9	-34,8	-52,9
4,5	-3994,6	-10075,8	14051,8	-0,4	-1,8	-3,6	-11,1	-55,9	-108,7	-5,1	-32,7	-63,6
5,0	-5658,3	-9398,4	15039,4	-0,7	-1,6	-3,9	-22,2	-48,3	-119,0	-10,3	-28,4	-72,8
5,5	-7369,5	-8396,8	15750,9	-1,2	-1,3	-4,1	-37,2	-38,6	-125,4	-17,5	-22,7	-79,9
6,0	-9070,0	-7103,6	16160,6	-1,8	-0,9	-4,2	-55,4	-27,9	-127,9	-26,5	-16,2	-84,1
6,5	-10703,0	-5558,2	16251,0	-2,3	-0,6	-4,1	-71,1	-18,2	-124,9	-36,9	-9,9	-85,0
7,0	-12214,9	-3805,1	16013,0	-2,8	-0,3	-4,0	-83,5	-9,1	-120,2	-48,0	-4,7	-82,6
7,5	-13556,1	-1893,8	15446,5	-3,1	-0,1	-3,7	-94,7	-2,4	-112,1	-59,2	-1,2	-76,8
8,0	-14682,4	123,2	14559,5	-3,5	0,0	-3,3	-105,5	0,0	-100,7	-69,4	0,0	-68,3
8,5	-15555,7	2191,0	13368,7	-3,9	-0,1	-2,8	-117,0	-3,3	-85,0	-77,9	-1,5	-57,5
9,0	-16145,2	4254,3	11898,8	-4,1	-0,4	-2,3	-124,1	-12,5	-68,3	-83,9	-5,8	-45,6
9,5	-16427,8	6257,8	10181,5	-4,2	-0,9	-1,7	-126,9	-26,9	-51,2	-86,9	-12,6	-33,4



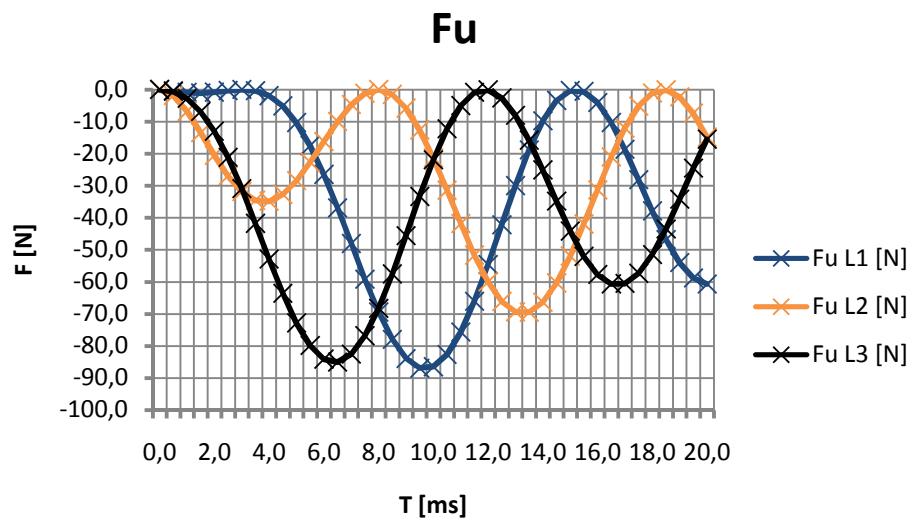
10,0	-16388,7	8148,5	8255,2	-4,1	-1,5	-1,2	-124,9	-44,3	-36,6	-86,5	-21,4	-21,9
10,5	-16021,6	9876,2	6163,6	-3,9	-2,0	-0,7	-119,6	-60,8	-22,0	-82,6	-31,4	-12,2
11,0	-15329,2	11395,3	3954,9	-3,6	-2,5	-0,3	-110,4	-74,4	-9,9	-75,7	-41,8	-5,0
11,5	-14322,4	12665,2	1680,4	-3,3	-2,7	-0,1	-98,7	-81,1	-2,2	-66,0	-51,6	-0,9
12,0	-13020,5	13652,2	-606,6	-2,7	-3,1	0,0	-82,8	-93,2	-0,2	-54,6	-60,0	-0,1
12,5	-11450,7	14329,4	-2852,4	-2,1	-3,4	-0,2	-64,5	-102,4	-5,4	-42,2	-66,1	-2,6
13,0	-9646,9	14678,0	-5004,0	-1,5	-3,5	-0,6	-46,9	-106,6	-17,0	-30,0	-69,4	-8,1
13,5	-7649,5	14687,2	-7010,7	-1,0	-3,5	-1,1	-30,6	-106,1	-33,5	-18,8	-69,5	-15,8
14,0	-5503,7	14355,0	-8824,9	-0,6	-3,3	-1,7	-17,7	-101,5	-51,1	-9,8	-66,3	-25,1
14,5	-3258,8	13687,7	-10403,7	-0,2	-3,1	-2,2	-6,7	-93,0	-66,0	-3,4	-60,3	-34,8
15,0	-967,0	12700,4	-11710,0	0,0	-2,7	-2,6	-0,6	-81,2	-77,3	-0,3	-51,9	-44,2
15,5	1318,3	11415,7	-12713,0	0,0	-2,2	-2,9	-1,2	-65,8	-88,5	-0,6	-42,0	-52,0
16,0	3543,5	9864,0	-13389,3	-0,3	-1,6	-3,1	-8,8	-49,9	-95,1	-4,0	-31,3	-57,7
16,5	5656,2	8082,3	-13723,6	-0,7	-1,1	-3,2	-22,2	-34,4	-97,2	-10,3	-21,0	-60,6
17,0	7606,8	6113,2	-13708,7	-1,3	-0,7	-3,1	-39,0	-21,5	-94,1	-18,6	-12,0	-60,5
17,5	9349,1	4004,3	-13346,0	-1,6	-0,4	-2,9	-49,2	-11,1	-88,6	-28,1	-5,2	-57,3
18,0	10842,3	1806,5	-12645,4	-2,1	-0,1	-2,6	-64,0	-2,2	-80,1	-37,9	-1,1	-51,5
18,5	12051,2	-427,1	-11624,9	-2,5	0,0	-2,3	-76,1	-0,1	-68,8	-46,8	-0,1	-43,5
19,0	12947,6	-2642,1	-10310,3	-2,9	-0,2	-1,8	-86,8	-4,8	-54,4	-54,0	-2,2	-34,2
19,5	13510,8	-4784,8	-8734,8	-3,1	-0,5	-1,3	-93,0	-15,8	-39,8	-58,8	-7,4	-24,6
20,0	13728,4	-6803,2	-6937,7	-3,1	-1,0	-0,9	-93,7	-31,4	-27,2	-60,7	-14,9	-15,5



