

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

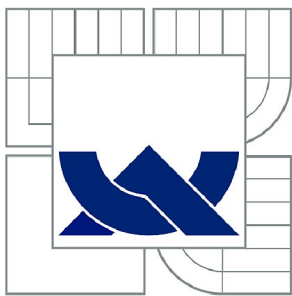
VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL JISTIČE 1600A

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

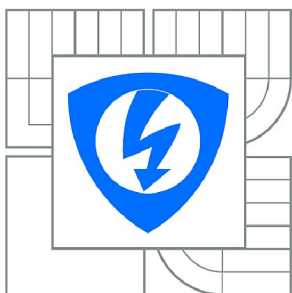
Bc. PAVEL MUSIL

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY**

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

VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL JISTIČE 1600A

CALCULATION OF ELECTRODYNAMIC FORCES IN 1600 A CIRCUIT BREAKER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

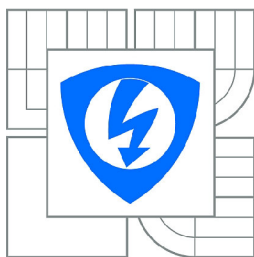
Bc. PAVEL MUSIL

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. Pavel Musil

ID: 125555

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet elektrodynamických sil jističe 1600A

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Uveďte princip vzniku elektrodynamických sil v jističích.
2. Proveďte podrobný rozbor pro vybraný typ přístroje.
3. Vytvořte ve vybraném CAD systému 3D model přístroje.
4. Pro jednotlivé stavy proveďte simulaci působení elektrodynamických sil v prostředí Ansoft Maxwell.
5. Získané výsledky souhrnně vyhodnoťte.

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

Diplomová práce je zaměřena na výpočet elektrodynamických sil, působících na pohyblivé kontakty kompaktního jističe BL1600 od firmy OEZ Letohrad. Práce je rozdělena do jednotlivých kapitol, které na sebe vzájemně navazují. V úvodu je popsáno, proč se zabýváme výpočtem dynamických sil a celkovým konstrukčním uspořádáním proudovodné dráhy. V následující kapitole nalezneme teoretický rozbor elektrodynamických sil, které působí na jednotlivé části jisticího prvku. Třetí celek se věnuje konstrukčnímu uspořádání jističe BL1600. V této části také nalezneme příklad využití kompaktních jističů Modeion v praxi. Dvě navazující kapitoly se zabývají úpravou modelu proudovodné dráhy, který následně slouží pro výpočet elektrodynamických sil. Zbývající obsah práce se věnuje vlastním výpočtům. Jedná se o výpočty stacionární, kde zjišťujeme síly působící na kontakty, při ustáleném proudu, v určitém časovém okamžiku. A výpočty dynamické, kdy můžeme sledovat síly působící na kontakty, v určitém časovém intervalu. Poslední kapitola se věnuje stacionárnímu výpočtu sil, působících na elektrický oblouk, který vzniká při vypínání zkratových proudů. Získané výsledky jsou zhodnoceny v dílčích závěrech této práce.

Abstract

The thesis is focused on the calculation of electrodynamic forces that counterwork on moving contacts of compact circuit breaker BL1600 from the company OEZ Letohrad. The thesis is divided into separate chapters that build on themselves. In the introduction the reason why we deal with calculation of dynamic forces and structural arrangement of current carrying path is described. In the following chapter there is a theoretical analysis of electrodynamic forces that counterwork on individual parts of circuit breaker's element. The third part is devoted to structural arrangement of the circuit breaker BL1600. In this part we can find an example of using the circuit breaker Modeion in practice. Two next chapters deal with adjustment of the model of current carrying path which then serves for the calculation of electrodynamic forces. The rest of the thesis is devoted to my own calculations. These calculations are mainly stationary where we try to find the forces that counterwork on the contacts in a steady current and in a point in time. There are also dynamics calculation when we can watch the forces that counterwork on contacts in a certain time interval. The last chapter is devoted to a stationary calculation of forces that counterwork on the electrical arc which arises while turning the short-circuit current off. The obtained results are evaluated in partial conclusions of this thesis.

Klíčová slova

Jistič; OEZ; BL1600; kontakty, elektrodynamické síly; odpuzivá síla; elektrický proud; Ansys Maxwell

Keywords

Circuit breaker; OEZ; BL1600; contacts; electrodynamic forces; repulsive force; electric current; Ansys Maxwell

Bibliografická citace

MUSIL, P. *Výpočet elektrodynamických sil jističe 1600A*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 119 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočet elektrodynamických sil jističe 1600A 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

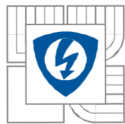
Podpis autora

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.

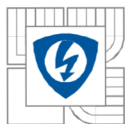
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

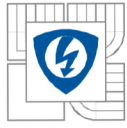
SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	16
1 ÚVOD.....	17
2 SILOVÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU	18
2.1 SÍLY MEZI NĚKOLIKA PROUDOVÝMI DRÁHAMÍ	18
2.1.1 NÁHRADA PROUDOVÝMI VLÁKNY A NEKONEČNĚ DLOUHÝ VODIČ.....	18
2.1.2 NÁHRADA PROUDOVÝMI VLÁKNY A VODIČ KONEČNÉ DÉLKY	19
2.1.3 UVAŽUJEME REÁLNÉ PRŮŘEZY	19
2.2 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY V ZAKŘIVENÉ PROUDOVÉ DRÁZE	20
2.2.1 JEDNODUCHÝ PRAVOÚHLÝ ZÁHYB	20
2.2.2 DVOJITÝ PRAVOÚHLÝ ZÁHYB	21
2.3 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY PROUDOVÉ DRÁHY V BLÍZKOSTI FEROMAGNETICKÉHO ROZHRAŇÍ	22
2.4 ODPUDIVÉ SÍLY MEZI KONTAKTY	23
3 KOMPAKTNÍ JISTIČ BL1600.....	24
3.1 KONSTRUKCE JISTIČE BL 1600	25
3.2 VYPÍNAČÍ CHARAKTERISTIKY	28
3.2.1 I^2t CHARAKTERISTIKY	29
3.3 PARAMETRY JISTIČE BL1600	30
3.4 PŘÍKLAD VYUŽITÍ KOMPAKTNÍCH JISTIČŮ MODEION V PRAXI:	31
4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	33
5 MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY JISTIČE.....	34
5.1 VÝSLEDNÝ MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY	35
6 STACIONÁRNÍ VÝPOČET SÍLY V PROSTŘEDÍ ANSYS MAXWELL	37
6.1 POSTUP SIMULACE.....	37
6.1.1 NASTAVENÍ MATERIÁLŮ.....	37
6.1.2 NASTAVENÍ PROUDŮ	38
6.2 VÝPOČET MOMENTŮ POMOCÍ PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....	39
6.2.1 VYPOČÍTNÉ HODNOTY MOMENTŮ.....	40
6.3 VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY F	41
6.3.1 VYPOČÍTNÉ HODNOTY SÍLY F	42
6.4 ROZLOŽENÍ SÍLY DO SLOŽEK F_z A F_y.....	43
6.4.1 VYPOČÍTNÉ HODNOTY SIL F_z A F_y	44
6.5 VÝPOČET ODPUDIVÉ SÍLY F_U V PROUDOVÉ ÚŽINĚ.....	45
6.5.1 VYPOČÍTNÉ HODNOTY ODPUDIVÝCH SIL F_U V PROUDOVÉ ÚŽINĚ	46
6.6 VÝPOČET VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY $F_{CELK.}$	47



6.6.1 VYPOČÍTANÉ HODNOTY VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY F_{CELK}	48
6.7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	49
7 STACIONÁRNÍ VÝPOČET SÍLY PŮSOBÍCÍ MEZI JEDNOTLIVÝMI KONTAKTY.....	50
7.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	51
8 STACIONÁRNÍ VÝPOČET SÍLY V PROSTŘEDÍ ANSYS MAXWELL SE ZANEDBÁNÍM ZHÁŠECÍ KOMORY	52
8.1 VYPOČÍTANÝ MOMENT POMOCÍ PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....	52
8.1.1 VYPOČÍTANÉ HODNOTY	52
8.2 VÝSLEDNÁ ODPUDIVÁ SÍLA	53
8.3 ZHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	53
9 DYNAMICKÝ VÝPOČET SÍLY V PROSTŘEDÍ ANSYS MAXWELL	54
9.1 POSTUP SIMULACE	54
9.2 STRÍDAVÝ PROUD 10KA	56
9.2.1 GRAF MOMENTŮ M PRO STRÍDAVÝ PROUD 10KA:	56
9.2.2 GRAF VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY F_{CELK} PRO STRÍDAVÝ PROUD 10KA:	57
9.2.3 GRAF VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY F_{CELK} FÁZE L2 SE ZOBRAZENÍM PRŮBĚHŮ PROUDŮ:.....	58
9.3 STRÍDAVÝ PROUD 25KA	59
9.3.1 GRAF MOMENTŮ M PRO STRÍDAVÝ PROUD 25KA:	59
9.3.2 GRAF VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY F_{CELK} PRO STRÍDAVÝ PROUD 25KA:.....	60
9.3.3 GRAF VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY F_{CELK} FÁZE L2 SE ZOBRAZENÍM PRŮBĚHŮ PROUDŮ:.....	61
9.4 STRÍDAVÝ PROUD 65KA	62
9.4.1 GRAF MOMENTŮ M PRO STRÍDAVÝ PROUD 65KA:	62
9.4.2 GRAF VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY F_{CELK} PRO STRÍDAVÝ PROUD 65KA:.....	63
9.4.3 GRAF VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY F_{CELK} FÁZE L2 SE ZOBRAZENÍM PRŮBĚHŮ PROUDŮ:.....	64
9.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	65
10 DYNAMICKÝ VÝPOČET SÍLY S PŘECHODOVÝM JEVEM PRO STRÍDAVÝ PROUD 65KA	66
10.1 GRAF MOMENTŮ M PRO STRÍDAVÝ PROUD 65 KA – PŘECHODOVÝ JEV:	67
10.2 GRAF VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY F_{CELK} PRO STRÍDAVÝ PROUD 65KA - PŘECHODOVÝ JEV:.....	68
10.3 GRAF VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY F_{CELK} FÁZE L2 SE ZOBRAZENÍM PRŮBĚHŮ PROUDŮ:	69
10.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ:	70
11 STACIONÁRNÍ VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL PŘI ELEKTRICKÉM OBLOUKU.....	71
11.1 SÍLA PŮSOBÍCÍ NA POHYBLIVÉ KONTAKTY	71
11.2 Vliv ZHÁŠECÍ KOMORY NA ELEKTRICKÝ OBLOUK	72
11.2.1 PROUD 25 KA	73
11.2.2 PROUD 45 KA	73
11.2.3 PROUD 65 KA	74
11.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	74
12 ZÁVĚR.....	75
LITERATURA	76

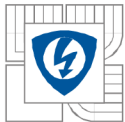


PŘÍLOHA A: TABULKY PRO STACIONÁRNÍ VÝPOČET SE ZANEDBÁNÍM ZHÁŠECÍ	
KOMORY	77
SÍLA F V OSE KONTAKTU.....	77
ROZLOŽENÍ SÍLY DO SLOŽEK F_z A F_y	78
ODPUDIVÉ SÍLY F_u V PROUDOVÉ ÚŽINĚ.....	79
PŘÍLOHA B: TABULKY PRO DYNAMICKÝ VÝPOČET 10KA.....	80
VYPOČÍTANÝ MOMENT POMOCÍ PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....	80
SÍLA F V OSE KONTAKTU.....	82
ROZLOŽENÍ SÍLY DO SLOŽEK F_z A F_y	84
ODPUDIVÉ SÍLY F_u V PROUDOVÉ ÚŽINĚ.....	86
VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY $F_{CELK.}$	88
PŘÍLOHA C: TABULKY PRO DYNAMICKÝ VÝPOČET 25KA.....	90
VYPOČÍTANÝ MOMENT POMOCÍ PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....	90
SÍLA F V OSE KONTAKTU.....	92
ROZLOŽENÍ SÍLY DO SLOŽEK F_z A F_y	94
ODPUDIVÉ SÍLY F_u V PROUDOVÉ ÚŽINĚ.....	96
VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY $F_{CELK.}$	98
PŘÍLOHA D: TABULKY PRO DYNAMICKÝ VÝPOČET 65KA.....	100
VYPOČÍTANÝ MOMENT POMOCÍ PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....	100
SÍLA F V OSE KONTAKTU.....	102
ROZLOŽENÍ SÍLY DO SLOŽEK F_z A F_y	104
ODPUDIVÉ SÍLY F_u V PROUDOVÉ ÚŽINĚ.....	106
VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY $F_{CELK.}$	108
PŘÍLOHA E: TABULKY PRO DYNAMICKÝ VÝPOČET 65KA S PŘECHODOVÝM JEVEM	110
VYPOČÍTANÝ MOMENT POMOCÍ PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....	110
SÍLA F V OSE KONTAKTU.....	112
ROZLOŽENÍ SÍLY DO SLOŽEK F_z A F_y	114
ODPUDIVÉ SÍLY F_u V PROUDOVÉ ÚŽINĚ.....	116
VÝSLEDNÉ ODPUDIVÉ SÍLY $F_{CELK.}$	118