Graf 6-16: Průběh momentu, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh



Graf 6-17: Průběh síly ve směru osy Z, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh



Graf 6-18: Průběh síly v kontaktní úžině, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh

6.3 Výsledná síla

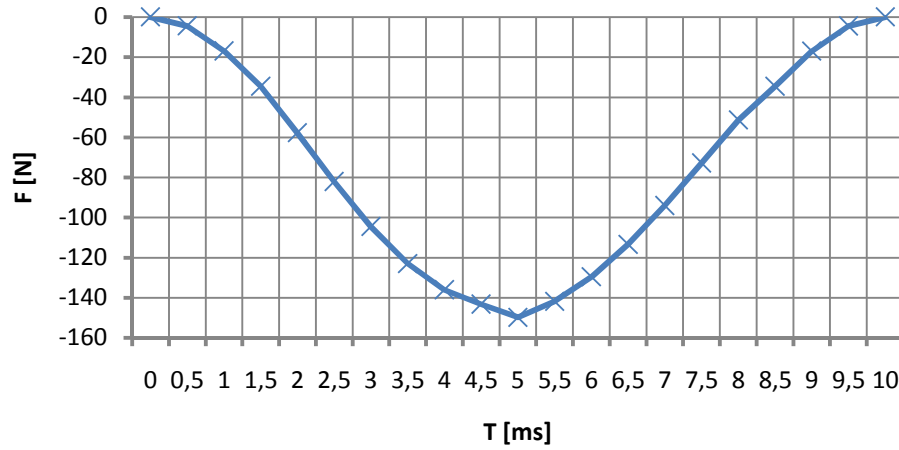
Je spočtena stejným způsobem, jako při Magnetostatické analýze v předchozí kapitole této diplomové práce.

6.3.1 Jednopolový model proudovodné dráhy, sinusový průběh

Tabulka 6-5: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza pro sinusový jednopolový průběh

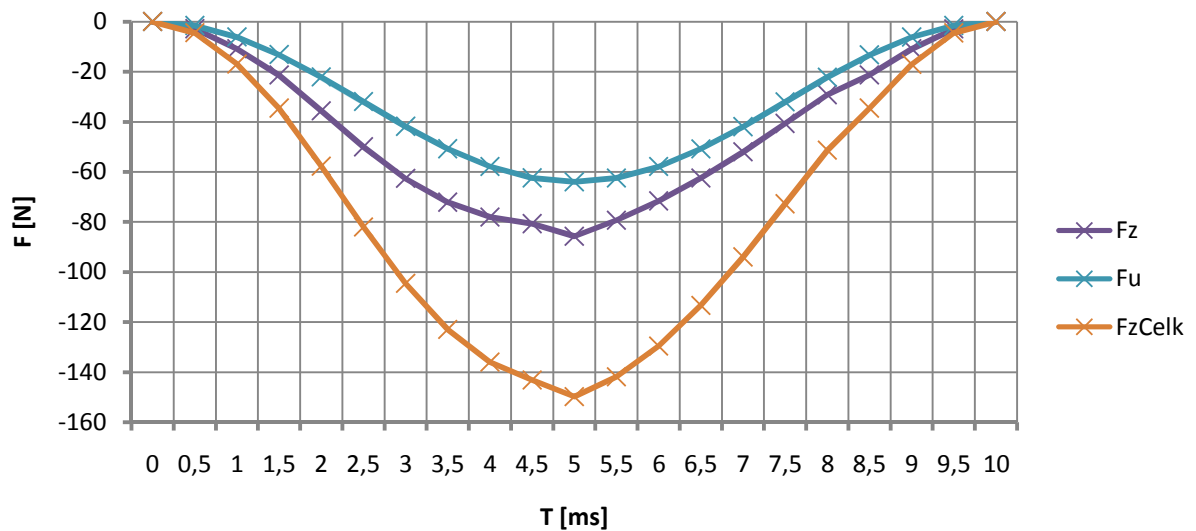
T [MS]	F _Z CELK [N]
0	0
0,5	-4,41491
1	-16,94323
1,5	-34,54867
2	-57,73610
2,5	-82,04505
3	-104,53418
3,5	-122,95518
4	-136,02149
4,5	-143,17073
5	-149,78163
5,5	-141,84788
6	-129,58891
6,5	-113,39013
7	-94,02238
7,5	-72,79759
8	-51,37921
8,5	-34,55937
9	-17,03970
9,5	-4,49496
10	-0,00046

FzCelk



Graf 6-19: Průběh výsledné síly působící na kontakt jističe, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh

FzCelk

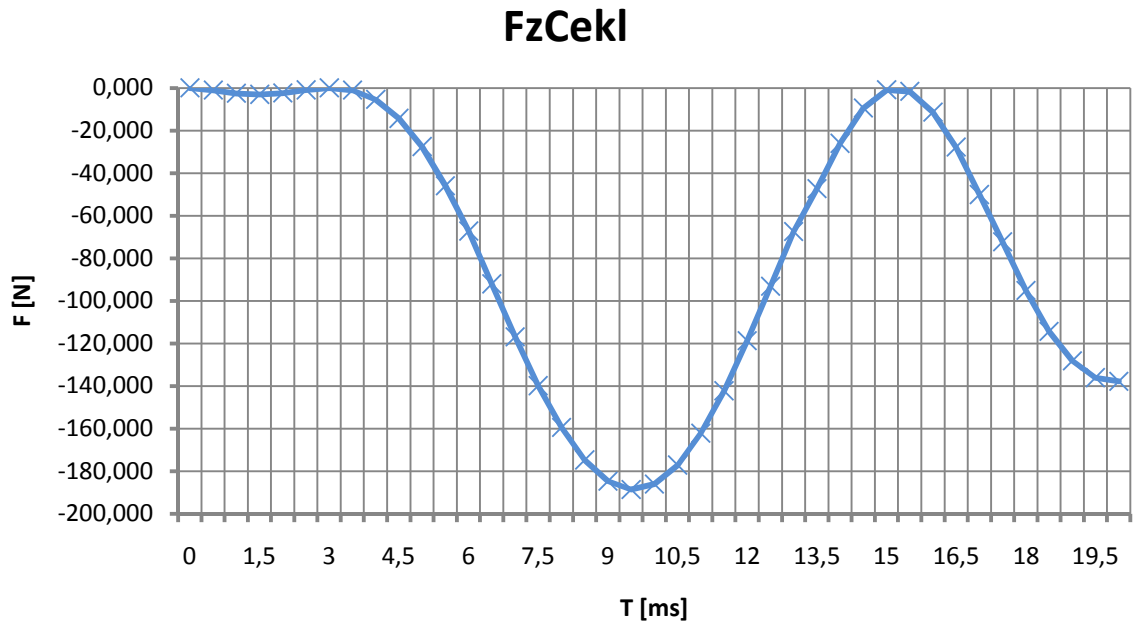


Graf 6-20: Průběhy sil působících na kontakt jističe, Tranzientní analýza pro sinusový jednopólový průběh

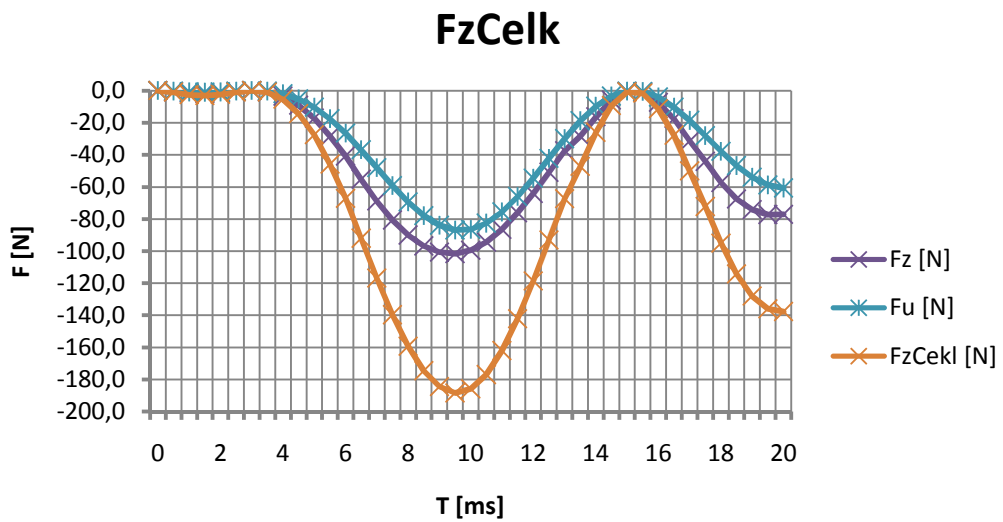
6.3.2 Jednopolový model proudovodné dráhy, nesymetrický průběh