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2-1: Závislost činitele tvaru průřezu vodiče na uspořádání proudovodičů[2].....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2-2: Průběh síly působící na pravoúhlý proudový záhyb[19]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 2-3: Průběh síly působící na spodní část proudovodné dráhy[3].....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 2-4: Síla vtahující oblouk do ocelové roštové komory[3].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2-5: Síly v proudové úžině [3].....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 3-1: Rozměry jističe BL1600.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 3-2: Jistič BL1600</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 3-3: Detail kontaktů jističe BL1600.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 3-4: Zhášecí komora jističe BL1600.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3-5: Elektronická nadproudová spoušť SE-BL-1600-U001 [5].....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3-6: Obecný průběh vypínacích charakteristik jističů[4].....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 3-7: Vypínací charakteristika jističe BL1600 ($I_{rm}=8kA$)</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 3-8: Distribuční trafostanice.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 3-9: Vnitřní prostory trafostanice</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 3-10: Rozváděč nn</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 4-1: Příklad rozložení sítě prvků</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 5-1: Model kontaktů jedné fáze</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 5-2: Celkový pohled.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 5-3: Horní pohled.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 5-4: Pohled z přední strany.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 5-5: Pohled z levé strany.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 5-6: Pohled z pravé strany</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 6-1: Nastavení analýzy.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 6-2: Nastavení proudu</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 6-3: Rozmístění souřadného systému</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 6-4: Popis kontaktů.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 6-5: Působící síly v ose kontaktu.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 6-6: Vzdálenosti v jednotlivých osách</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 6-7: Určení výsledné síly F_{celk}</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 7-1: Směr výsledných sil $F(x)$ a poměr jejich velikostí.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 9-1: Nastavení analýzy.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 9-2: Nastavení proudů</i>	<i>55</i>

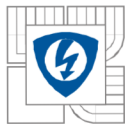


<i>Obrázek 9-3: Nastavení času výpočtu</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 11-1: Proudovodná dráha s obloukem na opalovacích kontaktech.....</i>	<i>71</i>

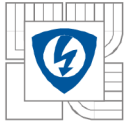


SEZNAM TABULEK

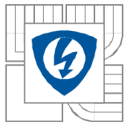
<i>Tabulka 3-1: Materiály kontaktů.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 3-2:Meze vypínacích charakteristik podle ČSN EN 60947-2[5].....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 6-1: Moment působící v první fázi</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 6-2: Moment působící v druhé fázi</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 6-3: Moment působící v třetí fázi.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 6-4: Síla působící v první fázi.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 6-5: Síla působící v druhé fázi.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 6-6: Síla působící v třetí fázi</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 6-7: Síla F_z a F_y působící v první fázi.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 6-8: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 6-9: Síla F_z a F_y působící v třetí fázi.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 6-10: Přítlačné síly a tvrdost kontaktů.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 6-11: Síla v proudové úžině (Fáze 1).....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 6-12: Síla v proudové úžině (Fáze 2).....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 6-13: Síla v proudové úžině (Fáze 3).....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 6-14: Výsledná odpudivá síla (Fáze 1)</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 6-15: Výsledná odpudivá síla (Fáze 2)</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 6-16: Výsledná odpudivá síla (Fáze 3)</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 7-1: Posuvné síly působící v první fázi</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 7-2: Posuvné síly působící v druhé fázi.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 7-3: Posuvné síly působící v třetí fázi</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 8-1: Moment působící v první fázi</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 8-2: Moment působící v druhé fázi</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 8-3: Moment působící ve třetí fázi</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 8-4: Výsledná odpudivá síla (Fáze 1).....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 8-5: Výsledná odpudivá síla (Fáze 2).....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 8-6: Výsledná odpudivá síla (Fáze 3).....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 11-1: Síla působící na pohyblivé kontakty (fáze1).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 11-2: Síla působící na pohyblivé kontakty (fáze2).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 11-3: Síla působící na pohyblivé kontakty (fáze3).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 11-4: Se zhášecí komorou.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka 11-5: Bez zhášecí komory.....</i>	<i>73</i>



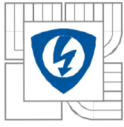
<i>Tabulka 11-6: Se zhášecí komorou.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka 11-7: Bez zhášecí komory.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka 11-8: Se zhášecí komorou.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabulka 11-9: Bez zhášecí komory.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabulka A-1: Síla působící v první fázi</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka A-2: Síla působící v druhé fázi.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka A-3: Síla působící v třetí fázi</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka A-4: Síla F_z a F_y působící v první fázi.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka A-5: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka A-6: Síla F_z a F_y působící v třetí fázi</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka A-7: Síla v proudové úžině (Fáze 1).....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka A-8: Síla v proudové úžině (Fáze 2).....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka A-9: Síla v proudové úžině (Fáze 3).....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka B-1: Moment působící v první fázi (10kA)</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka B-2: Moment působící v druhé fázi (10kA)</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka B-3: Moment působící ve třetí fázi (10kA)</i>	<i>81</i>
<i>Tabulka B-4: Síla působící v první fázi (10kA).....</i>	<i>82</i>
<i>Tabulka B-5: Síla působící v druhé fázi (10kA).....</i>	<i>82</i>
<i>Tabulka B-6: Síla působící v třetí fázi (10kA).....</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka B-7: Síla F_z a F_y působící v první fázi (10kA)</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka B-8: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi (10kA)</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka B-9: Síla F_z a F_y působící v třetí fázi (10kA).....</i>	<i>85</i>
<i>Tabulka B-10: Odpudivé síly v proudové úžině – 10kA (Fáze 1).....</i>	<i>86</i>
<i>Tabulka B-11: Odpudivé síly v proudové úžině – 10kA (Fáze 2).....</i>	<i>86</i>
<i>Tabulka B-12: Odpudivá síla v proudové úžině – 10kA (Fáze 3)</i>	<i>87</i>
<i>Tabulka B-13: Výsledná odpudivá síla (Fáze 1).....</i>	<i>88</i>
<i>Tabulka B-14: Výsledná odpudivá síla (Fáze 2).....</i>	<i>88</i>
<i>Tabulka B-15: Výsledná odpudivá síla (Fáze 3).....</i>	<i>89</i>
<i>Tabulka C-1: Moment působící v první fázi (25kA).....</i>	<i>90</i>
<i>Tabulka C-2: Moment působící v druhé fázi (25kA).....</i>	<i>90</i>
<i>Tabulka C-3: Moment působící ve třetí fázi (25kA).....</i>	<i>91</i>
<i>Tabulka C-4: Síla působící v první fázi (25kA).....</i>	<i>92</i>
<i>Tabulka C-5: Síla působící v druhé fázi (25kA).....</i>	<i>92</i>



<i>Tabulka C-6: Síla působící v třetí fázi (25kA)</i>	<i>93</i>
<i>Tabulka C-7: Síla F_z a F_y působící v první fázi (25kA)</i>	<i>94</i>
<i>Tabulka C-8: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi (25kA)</i>	<i>94</i>
<i>Tabulka C-9: Síla F_z a F_y působící v třetí fázi (25kA)</i>	<i>95</i>
<i>Tabulka C-10: Odpudivá síla v proudové úžině – 25kA (Fáze 1)</i>	<i>96</i>
<i>Tabulka C-11: Odpudivé síly v proudové úžině - 25kA (Fáze 2)</i>	<i>96</i>
<i>Tabulka C-12: Odpudivé síly v proudové úžině - 25kA (Fáze 3)</i>	<i>97</i>
<i>Tabulka C-13: Výsledná odpudivá síla - 25kA (Fáze 1)</i>	<i>98</i>
<i>Tabulka C-14: Výsledná odpudivá síla - 25kA (Fáze 2)</i>	<i>98</i>
<i>Tabulka C-15: Výsledná odpudivá síla - 25kA (Fáze 3)</i>	<i>99</i>
<i>Tabulka D-1: Moment působící v první fázi (65kA)</i>	<i>100</i>
<i>Tabulka D-2: Moment působící v druhé fázi (65kA)</i>	<i>100</i>
<i>Tabulka D-3: Moment působící v třetí fázi (65kA)</i>	<i>101</i>
<i>Tabulka D-4: Síla působící v první fázi (65kA)</i>	<i>102</i>
<i>Tabulka D-5: Síla působící v druhé fázi (65kA)</i>	<i>102</i>
<i>Tabulka D-6: Síla působící v třetí fázi (65kA)</i>	<i>103</i>
<i>Tabulka D-7: Síla F_z a F_y působící v první fázi (65kA)</i>	<i>104</i>
<i>Tabulka D-8: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi (65kA)</i>	<i>104</i>
<i>Tabulka D-9: Síla F_z a F_y působící ve třetí fázi (65kA)</i>	<i>105</i>
<i>Tabulka D-10: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 1)</i>	<i>106</i>
<i>Tabulka D-11: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 2)</i>	<i>106</i>
<i>Tabulka D-12: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 3)</i>	<i>107</i>
<i>Tabulka D-13: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 1)</i>	<i>108</i>
<i>Tabulka D-14: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 2)</i>	<i>108</i>
<i>Tabulka D-15: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 3)</i>	<i>109</i>
<i>Tabulka E-1: Moment působící v první fázi (65kA)</i>	<i>110</i>
<i>Tabulka E-2: Moment působící v druhé fázi (65kA)</i>	<i>110</i>
<i>Tabulka E-3: Moment působící v třetí fázi (65kA)</i>	<i>111</i>
<i>Tabulka E-4: Síla působící v první fázi (65kA)</i>	<i>112</i>
<i>Tabulka E-5: Síla působící v druhé fázi (65kA)</i>	<i>112</i>
<i>Tabulka E-6: Síla působící v třetí fázi (65kA)</i>	<i>113</i>
<i>Tabulka E-7: Síla F_z a F_y působící v první fázi (65kA)</i>	<i>114</i>
<i>Tabulka E-8: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi (65kA)</i>	<i>114</i>

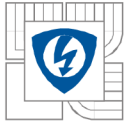


<i>Tabulka E-9: Síla F_z a F_y působící v třetí fázi (65kA).....</i>	<i>115</i>
<i>Tabulka E-10: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 1).....</i>	<i>116</i>
<i>Tabulka E-11: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 2).....</i>	<i>116</i>
<i>Tabulka E-12: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 3).....</i>	<i>117</i>
<i>Tabulka E-13: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 1).....</i>	<i>118</i>
<i>Tabulka E-14: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 2).....</i>	<i>118</i>
<i>Tabulka E-15: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 3).....</i>	<i>119</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

F [N]	Elektrodynamická síla
B [T]	Magnetická indukce
i [A]	Elektrický proud
i_1 [A]	Elektrický proud tekoucí vodičem 1
i_2 [A]	Elektrický proud tekoucí vodičem 2
l [m]	Délka vodiče
l_1 [m]	Délka vodiče l_1
l_2 [m]	Délka vodiče l_2
a [m]	Vzdálenost mezi vodiči
b [m]	Šířka vodiče
h [m]	Výška vodiče
k_p [-]	Činitele tvaru průřezu vodiče
L [H]	Indukčnost
t [s]	Čas
M_i [Nm]	Moment působící na rameno délky l
D [m ²]	Rozměry pevného kontaktu
I_{nt} [A]	Smluvený nevypínací proud
I_t [A]	Smluvený vypínací proud
I_p [A]	Předpokládaný proud
φ [°]	Fázový posuv
M [Nm]	Moment
F_z [N]	Síla v ose kontaktu z
F_y [N]	Síla v ose kontaktu y
F_u [N]	Odpudivá síla v proudové úžině
$F_{celk.}$ [N]	Výsledná odpudivá síla



1 ÚVOD

Prochází-li elektrickým přístrojem elektrický proud, vznikají elektrodynamické síly, které při poruše, především při zkratu, významně ovlivňují namáhání jednotlivých částí přístroje. Nejkritičtějším místem proudovodné dráhy jsou kontakty. Kontakty jsou při spínání namáhány nejen elektrodynamickými silami, ale také tepelnými účinky. Proto jsou na kontakty přístroje kladeny velké nároky, musí splňovat následující požadavky:

- odolnost proti mechanickému opotřebení
- odolnost proti svaření při spínání
- odolnost proti opalu elektrickým obloukem
- nízký stykový odpor
- dobrá elektrická a tepelná vodivost

Na kontaktní ústrojí působí elektrodynamické síly hned z několika příčin. Prvně je to síla vyvolaná průchodem zkratového proudu, skrze jednotlivé záhyby proudovodné dráhy v místě kontaktního ústrojí. Další nezanedbatelnou složkou je odpudivá síla v proudové úžině, která vzniká průchodem zkratového proudu v místě styku kontaktů. V neposlední řadě působí na kontaktní ústrojí síla, způsobená blízkostí feromagnetického rozhraní, v našem případě feromagnetické rozhraní tvoří ocelové desky zhášecí komory. Aby byly tyto síly správně využity, je potřeba se pečlivě zabývat geometrií proudovodné dráhy. V diplomové práci jsou proto provedeny výpočty elektrodynamických sil, na kontaktním ústrojí jističe BL1600 od firmy OEZ Letohrad. Jednotlivé kapitoly jsou zaměřeny na:

- stacionární výpočet sil pro ustálený proud 2, 5, 10, 15, 25, 36, 50 a 65 kA
- stacionární výpočet sil působících mezi kontakty
- stacionární výpočet sil se zanedbáním zhášecí komory
- dynamický výpočet sil pro ustálený proud 10, 25 a 65 kA
- dynamický výpočet sil pro proud 65 kA s přechodovým jevem
- stacionární výpočet sil působících na elektrický oblouk

2 SILOVÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU

Prochází-li proudovou dráhou elektrického zařízení proud, vznikají elektrodynamické síly, které způsobují mechanické namáhání. Toto mechanické namáhání může při zkratu dosahovat velkých hodnot. Příčinou vzniku síly v elektrických zařízeních je existence magnetických polí, která na sebe vzájemně působí. [1],[2]

Síla působící na náboj pohybující se v magnetickém poli je úměrná velikosti náboje q a vektorového součinu rychlosti náboje a magnetické indukce v daném bodě:[3]

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (2.1)$$

Dosadíme-li do vztahu (2.1) za rychlost náboje $v = dl / dt$ a za náboj $dq = i \cdot dt$ získáme sílu působící na element proudového vlákna, kterým prochází elektrický proud a je umístěn v magnetickém poli:

$$d\vec{F} = i[d\vec{l} \times \vec{B}] \quad (2.2)$$

Potom na proudové vlákno o délce l bude působit síla:

$$\vec{F} = i \int_l d\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

2.1 Síly mezi několika proudovými dráhami

Tuto úlohu si rozdělíme do tří částí:

- Proudové dráhy si nahradíme proudovými vlákny a uvažujeme nekonečně dlouhý vodič.
- Proudové dráhy si nahradíme proudovými vlákny a uvažujeme vodič konečné délky l .
- Uvažujeme reálné průřezy.