Tabulka 6-6: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopolový průběh

T [MS]	FZCEKL [N]	T [MS]	FZCEKL [N]
0	0,000	10,5	-177,079
0,5	-1,008	11	-162,163
1	-2,499	11,5	-142,237
1,5	-3,061	12	-118,664
2	-2,370	12,5	-93,122
2,5	-0,967	13	-67,468
3	-0,015	13,5	-47,284
3,5	-0,989	14	-26,035
4	-5,396	14,5	-9,404
4,5	-14,322	15	-0,851
5	-27,543	15,5	-1,579
5,5	-45,916	16	-11,392
6	-67,209	16,5	-27,824
6,5	-92,048	17	-50,071
7	-116,868	17,5	-72,297
7,5	-139,810	18	-95,150
8	-159,453	18,5	-114,294
8,5	-174,702	19	-128,148
9	-184,639	19,5	-136,036
9,5	-188,553	20	-137,788
10	-186,034		



Graf 6-21: Průběh výsledné síly působící na kontakt jističe, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh

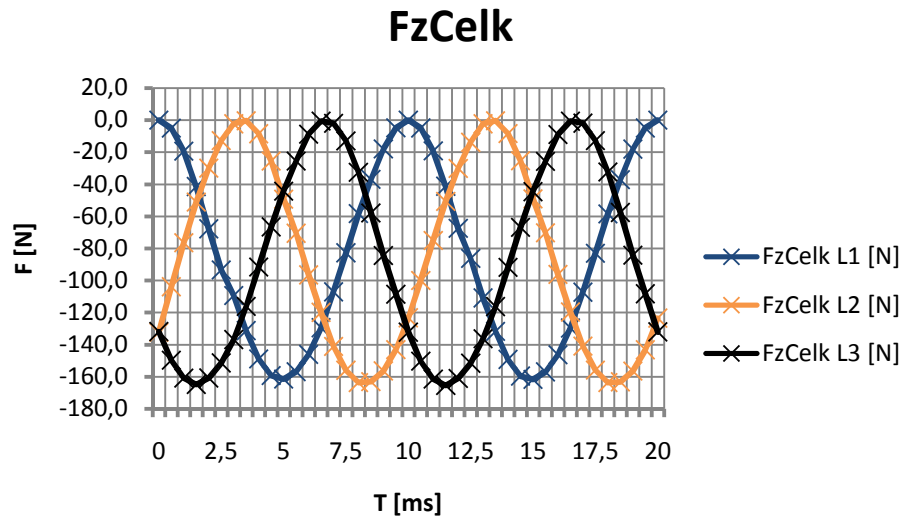


Graf 6-22: Průběh sil působících na kontakt jističe, Tranzientní analýza pro nesymetrický jednopólový průběh

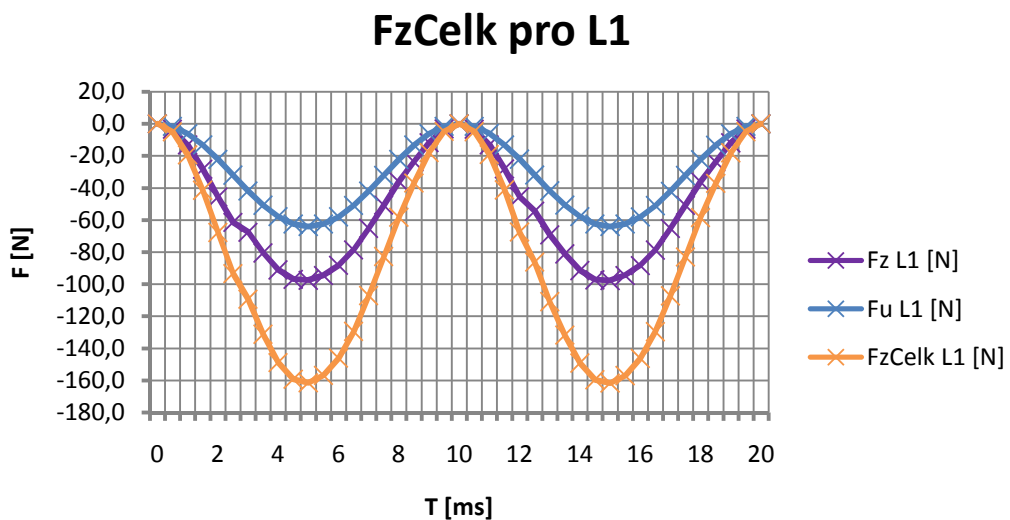
6.3.3 Třípólový model proudovodné dráhy, sinusový průběh