2.1.1 Náhrada proudovými vlákny a nekonečně dlouhý vodič

Nejčastěji se v elektrických přístrojích setkáváme se situací, kdy vodiče jsou rovnoběžné.

Obecný vztah pro výpočet síly mezi rovnoběžnými proudovodnými vlákny, z nichž budící vodič I_2 je nekonečně dlouhý a vzdálenost mezi vodiči je a :

$$F_1 = \frac{2l_1}{a} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot 10^{-7} \quad (2.5)$$

[3]

2.1.2 Náhrada proudovými vlákny a vodič konečné délky

V tuto chvíli budeme konkretizovat, že budící vodič l_2 nebude nekonečně dlouhý, ale bude mít reálnou délku l_2 . Poté výsledný vztah určíme jako:

$$F_1 = \frac{2l_1}{a} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{a}{l_1}\right)^2 + 1} - \frac{a}{l_1} \right] \cdot 10^{-7} \quad (2.6)$$

Při porovnání vztahů (2.6) a (2.5) vidíme, že u nově vzniklého vztahu přibyla hranatá závorka, která reprezentuje, jak se změní velikost síly, uvažujeme-li dva vodiče omezené délky. Tento člen v hranaté závorce se značí k_d a nazývá se činitel uspořádání vodičů konečné délky.

Pro dvě nestejně dlouhá proudová vlákna, která jsou souměrně uspořádána, je činitel uspořádání:

$$k_d = \sqrt{1 - \frac{(l_1 + l_2)^2}{4a^2}} - \sqrt{1 + \frac{(l_2 - l_1)^2}{4a^2}} \quad (2.7)$$

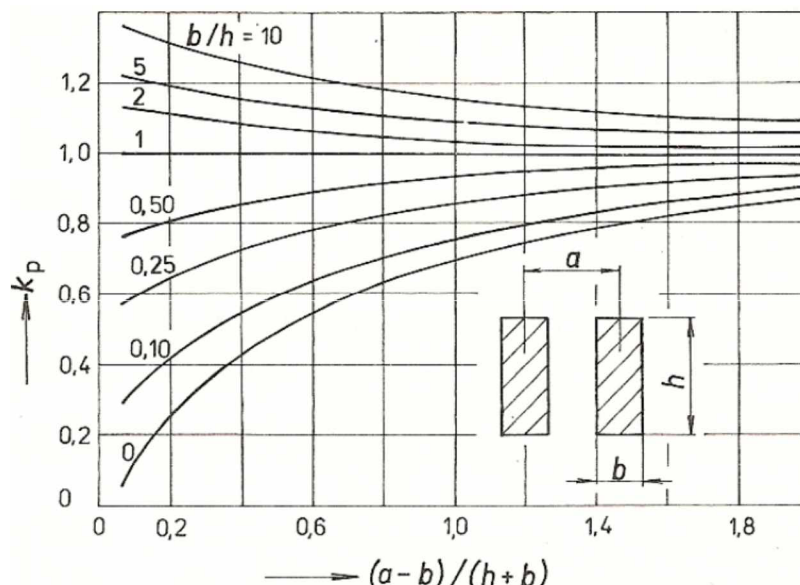
Pro dvě nestejně dlouhá proudová vlákna, která jsou nesouměrně uspořádána, je činitel uspořádání:

$$k_d = \frac{1}{2} \left[\frac{l_1 + l_2}{a} + \sqrt{\frac{(l_2 + l_1)^2}{a^2} + 1} - \frac{l_2}{a} - \sqrt{\frac{l_2^2}{a^2} + 1} \right] \quad (2.8)$$

[2]

2.1.3 Uvažujeme reálné průřezy

Předchozí dvě varianty, kde jsme proudovodnou dráhu nahradili proudovými vlákny, vyhovují především vodičům kruhového průřezu. V případě, kdy vodiče jsou robusní a mají pravoúhlý průřez, nebude působící síla stejná. Jelikož velikost magnetického pole buzeného vodiče pravoúhlého průřezu, je vůči magnetickému poli buzeného proudovými vlákny odlišná. Sílu vypočítanou podle vztahu (2.5) je potřeba vynásobit opravným činitelem k_p . [3]



$$\frac{b}{h} \leq 1; \quad k_p = 1 - \frac{0,12}{\frac{a-b}{h+b} + \frac{b}{h}} \quad (2.9)$$

$$\frac{b}{h} > 1; \quad k_p = 1 + \frac{0,12}{\frac{a-b}{h+b} + \frac{h}{b}} \quad (2.10)$$

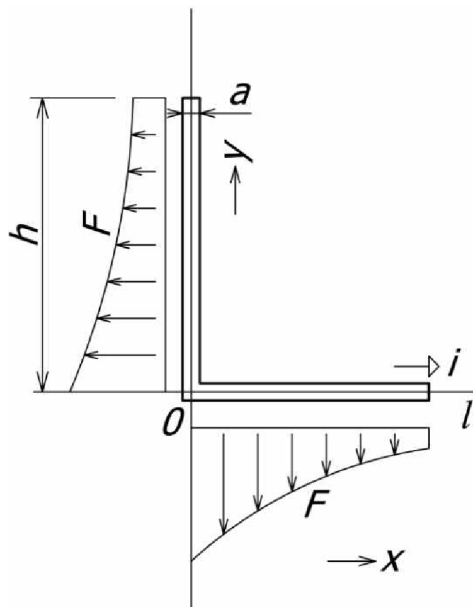
Obrázek 2-1: Závislost činitele tvaru průřezu vodiče na uspořádání proudovodičů [2]

2.2 Elektrodynamické síly v zakřivené proudové dráze

Elektrodynamické síly v zakřivené dráze vypočítáme tak, že proudovodnou dráhu rozdělíme na přímé úseky konečné délky a poté počítáme vzájemné síly.[2]

2.2.1 Jednoduchý pravoúhlý záhyb

Nejprve si výpočet určíme pro jednoduchý pravoúhlý záhyb ve tvaru písmene „L“ jak je zobrazen na (obr.2-2).



Obrázek 2-2: Průběh síly působící na pravoúhlý proudový záhyb[19]

Velikost síly působící na proudovodnou dráhu v ose x, která bude zatěžovat celou délku l počítáme (rozložení síly je vidět na obrázku 2-2):

$$F_l = i^2 \ln \left(\frac{2l h + \sqrt{h^2 + (a/2)^2}}{a h + \sqrt{h^2 + l^2}} \right) \cdot 10^{-7} \quad (2.11)$$

Poté co jsme určili působící sílu F_l , si vypočítáme celkový moment M_l působící na rameno l :

$$M_l = i^2 h \ln \left(\frac{l + \sqrt{h^2 + l^2}}{\frac{a}{2} + \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}} \right) \cdot 10^{-7} \quad (2.12)$$

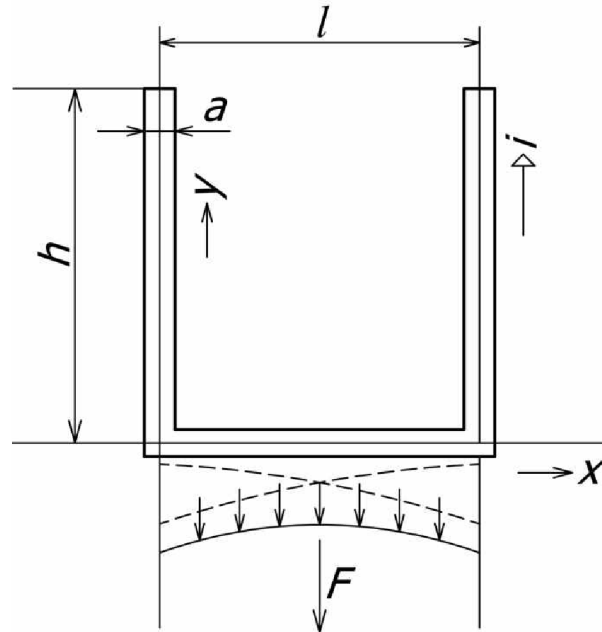
Nakonec vypočítáme vzdálenost těžiště síly F_l od osy proudovodné dráhy h :

$$l = \frac{M_l}{F_l} \quad (2.13)$$

Stejným postupem bychom vypočítali sílu F_h , která působí na rameno h , celkový moment M_h a také vzdálenost těžiště síly F_h od osy proudovodné dráhy l .

2.2.2 Dvojitý pravouhlý záhyb

U spínacích přístrojů nízkého a vysokého napětí se velmi často setkáváme s tvarem proudovodné dráhy „dvojitý pravouhlý záhyb“. Výpočet působící síly, na dva svislé úseky, provádíme stejným postupem, jak bylo popsáno v kapitole 2.2.1. Rozdíl nastává u spodní části proudovodné dráhy, na kterou působí dva svislé úseky délky h . Zde je výsledná síla dvojnásobná a bude rozložena podle obr. 2-3. [3]



Obrázek 2-3: Průběh síly působící na spodní část proudovodné dráhy[3]

Sílu F_l vypočítáme:

$$F_l = 2 \cdot i^2 \ln \left(\frac{2l h + \sqrt{h^2 + (a/2)^2}}{a h + \sqrt{h^2 + l^2}} \right) \cdot 10^{-7} \quad (2.14)$$

Působíště výsledné síly F_l je umístěno ve středu délky l . V případě nesymetrie svislých částí proudovodné dráhy se působíště výsledné síly posouvá blíže k delšímu rameni. [3]

2.3 Elektrodynamické síly proudové dráhy v blízkosti feromagnetického rozhraní

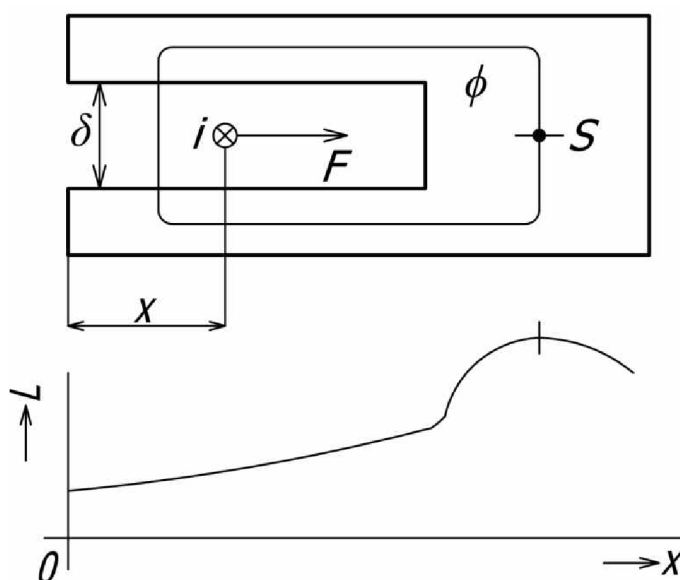
V elektrických přístrojích se působení elektrodynamických sil na proudovodnou dráhu, v blízkosti feromagnetika, využívá především v kovové zhášecí komoře magnetických vypínačů. V tomto případě nám zde proudovodnou dráhu představuje elektrický oblouk. Zhášecí komora je tvořena upravenými ocelovými deskami, které mají specifické výřezy. V prostoru těchto výřezů se nachází pohybující se elektrický oblouk. Velikost vzniklé síly, která vtahuje elektrický oblouk do prostoru zhášecí komory, můžeme určit ze změny energie nahromaděné v magnetickém poli oblouku.[2],[3]

$$F = \frac{dW_m}{dx} \quad \text{kde} \quad W_m = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.15)$$

Za předpokladu, že se proud i nebude měnit, určíme sílu:

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} \quad (2.16)$$

Ze vztahu (2.16) je vidět, že vzniklá síla je závislá na indukčnosti. Závislost $L = f(x)$ určíme měřením. Pohybuje-li se oblouk v ose štěrbiny, roste jeho indukčnost, až do bodu S, kde dosáhne svého maxima (obr. 2.2). Při dalším pohybu ve směru osy x indukčnost začne klesat. Z derivace závislosti $L = f(x)$ vyplývá, že v bodě S se změnil směr síly. [2],[3]



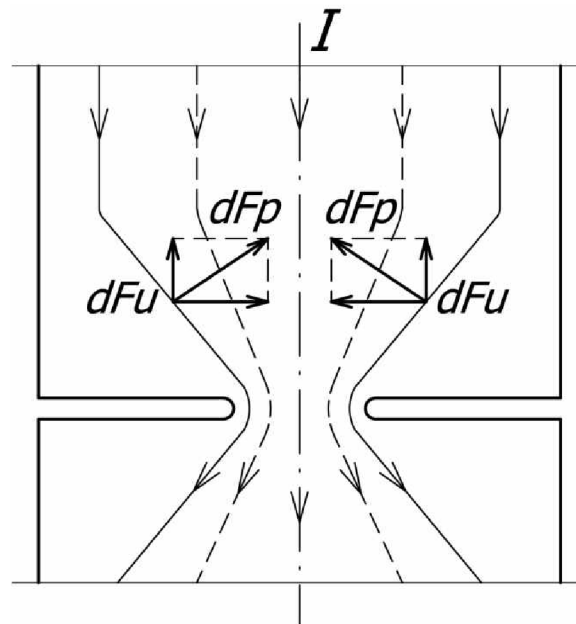
Obrázek 2-4: Síla vtahující oblouk do ocelové roštové komory[3]

Použijeme-li při konstrukci zhášecí komory n plechů, kterými bude procházet elektrický oblouk, tím se nám n krát zvětší síla. Toto je jeden z typických příkladů, kdy uměle zvětšujeme sílu působící na část proudovodné dráhy.[2]

2.4 Odpudivé síly mezi kontakty

Jelikož proud neprochází celou styčnou plochou kontaktů, ale pouze tzv. stykovými úžinami vznikají mezi kontakty odpudivé síly. Zabýváme-li se konstrukcí kontaktů, je potřeba s těmito silami počítat.

Nastane-li situace, kdy součet odpudivých sil F_u je větší než síla přítlačná $F_{přtl.}$, dochází při průchodu zkratového proudu k odskoku kontaktů. Při odskoku vzniká elektrický oblouk, který může natavit kontakty a při následném dosednutí může dojít ke svaření. Tento jev je velice nežádoucí, jelikož při svaření kontaktů dochází nejčastěji k selhání přístroje. Při částečném svaření, kdy přístroj ještě dokáže vypnout, dochází k vytrhnutí materiálu z kontaktu a tím ke zkracování životnosti.[3]



Obrázek 2-5: Síly v proudové úžině [3]

Celkovou odpudivou sílu F_u v jedné úžině vypočítáme:

$$F_u = 10^{-7} I^2 \ln \frac{D}{a} \quad [N; A, m] \quad (2.17)$$

Celkovou odpudivou sílu F_u v n nezávislých úžin vypočítáme:

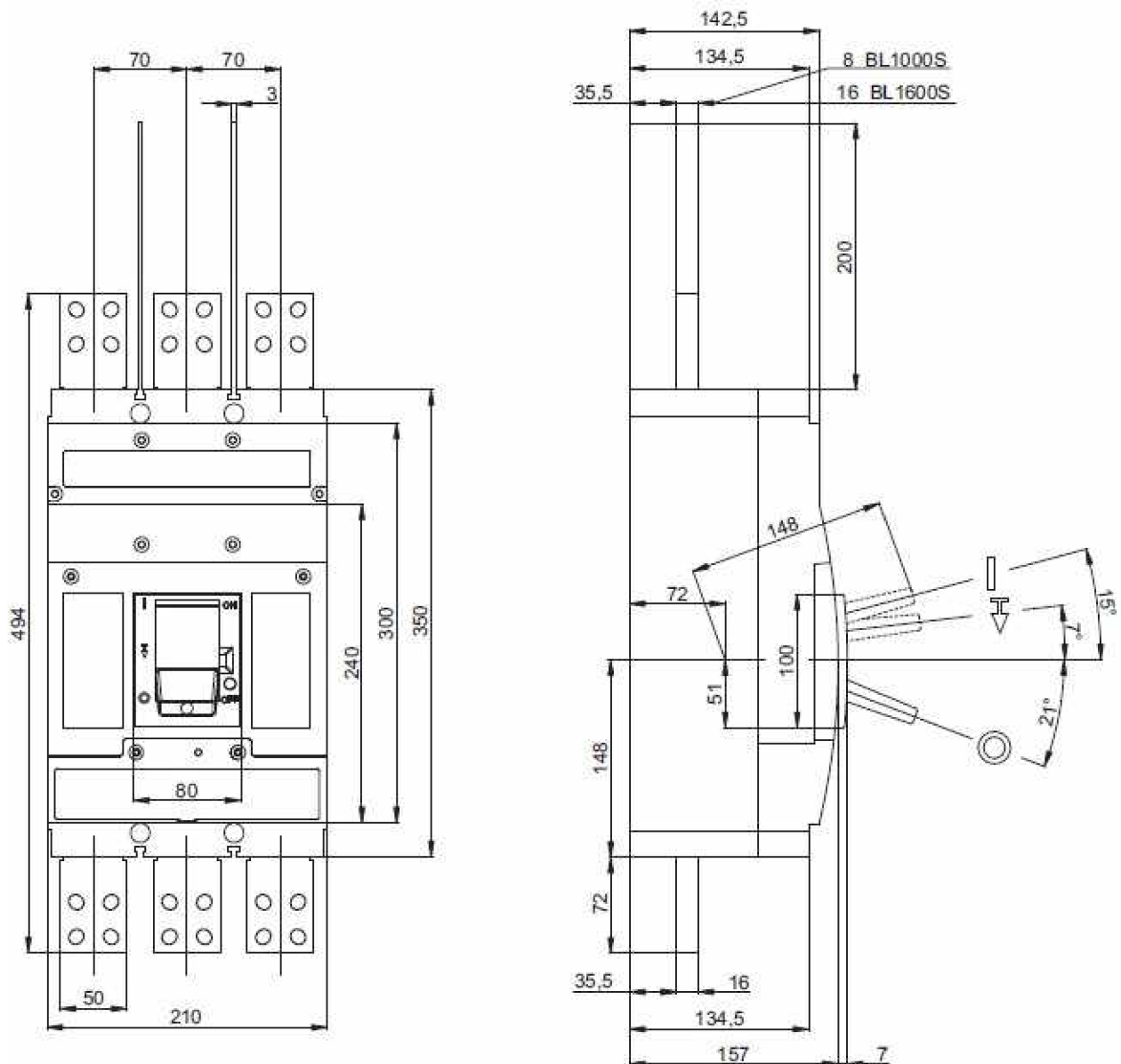
$$n \cdot F_u = n \cdot \frac{I^2}{n} \cdot \ln \frac{D\sqrt{n}}{a} \cdot 10^{-7} \quad [N; A, m] \quad (2.18)$$

3 KOMPAKTNÍ JISTIČ BL1600

Jistič je mechanický spínací přístroj schopný zapínat, vést a vypínat proudy za normálních podmínek obvodu (provozní spínání), ale i zapínat, po stanovenou dobu vést a samočinně vypínat poruchové proudy, včetně zkratových, do mezí svých spínacích schopností.[1],[6]

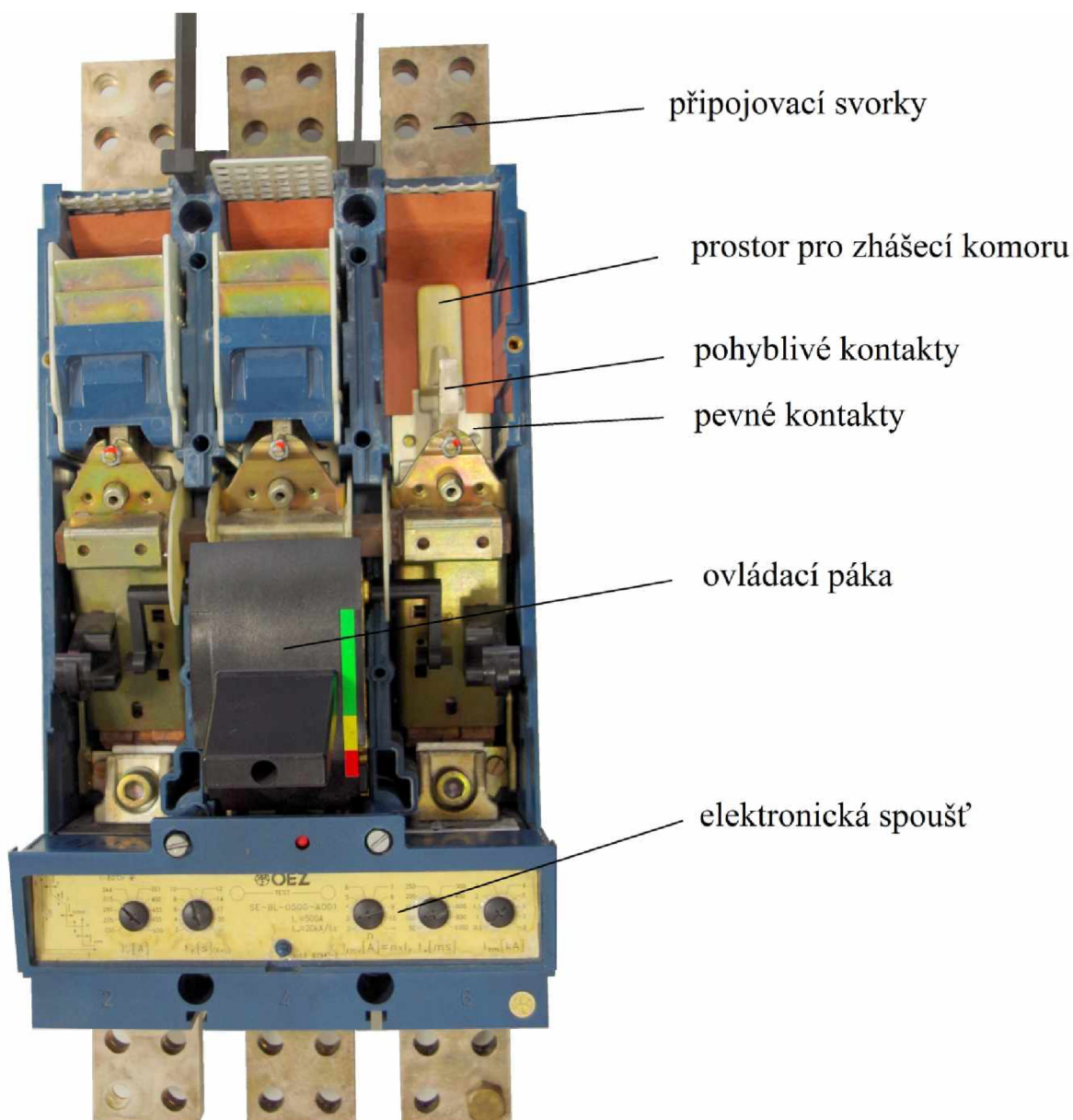
Jistič musí zajistit ochranu jak vedení, tak spotřebičů. Nesmí dojít k jeho poškození ani při vypínání velkých nadproudů, aby bylo možno opětovného zapnutí. Jistič je tedy prvek, který byl vyvinut jako náhrada pojistky. Hlavní výhodou jističe oproti pojistce je, že ho lze po jeho samočinném vypnutí znovu zapnout.[1],[2]

Kompaktní jističe od firmy OEZ Letohrad jsou určeny pro jištění elektrických zařízení se jmenovitými proudy od 12 A až do 1600 A. Tento široký rozsah spínání zajišťuje řada jističů BC160, BD250, BH630, BL1000 a BL1600. Hlavním úkolem těchto jističů je chránit zařízení před přetížením a zkratem. Mezi nejnepřítější využití těchto kompaktních jističů patří jištění vedení, motorů a distribučních transformátorů.[4]



Obrázek 3-1: Rozměry jističe BL1600

3.1 Konstrukce jističe BL 1600



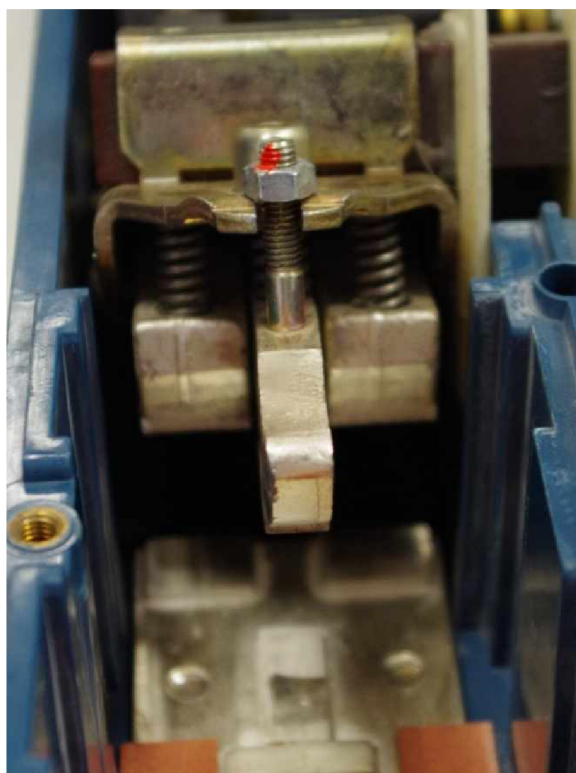
Obrázek 3-2: Jistič BL1600

Základními funkčními prvky běžného jističe jsou:

Kontaktní systém, který je u tohoto jističe tvořen třemi kontakty pevnými a třemi kontakty pohyblivými. Prostřední kontakt je tzv. opalovací a to z toho důvodu, že při spínání obvodu vzniká mezi kontakty elektrický oblouk. Tímto konstrukčním uspořádáním prodlužujeme životnost ostatním kontaktům. Od kontaktů se požaduje, aby byly plně funkční jak v provozním, tak poruchovém stavu. Musejí tedy odolávat mechanickému i tepelnému namáhání.[1],[6]

Tabulka 3-1: Materiály kontaktů

Kontakt	Materiál	Přítlačná síla F [N]	Tvrдость[MPa]
Pevný kontakt – hlavní	AgC5	-	410
Pevný kontakt – opalovací	AgW75	-	625
Pohyblivý kontakt – hlavní	AgW50	70	450 - 575
Pohyblivý kontakt – opalovací	AgW75	130	625



Obrázek 3-3: Detail kontaktů jističe BL1600

Spínací systém slouží ke spínání jističe. Rozeznáváme systém manuální a automatický. Manuální spínání provádí obsluha pomocí páky a impuls pro automatické spínání vysílá elektronická spoušť. Základním prvkem je volnoběžka. Volnoběžka je systém zlomených pák držených v zapnuté poloze západkou proti síle vypínací pružiny. Trvá-li příčina vypnutí, jistič není možno znovu zapnout. O tuto funkci se stará zapínací zámek s nezávislým vypínáním. Vypnutí jističe také nelze zabránit tím, že by byla rukou držena zapínací páka zámku, v poloze zapnuto.[1],[6]

Zhášecí systém slouží ke zhášení elektrického oblouku. O zhášení oblouku se stará zhášecí komora, která nám vzniklý oblouk rozdělí na několik obloučků v sérii. Tím dochází ke zvýšení obloukového napětí a rychlejšímu uhašení oblouku.[1],[6]



Obrázek 3-4: Zhášecí komora jističe BL1600

Elektronická nadproudová spoušť měří velikost procházejícího proudu jističem. Hlavním úkolem této spouště je dát impuls k vypnutí jističe, dojde-li k překročení hodnoty proudu, která je určena vypínací charakteristikou jističe. Nejčastěji jsou řešeny pomocí diskretních součástek a integrovaných obvodů. O samotné přerušování procházejícího proudu na základě impulsu od nadproudové spouště se stará spínací systém.[4]