Tabulka 6-7: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh

T [MS]	FZCEK L1 [N]	FZCEK L2 [N]	FZCEK L3 [N]	T [MS]	FZCEK L1 [N]	FZCEK L2 [N]	FZCEK L3 [N]
0	0,0	-132,3	-131,9	10,5	-4,9	-100,0	-150,3
0,5	-5,0	-103,9	-149,8	11	-19,1	-75,1	-161,5
1	-19,3	-76,5	-160,9	11,5	-41,2	-50,7	-165,5
1,5	-41,4	-51,1	-164,9	12	-67,5	-30,1	-161,1
2	-67,8	-30,0	-160,8	12,5	-86,3	-13,9	-151,6
2,5	-93,5	-12,8	-151,4	13	-110,9	-2,3	-136,4
3	-109,5	-2,4	-136,9	13,5	-131,8	-0,5	-116,3
3,5	-131,3	-0,5	-116,2	14	-149,3	-8,4	-91,8
4	-149,0	-8,5	-91,6	14,5	-159,7	-25,4	-66,8
4,5	-159,4	-25,6	-66,6	15	-161,7	-49,1	-44,6
5	-161,6	-49,3	-44,4	15,5	-157,1	-70,3	-25,8
5,5	-157,0	-70,6	-25,6	16	-146,3	-96,3	-9,0
6	-146,2	-96,5	-8,9	16,5	-129,7	-119,7	-0,7
6,5	-129,5	-119,9	-0,7	17	-107,3	-141,0	-1,9
7	-107,1	-141,2	-2,0	17,5	-83,0	-155,9	-12,8
7,5	-82,8	-156,0	-13,0	18	-58,5	-163,7	-32,3
8	-58,3	-163,7	-32,6	18,5	-37,1	-163,2	-57,6
8,5	-36,9	-163,2	-57,9	19	-18,1	-156,5	-84,2
9	-17,9	-156,4	-84,5	19,5	-4,9	-143,3	-108,3
9,5	-4,8	-143,1	-108,6	20	0,0	-123,5	-132,1
10	0,0	-123,3	-132,3				

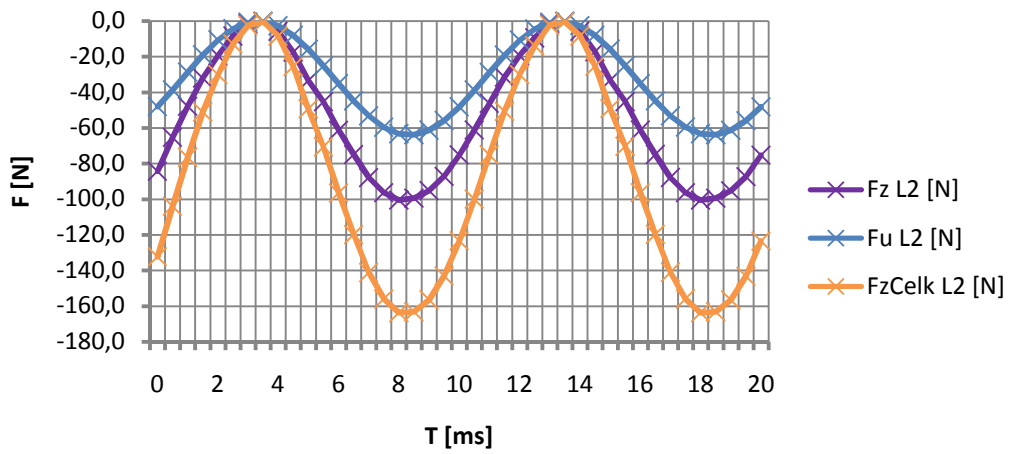


Graf 6-23: Průběh celkové síly působící na kontakt jističe, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh



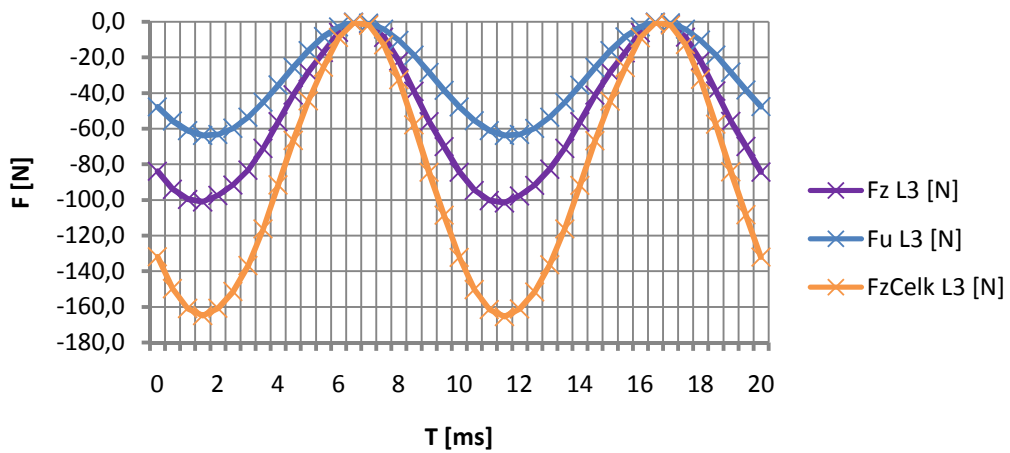
Graf 6-24: Průběh sil působících na kontakt v první fázi, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh

FzCelk pro L2



Graf 6-25: Průběh sil působících na kontakt v druhé fázi, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh

FzCelk pro L3

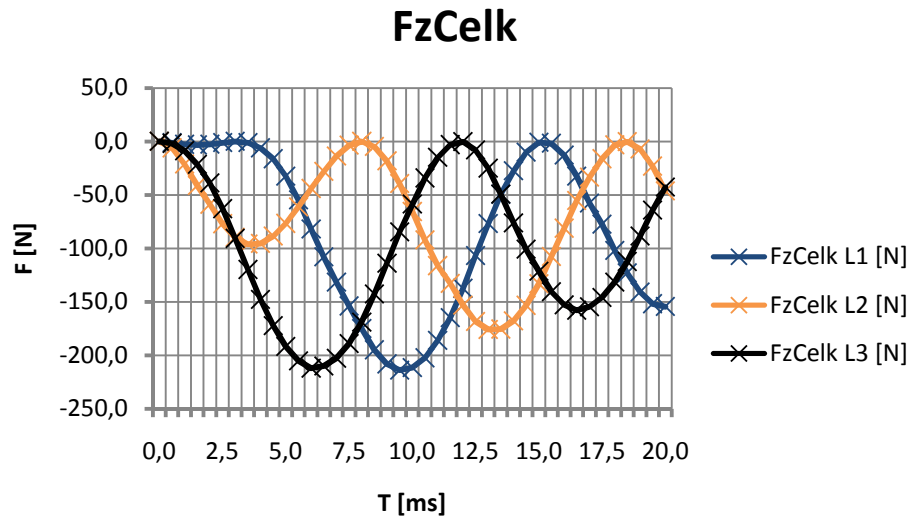


Graf 6-26: Průběh sil působících na kontakt ve třetí fázi, Tranzientní analýza, sinusový třípólový průběh

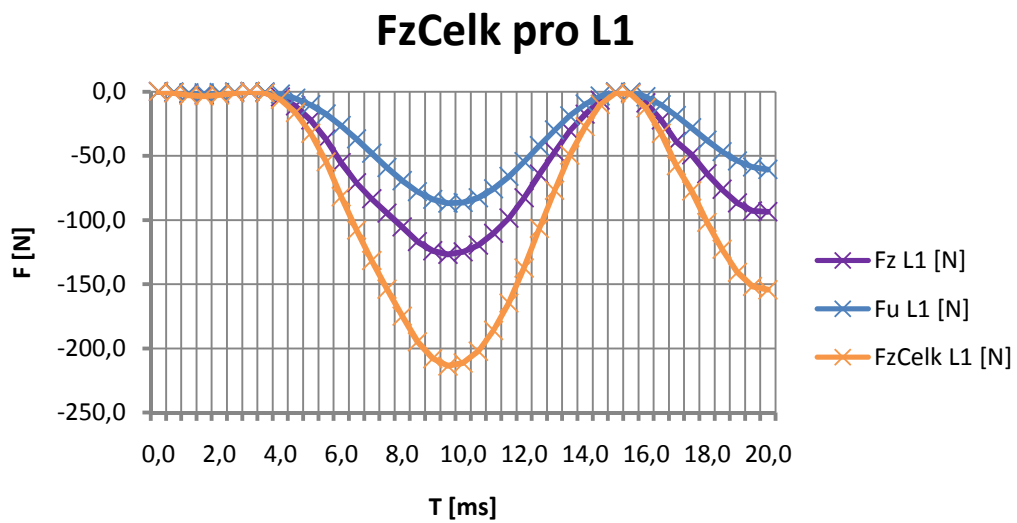
6.3.4 Třípólový model proudovodné dráhy, nesymetrický průběh

Tabulka 6-8: Výsledky výpočtu, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh

T [MS]	FZCEK L1 [N]	FZCEK L2 [N]	FZCEK L3 [N]	T [MS]	FZCEK L1 [N]	FZCEK L2 [N]	FZCEK L3 [N]
0,0	0,0	0,0	0,0	10,5	-202,3	-92,2	-34,3
0,5	-1,1	-6,0	-1,9	11,0	-186,0	-116,3	-14,9
1,0	-2,8	-21,2	-8,7	11,5	-164,7	-132,8	-3,1
1,5	-3,4	-41,3	-21,5	12,0	-137,4	-153,3	-0,3
2,0	-2,6	-58,8	-38,9	12,5	-106,7	-168,5	-8,1
2,5	-1,1	-77,0	-63,0	13,0	-76,8	-175,9	-25,1
3,0	0,0	-89,9	-90,7	13,5	-49,4	-175,5	-49,3
3,5	-1,1	-96,1	-119,8	14,0	-27,4	-167,8	-76,2
4,0	-6,1	-95,5	-147,7	14,5	-10,1	-153,4	-100,8
4,5	-16,3	-88,6	-172,3	15,0	-0,9	-133,1	-121,4
5,0	-32,5	-76,7	-191,8	15,5	-1,8	-107,7	-140,5
5,5	-54,7	-61,3	-205,2	16,0	-12,8	-81,2	-152,8
6,0	-81,8	-44,1	-212,0	16,5	-32,5	-55,4	-157,9
6,5	-108,0	-28,2	-210,0	17,0	-57,6	-33,6	-154,6
7,0	-131,5	-13,7	-202,8	17,5	-77,4	-16,2	-146,0
7,5	-153,9	-3,5	-188,9	18,0	-101,9	-3,3	-131,5
8,0	-174,9	0,0	-168,9	18,5	-122,9	-0,2	-112,3
8,5	-194,9	-4,8	-142,6	19,0	-140,8	-7,0	-88,6
9,0	-208,0	-18,3	-113,9	19,5	-151,7	-23,2	-64,4
9,5	-213,8	-39,6	-84,6	20,0	-154,4	-46,3	-42,7
10,0	-211,4	-65,6	-58,6				