Obrázek 3-5: Elektronická nadproudová spoušť SE-BL-1600-U001 [5]

3.2 Vypínací charakteristiky

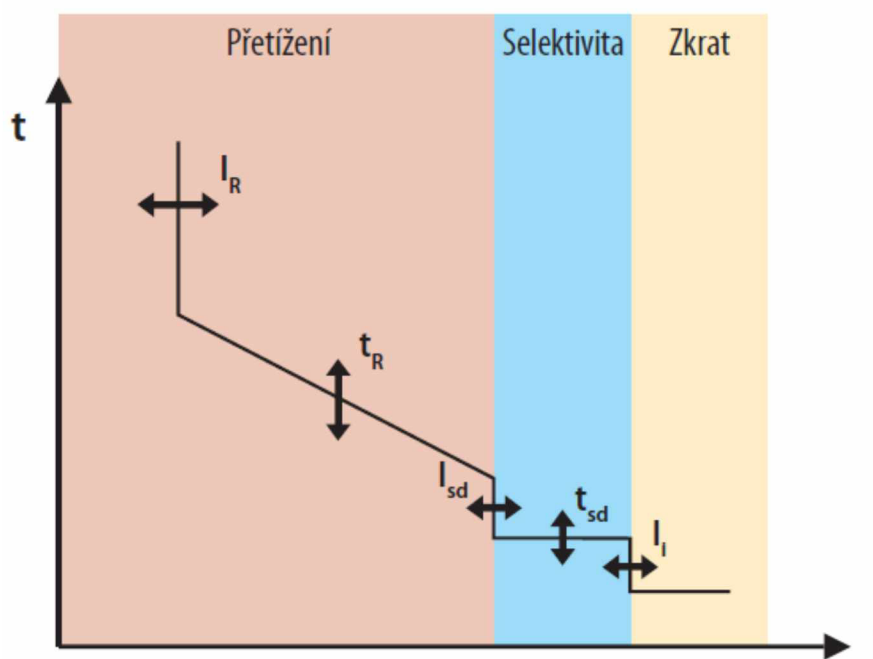
Vypínací charakteristika vyjadřuje závislost celkového vypínacího času jističe v závislosti na proudu, který jističem prochází. Vypínací charakteristika je rozdělena do několika částí.

V první části je zařízení chráněno proti přetížení a působí zde „závislá časová spoušť“. Čas vypnutí je nepřímo úměrný velikosti procházejícího proudu. Tvar vypínací charakteristiky v této části je nastaven pomocí parametrů I_R (redukovaný proud) a t_R (vypínací čas při násobku I_R).

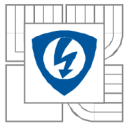
V druhé části je zařízení chráněné proti středním nadproudům a působí zde „časově nezávislá zpožděná (selektivní) spoušť“. Tato spoušť dovoluje nastavit zpoždění až 1000 ms (parametr t_{SD}). Správným nastavením tohoto zpoždění můžeme dosáhnout selektivity se sousedními jisticími prvky.

V třetí části je zařízení chráněno proti velkým nadproudům (zkrat) a působí zde „časově nezávislá spoušť“. Čas vypnutí je nezávislý na velikosti procházejícího proudu, jakmile proud dosáhne stanovené velikosti, jistič okamžitě vypíná. Čas vypnutí se pohybuje v rozmezí 10 až 30 ms.

[4],[5]



Obrázek 3-6: Obecný průběh vypínacích charakteristik jističů[4]



Předmětová norma ČSN EN 60947-2 nám stanovuje několik mezí na vypínací charakteristice jističů pro všeobecné použití. Meze ohraničující první bod vypínací charakteristiky jsou udávány v násobcích jmenovitého proudu jističe a tvoří je:[5]

- a) Smluvený nevypínací proud I_{nt} (proud, při kterém nesmí jistič vypnout do smluvené doby).
- b) Smluvený vypínací proud I_t (proud, při kterém musí jistič vypnout do smluvené doby).

Tabulka 3-2: Meze vypínacích charakteristik podle ČSN EN 60947-2[5]

Jmenovitý proud I_n jističe [A]	Smluvená doba [h]	Smluvený nevypínací proud I_{nt}	Smluvený vypínací proud I_t
$I_n \leq 63$	1	1,05 násobek proudového nastavení	1,3 násobek proudového nastavení
$63 < I_n$	2		

3.2.1 I^2t charakteristiky

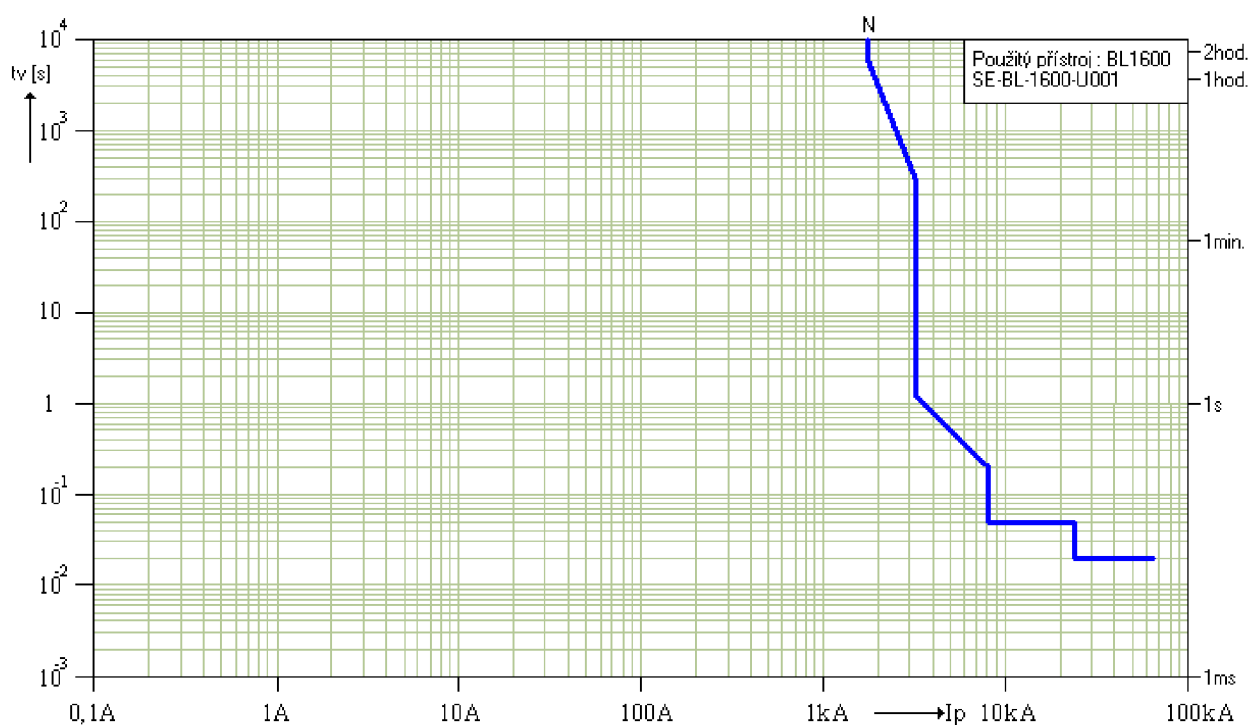
Jouleův integrál jisticího přístroje charakterizuje energii propuštěnou jisticím přístrojem při vypínání zkratových proudů, tj. energii, která svými tepelnými účinky namáhá jištěné zařízení. U jisticích přístrojů se uvádí Jouleův integrál I^2t v závislosti na předpokládaném zkratovém proudu I_p , tedy:[1],[7]

$$I^2t = f(I_p) \quad (3.1)$$

3.3 Parametry jističe BL1600

Počet pólů:	3
Jmenovitý proud I_n :	630,1000,1250,1600A
Jmenovitý trvalý proud I_U :	1600A
Jmenovité pracovní napětí U_e :	max. 690 V a.c.
Jmenovitý kmitočet f_n :	50 / 60 Hz
Jmenovité impulzní výdržné napětí U_{imp} :	8 kV
Jmenovité izolační napětí U_i :	690 V
Kategorie užití (selektivita):	A, B
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud při $U_e = 690$ V a.c. I_{cw}/t :	20kA/1s
Jmenovitá mezní vypínací zkratová schopnost I_{CU}/U_e :	85 kA/230 V a.c. 65 kA/415 V a.c. 45 kA/500 V a.c. 20 kA/690 V a.c.
Doba vypnutí při I_{cu} :	30 ms
Jmenovitá zkratová zapínací schopnost I_{cm} / U_e :	140 kA/415 V a.c.
Rozměry Š x V x H:	210 x 350 x 135 mm

[5]



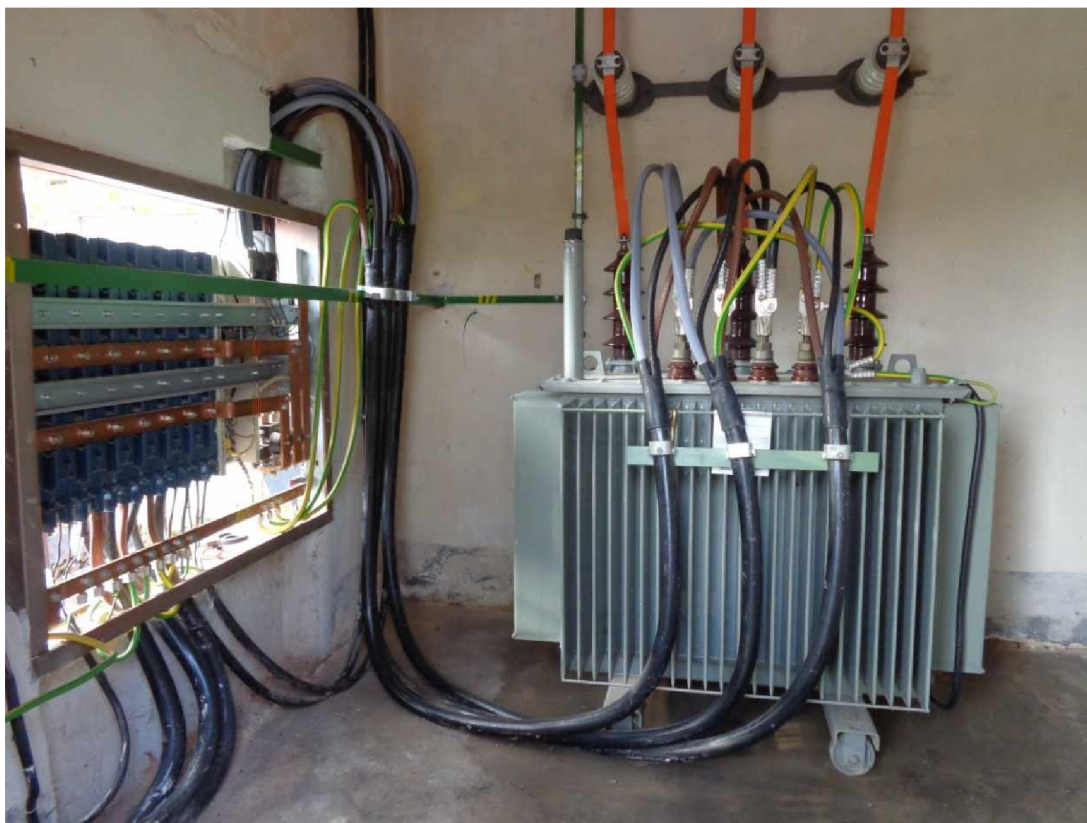
Obrázek 3-7: Vypínací charakteristika jističe BL1600 ($I_{rm}=8$ kA)

3.4 Příklad využití kompaktních jističů Modeion v praxi:

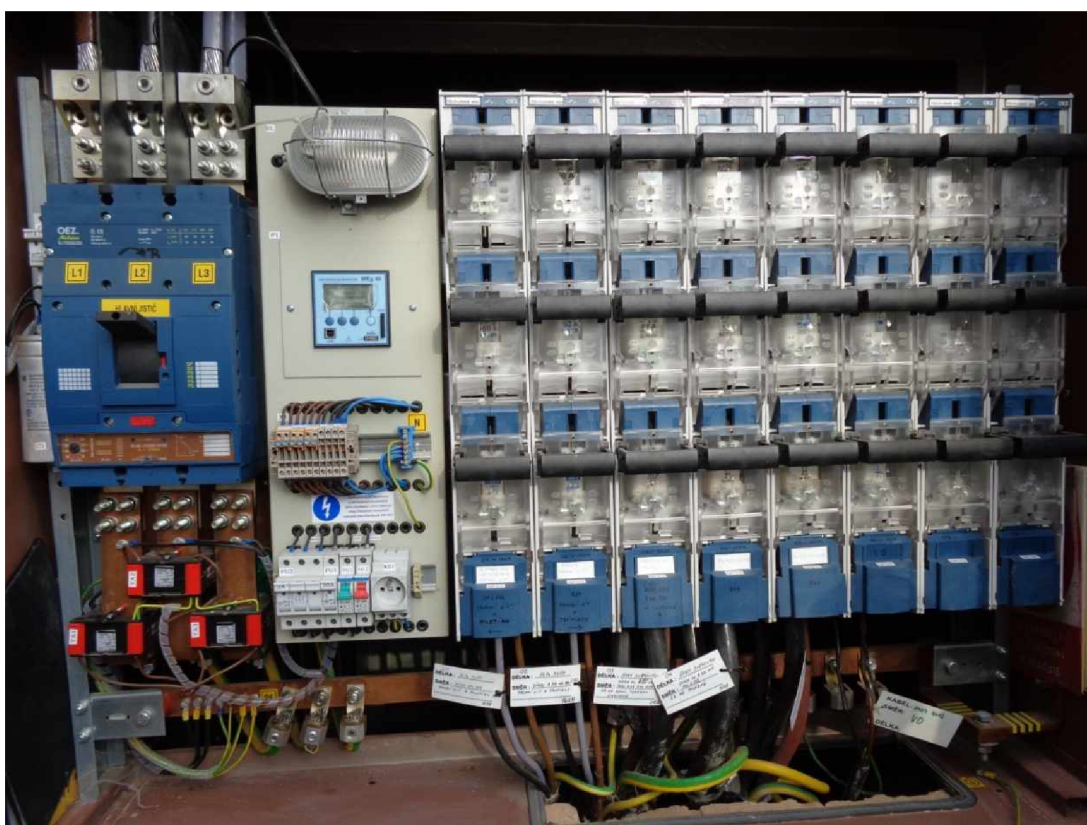
Na obrázcích (3-8) až (3-10) vidíme jedno z typických využití kompaktních jističů Modeion. Zde je jistič BL 1000 využit jako jištění na sekundární straně distribučního transformátoru ELIN. Na obrázku (3-8) vidíme distribuční trafostanici společnosti ČEZ Distribuce, a.s. Tato trafostanice disponuje přívodem o napěťové hladině 35 kV, několika kabelovými vývody a dvěma vývody vrchního vedení o napěťové hladině 0,4kV. Na obrázku (3-9) vidíme vnitřní prostory distribuční trafostanice s umístěním distribučního transformátoru ELIN o výkonu 400kVA. Primární strana je pevně připojena přípojnicí a ze sekundární strany odchází tři kabely o průřezu $3 \times 240 + 120 \text{ mm}^2$. Tyto kabely nám slouží jako propojení mezi transformátorem a kompaktním jističem BL1000, který vidíme na obrázku (3-10). Jistič je umístěn v plechovém rozváděči, který je přístupný z venkovní strany trafostanice. Přívodní kabel je připojen na vrchní straně kompaktního jističe a na jeho vývodu jsou připojeny pevné přípojnice, na které jsou umístěny pojistkové odpínače, také od firmy OEZ.



Obrázek 3-8: Distribuční trafostanice



Obrázek 3-9: Vnitřní prostory trafostanice



Obrázek 3-10: Rozváděč nn

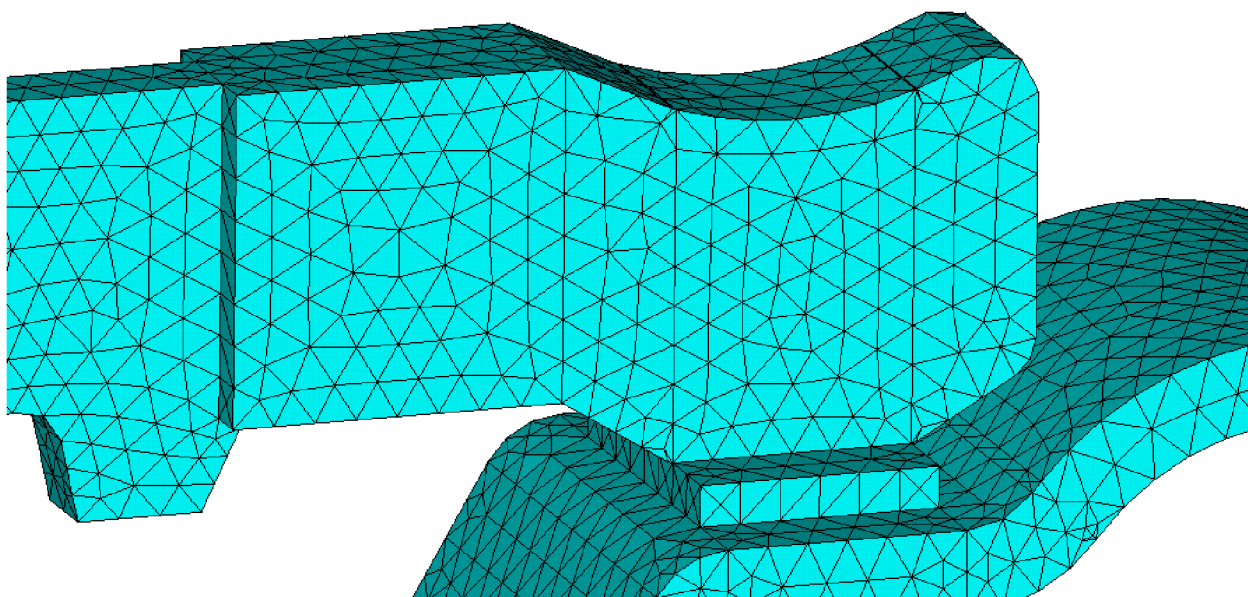
4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků je v současné době nejrozšířenější metoda pro numerické řešení polí popsaných diferenciálními rovnicemi. Oblast, ve které se řeší pole, se pokryje sítí prvků, na kterých se pak aproximuje hledaná veličina pomocí hodnot definovaných v uzlech sítě s použitím vhodně zvolené aproximační funkce. Přesnost získaného řešení závisí na hustotě a tvaru prvků sítě a na volbě aproximační funkce (po částech konstantní, lineární, kvadratická funkce, splajny, polynomy vyšších řádů). Diskretizace rovnic vede na soustavu rovnic pro neznámé uzlové hodnoty. Po vyřešení soustavy rovnic se vyhodnotí další požadované veličiny.

Postup při aplikaci MKP je tedy tvořen těmito kroky:

- Generace sítě prvků s uzly.
- Aproximace potenciálu na jednotlivých prvcích z uzlových hodnot.
- Sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty.
- Vyřešení soustavy.
- Zpracování dodatečných požadavků - výpočet dalších veličin a zobrazení výsledků.

[8]



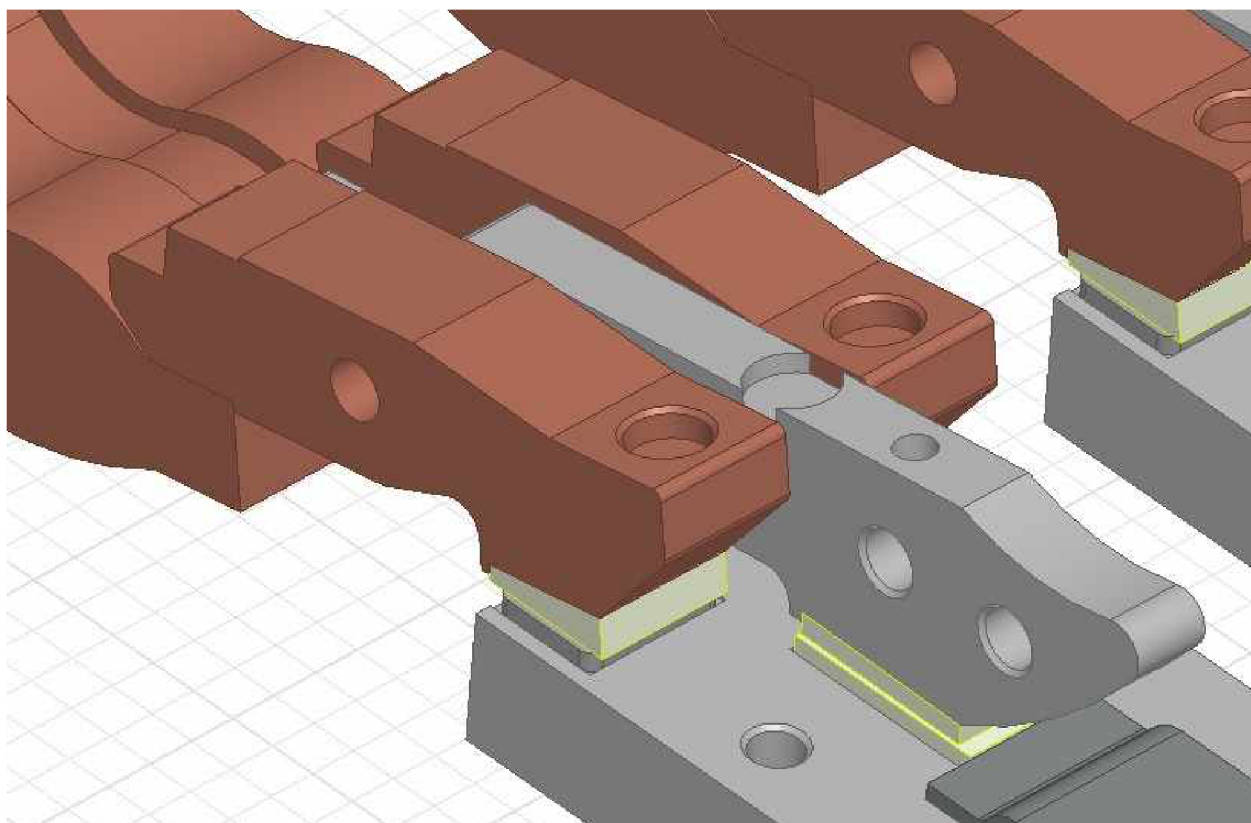
Obrázek 4-1: Příklad rozložení sítě prvků

5 MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY JISTIČE

Geometrie proudovodné dráhy jističe BL 1600 byla dodána firmou OEZ Letohrad. Naším úkolem bylo proudovodnou dráhu upravit a částečně zjednodušit pro následný výpočet dynamických sil působících v místě kontaktů. Dodaná geometrie obsahuje plastové části mezi jednotlivými fázemi a také ovládací mechanismus. Tyto díly, které jsou při výpočtu dynamických sil nepotřebné, odstraníme, jelikož by docházelo k prodlužování doby výpočtu v programu Ansys Maxwell. Pro zjednodušování geometrie proudovodné dráhy využíváme program Autodesk Inventor Professional.

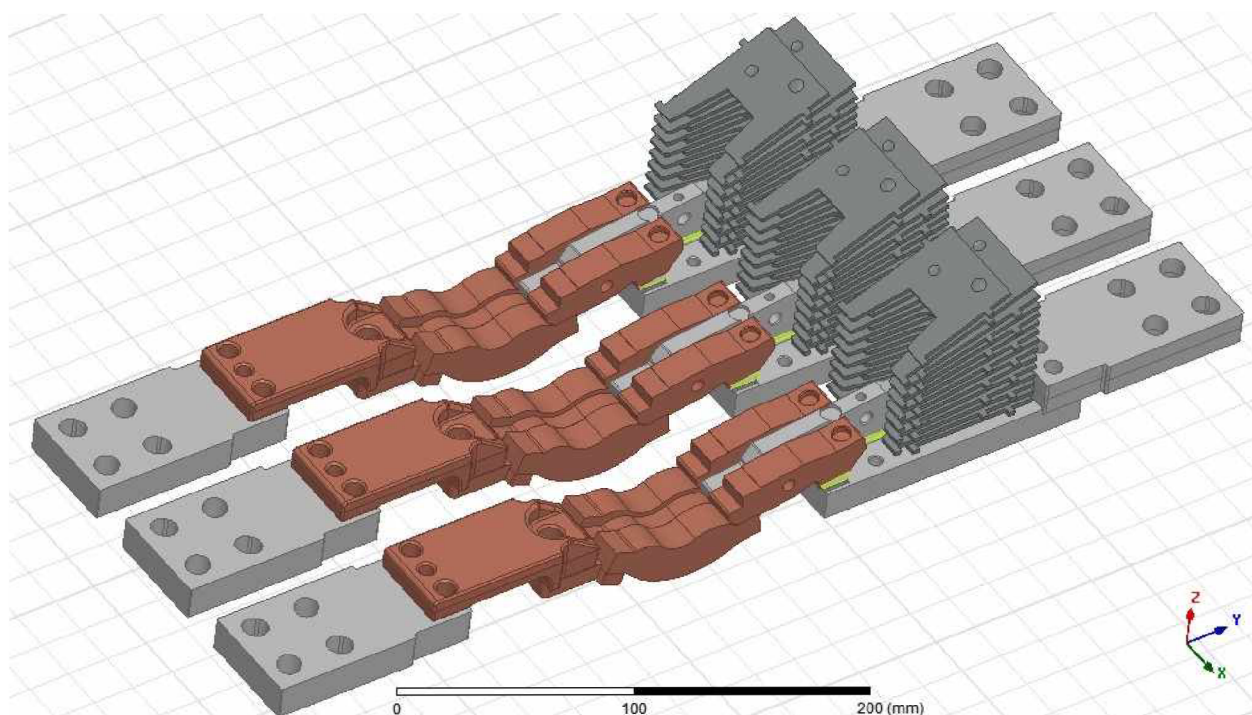
Zjednodušený model se skládá ze 111 prvků, které na sebe musí přesně navazovat. Pro docílení tohoto požadavku, nastavíme u každého z komponent potřebné vazby, které nám jednotlivé díly vzájemně zafixují. Abychom v programu Ansys Maxwell mohli nastavit vzduchové okolí, musíme již zde vytvořit potřebnou geometrii v okolí jističe. Následně tento zjednodušený model importujeme do programu Ansys Maxwell.

Na obrázku (5-1) je zobrazen detailní model kontaktů v jedné fázi. Jsou zde vidět tři kontakty pohyblivé a tři kontakty pevné.