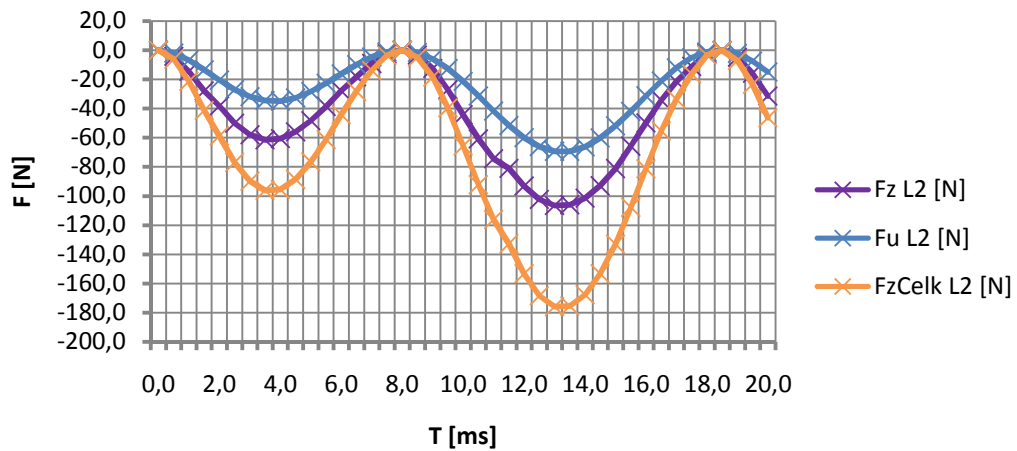


Graf 6-27: Průběh celkové síly působící na kontakt jističe, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh



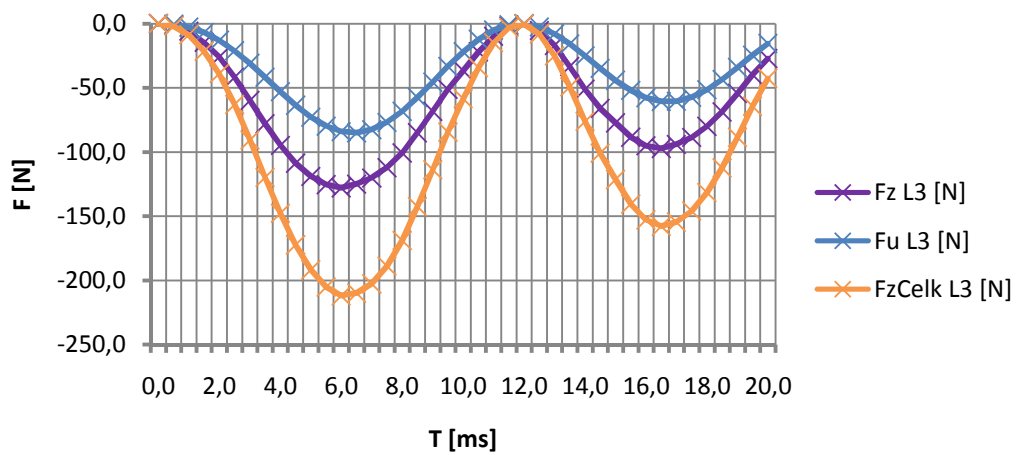
Graf 6-28: Průběh sil působících na kontakt v první fázi, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh

FzCelk pro L2



Graf 6-29: Průběh sil působících na kontakt v druhé fázi, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh

FzCelk pro L3



Graf 6-30: Průběh sil působících na kontakt ve třetí fázi, Tranzientní analýza, nesymetrický třípólový průběh



7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá výpočtem elektrodynamických sil v jističi 250A. V první kapitole jsem popsal jistící prvky, jako jsou tavné pojistky, proudové chrániče, jejich funkce a charakteristiky. Provedl jsem rozdělení jističů dle kategorií.

V druhé kapitole jsem teoreticky popsal působení dynamických sil v jističi. Popsal jsem působení mezi dvěma rovnoběžnými vodiči, působení v zahnutých vodičích. Velkou pozornost jsem věnoval teoretickému rozboru při změně průřezu vodiče, neboť do této kapitoly se také počítá kontakt simulovaného jističe. V neposlední řadě jsem popsal působení sil v soustavě jednofázové a třífázové.