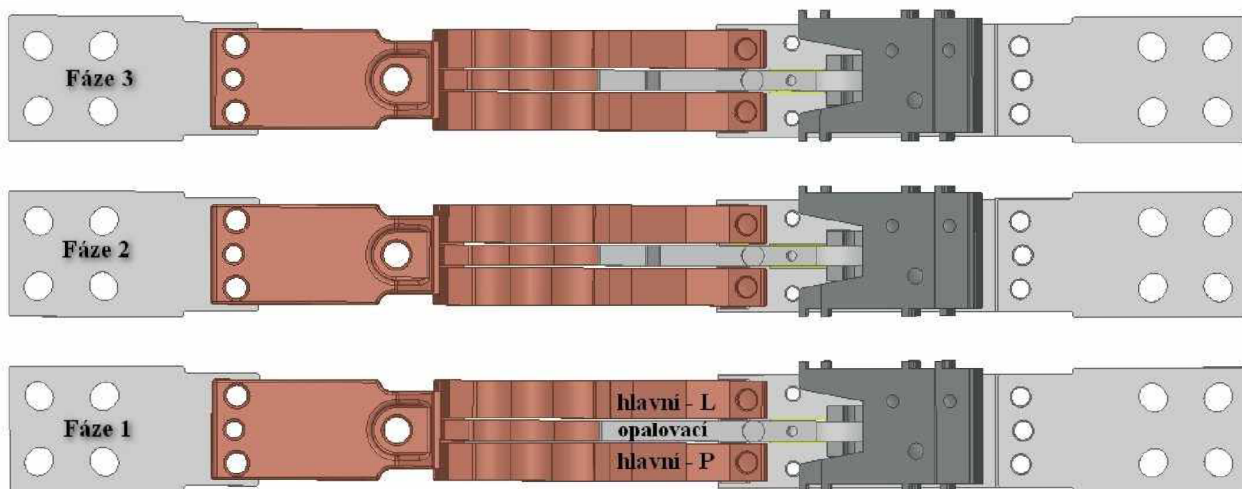


Obrázek 5-1: Model kontaktů jedné fáze

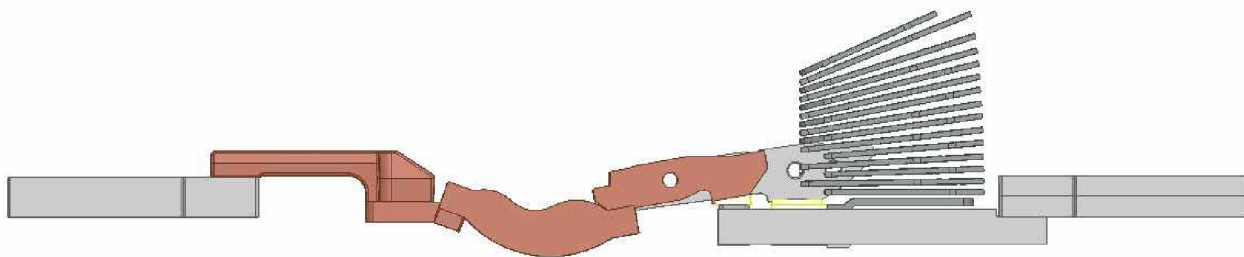
5.1 Výsledný model proudovodné dráhy



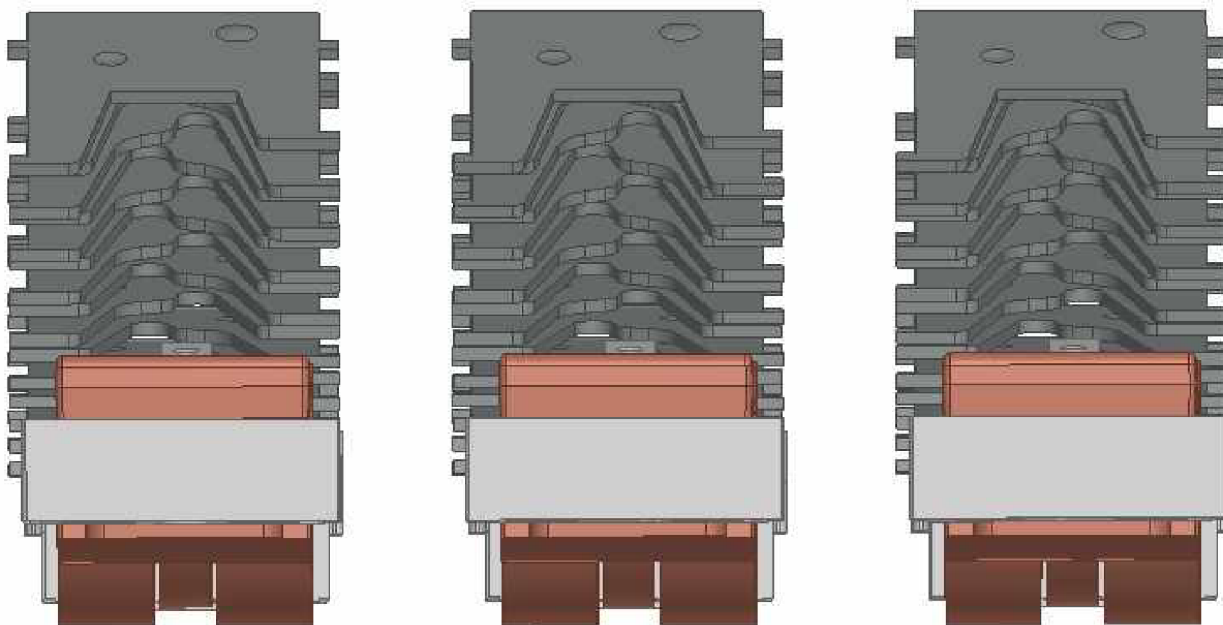
Obrázek 5-2: Celkový pohled



Obrázek 5-3: Horní pohled



Obrázek 5-4: Pohled z přední strany



Obrázek 5-5: Pohled z levé strany



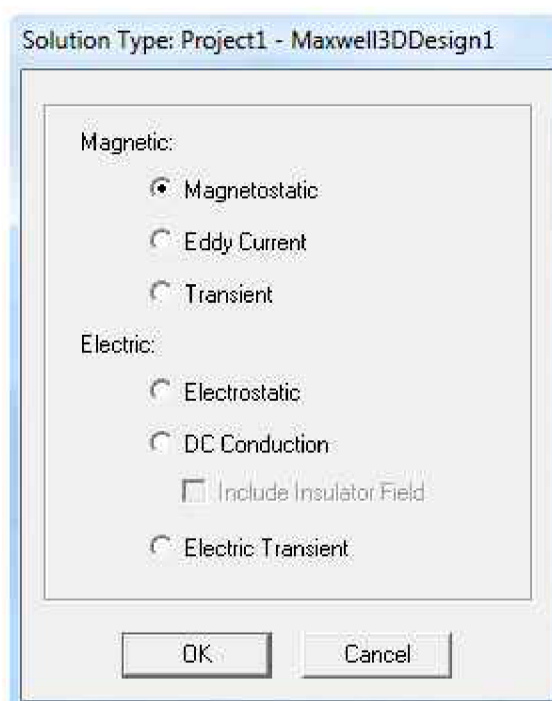
Obrázek 5-6: Pohled z pravé strany

6 STACIONÁRNÍ VÝPOČET SÍLY V PROSTŘEDÍ ANSYS MAXWELL

Při stacionárním výpočtu zjišťujeme moment a elektrodynamické síly pro ustálený stejnosměrný proud. Tento výpočet nám neumožňuje sledovat měnící se síly v určitém časovém intervalu a zanedbávají se jevy spojené se vznikem vířivých proudů a povrchového jevu. Pro přiblížení se skutečnému ustálenému stavu nastavujeme na vstup každé fáze hodnoty proudu, které jsou vzájemně posunuty o 120° .

6.1 Postup simulace

Po zjednodušení proudovodné dráhy přeneseme geometrii do prostředí Ansys Maxwell (Modeler \rightarrow Import). Pro přenos používáme výměnný formát STEP. Jelikož se zabýváme statickým výpočtem, nastavíme typ analýzy Magnetostatic (Obr. 6-1).



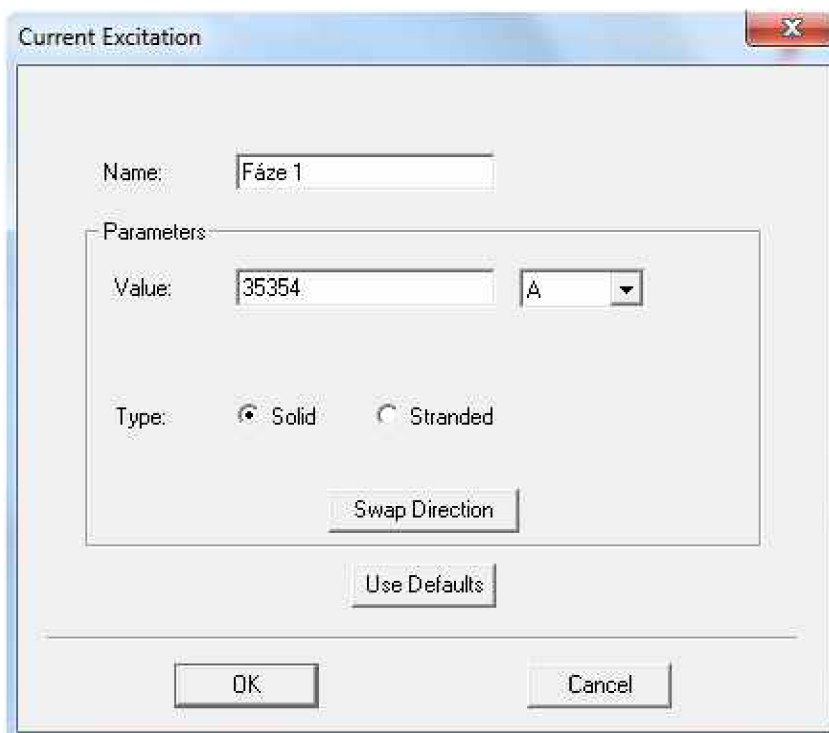
Obrázek 6-1: Nastavení analýzy

6.1.1 Nastavení materiálů

Následně geometrii přiřadíme jednotlivé materiály, ze kterých je proudovodná dráha tvořena (AssignMaterial \rightarrow Copper, Steel, Air). Celá proudovodná dráha se skládá z mědi, pouze plechy ve zhašecí komoře jsou ocelové. Okolní prostředí je tvořeno vzduchem.

6.1.2 Nastavení proudů

Při statickém výpočtu nás zajímají elektrodynamické síly, působící na kontakty jističe při průchodu zkratových proudů, odpovídajících efektivním hodnotám 2, 5, 10, 15, 25, 36, 50 a 65 kA. Tyto proudy nastavujeme pro každou fázi samostatně, abychom docílili fázového posunutí o 120° (Excitations → Assing → Current).



Obrázek 6-2: Nastavení proudu

Příklad nastavení proudu - odpovídá proudu 25 kA efektivních pro jednotlivé fáze:

$$\text{Fáze 1:} \quad i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos\varphi \quad (6.1)$$

$$i = 25000 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos 0 \quad (6.2)$$

$$\underline{\underline{i = 35354A}}$$

$$\text{Fáze 2:} \quad i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos\varphi \quad (6.3)$$

$$i = 25000 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos 120 \quad (6.4)$$

$$\underline{\underline{i = -17677A}}$$

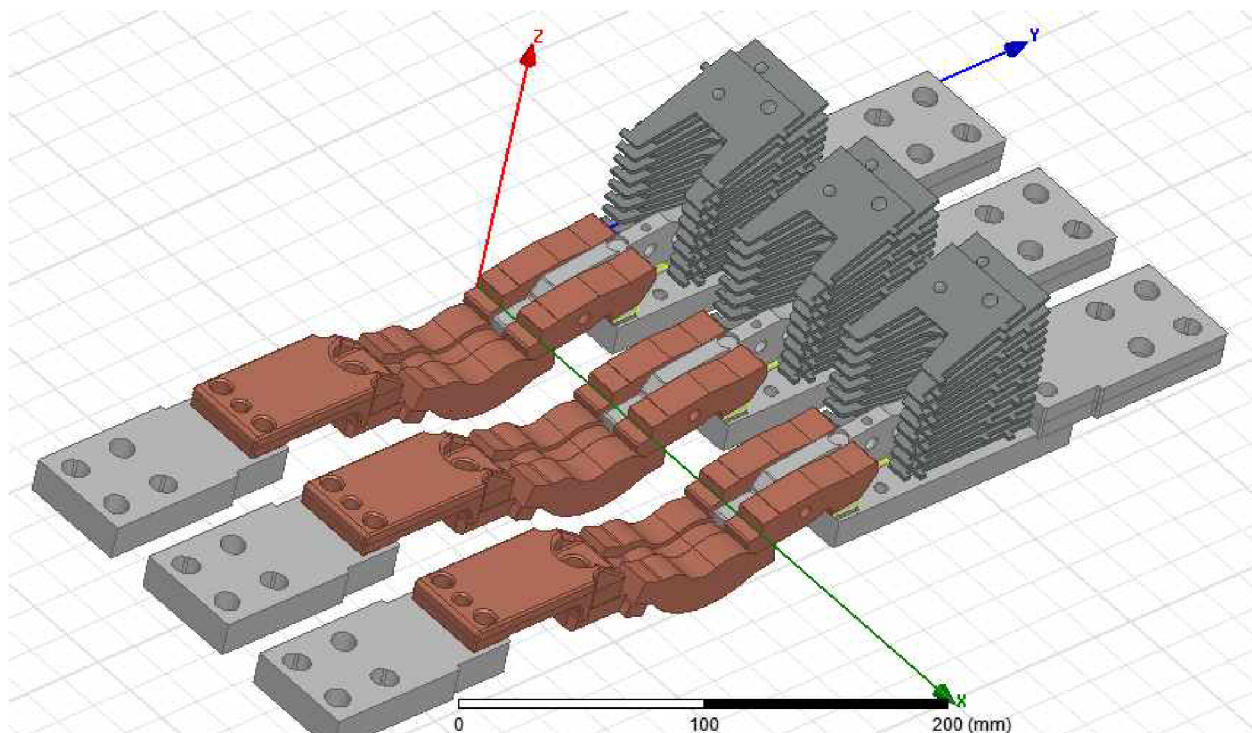
$$\text{Fáze 3:} \quad i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos\varphi \quad (6.5)$$

$$i = 25000 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos 240 \quad (6.6)$$

$$\underline{\underline{i = -17677A}}$$

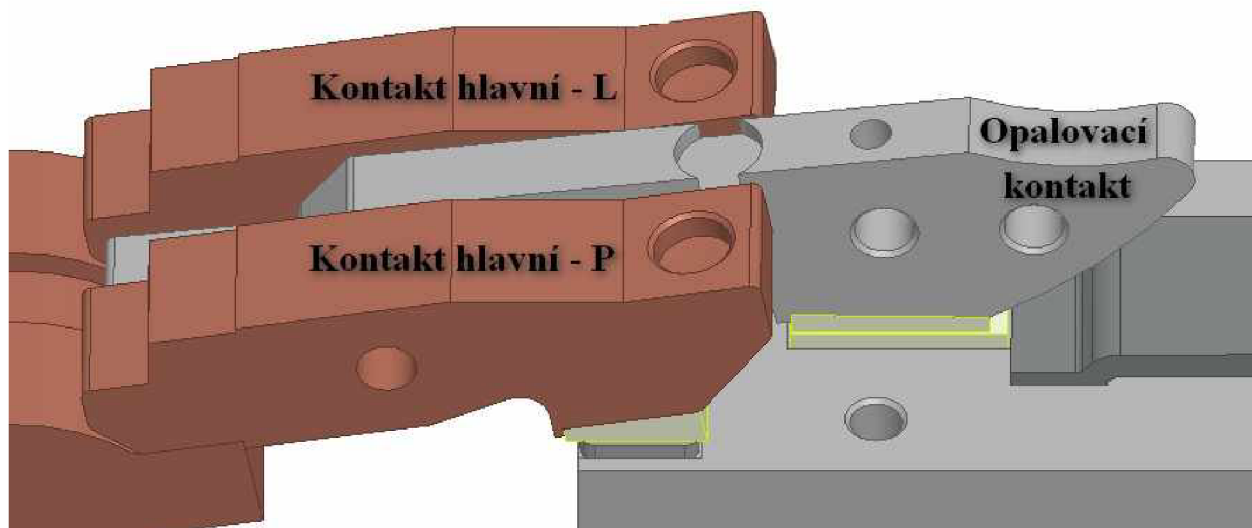
6.2 Výpočet momentů pomocí programu Ansys Maxwell

V programu Ansys Maxwell nás bude zajímat moment vznikající kolem osy X (Obr. 6-3), při různých hodnotách proudů. Abychom mohli definovat místo, kde chceme moment počítat, musíme nejdříve vytvořit nový souřadný systém (Modeler \rightarrow Coordinatesystem \rightarrow Create \rightarrow Relative CS \rightarrow Offset) a následně vybrat nové umístění souřadného systému (Obr. 6.3).