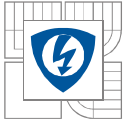
V další kapitole jsem popsal zadaný kompaktní třífázový jistič BD250NE305 od Firmy OEZ. Jsou zde popsány jeho hlavní parametry a příslušenství. Proudovodnou dráhu tohoto jističe jsem nakreslil v programu Autodesk Inventor Professional 2012. Vytvořil jsem nejprve jednotlivé části jeho dráhy a následně jsem je pomocí pevných vazeb spojil v jednolitou proudovodnou dráhu. Bylo velice důležité dodržet dané velikosti reálné dráhy pro přesnou simulaci.

V kapitole zabývající se simulačním programem jsem již vytvořený model proudovodné dráhy jističe importoval do výpočetního programu ANSYS MAXWELL. Důležitým krokem bylo správné nastavení parametrů importovaného modelu. Přiřadil jsem jednotlivým částem příslušný materiál, nastavil jsem sekundární souřadný systém pro simulaci momentu působícího na pohyblivý kontakt jističe a provedl jsem nastavení parametrů proudu.

Prvním simulovaným úkolem bylo vypočítat moment, který působí na kontakt jističe při průchodu proudu o velikosti 1, 2, 5 a 10 kA. Z toho vyplývá, že se jednalo o Magnetostatickou analýzu. Úkolem bylo ji provést pouze pro jednopólový model proudovodné dráhy. Výsledný moment je znázorněn v grafu. Jeho velikost a tvar odpovídá skutečným parametrům reálného jističe. Největší síla působí ve směru rozpojení kontaktů (osa z). Nejmenší síla působící na kontakt byla ve směru osy y. Kontakty nejsou namáhány silou sousedních proudovodných drah.

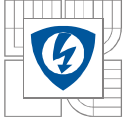
V další kapitole bylo úkolem ručně vypočítat sílu F_u v kontaktní úžině a přičíst ji k výslednému momentu spočtenému simulačním programem. Její výsledky jsou zobrazeny v přehledné tabulce 5-1.

Šestá kapitola se zabývá transientní, neboli časovou analýzou. Dle zadání diplomové práce jsem ji provedl pro čtyři stavy: pro jednopólový model proudovodné dráhy jističe se sinusovým a nesymetrickým průběhem, a pro třípólový model taktéž se sinusovým a nesymetrickým průběhem. Z grafů pro třípólový model proudovodné dráhy je patrné, že se již ovlivňují jednotlivé fáze proudovodných drah.



LITERATURA

- [1] *Proudové chrániče* [online]. [cit 2014.12.04]. Dostupný z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Proudov%C3%BD_chr%C3%A1ni%C4%8D
- [2] *Proudové chrániče* [online]. [cit 2014.12.04]. Dostupný z WWW:
<http://www.proprojektanty.cz/spinaci-a-ochrann-pristroje-nn/148-proudove-chranice-jsou-nyni-povinnou-soucasti-kazde-zasuvky>
- [3] *Tavná pojistka* [online]. [cit 2014.12.04]. Dostupný z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Tavn%C3%A1_pojistka
- [4] *Tavná pojistka* [online]. [cit 2014.12.04]. Dostupný z WWW: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/T-1.3-POJISTKA.pdf>
- [5] *Elektrický jistič* [online]. [cit 2014.12.04]. Dostupný z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_jisti%C4%8D
- [6] *Proudové jističe* [online]. [cit 2014.12.04]. Dostupný z WWW:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/329-jistice>
- [7] *Rozdělení jističů* [online]. [cit 2014.12.04]. Dostupný z WWW: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/T1.4-JISTI%C4%8CE.pdf>
- [8] *Jistič BD250NE305* [online]. [cit 2014.12.04]. Dostupný z WWW:
<http://eshop.m2trade.cz/bd250/101822-bd250ne305-8590125144144.html>
- [9] *Jistič BD250NE305* [online]. [cit 2014.12.07]. Dostupný z WWW:
<http://www.oez.cz/produkty/kompaktni-jistice-modeion-1>
- [10] *Jistič BD250NE305* [online]. [cit 2014.12.07]. Dostupný z WWW:
<http://www.oez.cz/produkty/bd250-kompaktni-jistice?highlightWords=BD250NE305>
- [11] BUŮ B. K. A KOLEKTIV: *Elektrické přístroje*. Nakladatelství SNTL, Praha 1977, 1. Vydání
- [12] *Magnetické pole* [online]. [cit 2014.12.07]. Dostupný z WWW:
<http://www.emotor.cz/elektricky-proud-v-magnetickem-poli.htm>
- [13] *Simulace elektrodynamických sil v jističi* [online]. [cit 2014.12.07]. Dostupný z WWW:
http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2003/fsbornik/99-CD/02-Mgr/04-Power_Electrical_Engineering/10-valenta_jiri.pdf
- [14] *Skin efekt* [online]. [cit 2015.04.05]. Dostupný z WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Skin_efekt



PŘÍLOHY