Obrázek 6-3: Rozmístění souřadného systému

Poté co jsme si vytvořili nový souřadný systém, definujeme na jakých částech proudovodné dráhy chceme požadovaný moment počítat. V našem případě se budeme zajímat o momenty vznikající kolem kontaktů hlavních a kontaktu opalovacího v první, druhé a třetí fázi. Ve chvíli, kdy máme nastaveny všechny potřebné parametry, můžeme spustit vlastní výpočet.



Obrázek 6-4: Popis kontaktů

6.2.1 Vypočítané hodnoty momentů

Tabulka 6-1: Moment působící v první fázi

Proud	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
2	0,011	-0,001	0,011
5	0,062	-0,009	0,066
10	0,246	-0,042	0,261
15	0,538	-0,104	0,576
25	1,445	-0,333	1,544
36	2,901	-0,751	3,101
50	5,402	-1,562	5,761
65	8,891	-2,791	9,452

Tabulka 6-2: Moment působící v druhé fázi

Proud	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
2	0,003	0	0,003
5	0,017	-0,002	0,017
10	0,067	-0,007	0,066
15	0,151	-0,018	0,149
25	0,412	-0,059	0,401
36	0,837	-0,138	0,815
50	1,568	-0,296	1,509
65	2,611	-0,562	2,471

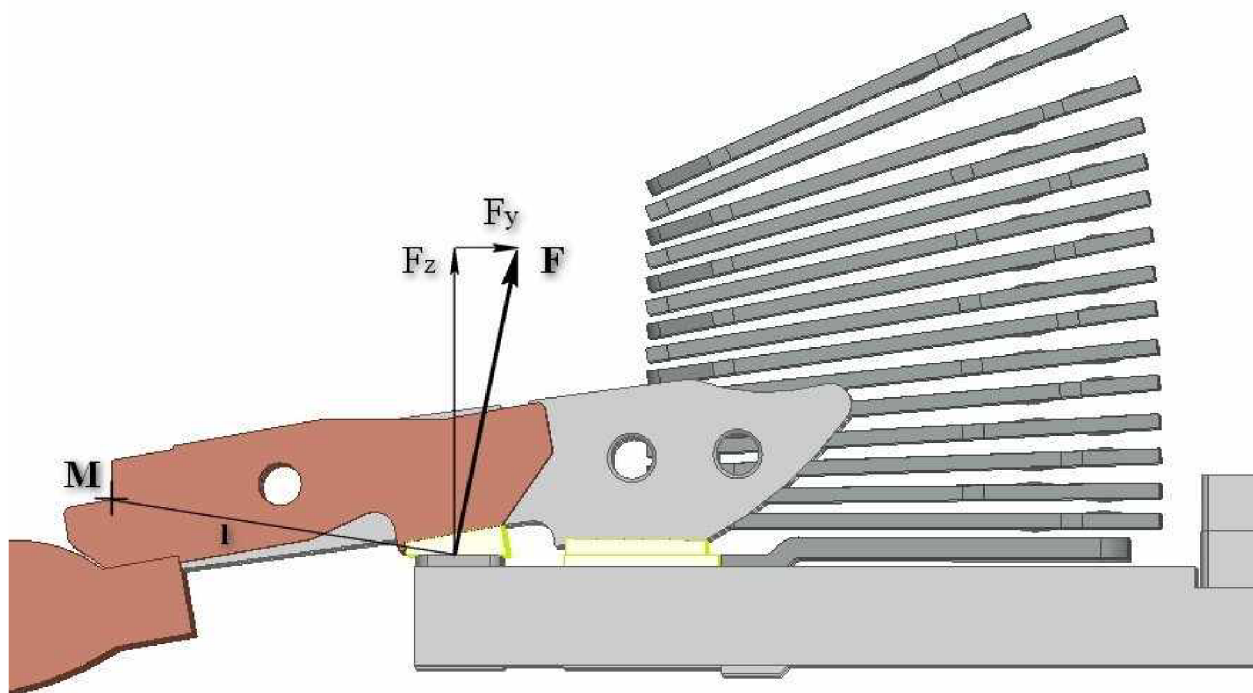
Tabulka 6-3: Moment působící v třetí fázi

Proud	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
2	0,002	0	0,003
5	0,016	-0,002	0,017
10	0,065	-0,009	0,067
15	0,144	-0,018	0,151
25	0,385	-0,059	0,406
36	0,772	-0,157	0,804
50	1,422	-0,343	1,498
65	2,305	-0,625	2,432

6.3 Výpočet elektrodynamické síly F

Ze zjištěných momentů vypočítáme podle vzorce (6.7) sílu F , působící v místě styku pevného a pohyblivého kontaktu (Obr. 6.5).

$$F = \frac{M}{l} [N; Nm, m] \quad (6.7)$$



Obrázek 6-5: Působící síly v ose kontaktu

Příklad výpočtu pro pravý kontakt první fáze – proud 65kA.

Písmeno M na obrázku (6-5) nám určí místo námi vypočítaného momentu. Vzdálenost od tohoto bodu k prostředku kontaktu je značena písmenem l . Tato vzdálenost je pro hlavní kontakty $l = 0,04973 \text{ m}$. Pro kontakt opalovací je to vzdálenost $l = 0,07547 \text{ m}$.

$$F = \frac{M}{l} [N; Nm, m] \quad (6.8)$$

$$F = \frac{8,891}{0,04973} = \underline{\underline{17876 \text{ N}}} \quad (6.9)$$

6.3.1 Vypočítané hodnoty síly F

Tabulka 6-4: Síla působící v první fázi

Proud	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F [N]	F [N]	F [N]
2	0,20	-0,01	0,22
5	1,25	-0,12	1,33
10	4,95	-0,56	5,25
15	10,82	-1,38	11,58
25	29,06	-4,41	31,05
36	58,31	-9,95	62,36
50	108,58	-20,67	115,82
65	178,76	-36,97	190,02

Tabulka 6-5: Síla působící v druhé fázi

Proud	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F [N]	F [N]	F [N]
2	0,06	0,00	0,06
5	0,34	-0,03	0,34
10	1,35	-0,09	1,33
15	3,04	-0,24	3,00
25	8,24	-0,78	8,06
36	16,83	-1,83	16,39
50	31,53	-3,92	30,34
65	52,48	-7,42	49,67

Tabulka 6-6: Síla působící v třetí fázi

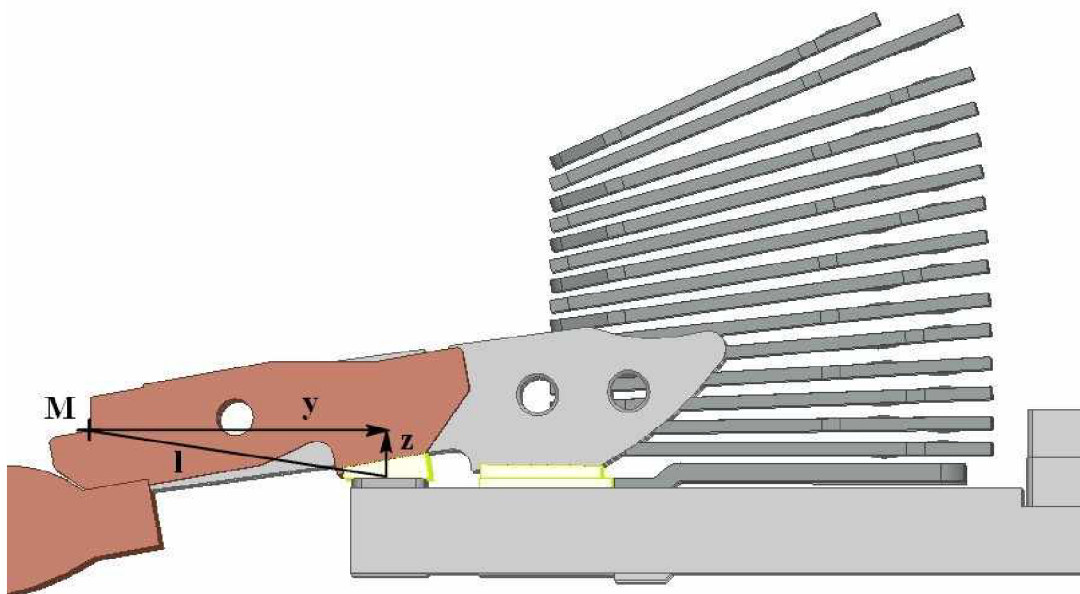
Proud	Kontakt hlavní - P		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F [N]	F [N]	F [N]
2	0,04	0,00	0,06
5	0,32	-0,03	0,34
10	1,31	-0,12	1,35
15	2,90	-0,24	3,02
25	7,74	-0,78	8,16
36	15,52	-2,08	16,17
50	28,59	-4,54	30,12
65	46,35	-8,28	48,90

6.4 Rozložení síly do složek F_z a F_y

Vypočítanou sílu F , která působí v místě styku pevného a pohyblivého kontaktu, rozdělíme do jednotlivých složek F_z a F_y (Obr. 6-5) podle vzorců (6.10) a (6.11).

$$F_z = F \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{z}{y}\right)\right) [N; N, m, m] \quad (6.10)$$

$$F_y = F \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{z}{y}\right)\right) [N; N, m, m] \quad (6.11)$$



Obrázek 6-6: Vzdálenosti v jednotlivých osách

Příklad výpočtu pro pravý kontakt první fáze – proud 65kA:

Vzdálenost y pro hlavní kontakty: $y = 0,04912$ m

Vzdálenost y pro opalovací kontakt: $y = 0,07507$ m

Vzdálenost z pro hlavní a opalovací kontakty: $z = 0,00777$ m

Síla F_z :

$$F_z = F \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{z}{y}\right)\right) [N; N, m, m] \quad (6.12)$$

$$F_z = 178,76 \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{0,00777}{0,04912}\right)\right) = \underline{\underline{176,57N}} \quad (6.13)$$

Síla F_y :

$$F_y = F \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{z}{y}\right)\right) [N; N, m, m] \quad (6.14)$$

$$F_y = 178,76 \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{0,00777}{0,04912}\right)\right) = \underline{\underline{27,93N}} \quad (6.15)$$

6.4.1 Vypočítané hodnoty sil F_z a F_y

Tabulka 6-7: Síla F_z a F_y působící v první fázi

Proud [kA]	Fáze 1					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]
2	0,20	0,03	-0,01	0,00	0,22	0,03
5	1,23	0,19	-0,12	-0,01	1,31	0,21
10	4,89	0,77	-0,55	-0,06	5,18	0,82
15	10,69	1,69	-1,37	-0,14	11,44	1,81
25	28,70	4,54	-4,39	-0,45	30,67	4,85
36	57,60	9,11	-9,90	-1,02	61,59	9,74
50	107,25	16,96	-20,56	-2,13	114,40	18,09
65	176,57	27,93	-36,77	-3,81	187,69	29,68

Tabulka 6-8: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi

Proud [kA]	Fáze 2					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]
2	0,06	0,01	0,00	0,00	0,06	0,01
5	0,34	0,05	-0,03	0,00	0,34	0,05
10	1,33	0,21	-0,09	-0,01	1,31	0,21
15	3,00	0,47	-0,24	-0,02	2,96	0,47
25	8,14	1,29	-0,78	-0,08	7,96	1,26
36	16,62	2,63	-1,82	-0,19	16,19	2,56
50	31,14	4,93	-3,90	-0,40	29,97	4,74
65	51,84	8,20	-7,38	-0,76	49,06	7,76

Tabulka 6-9: Síla F_z a F_y působící v třetí fázi

Proud [kA]	Fáze 3					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]
2	0,04	0,01	0,00	0,00	0,06	0,01
5	0,32	0,05	-0,03	0,00	0,34	0,05
10	1,29	0,20	-0,12	-0,01	1,33	0,21
15	2,86	0,45	-0,24	-0,02	2,98	0,47
25	7,65	1,21	-0,78	-0,08	8,06	1,28
36	15,33	2,43	-2,07	-0,21	15,97	2,53
50	28,24	4,47	-4,52	-0,47	29,75	4,71
65	45,78	7,24	-8,24	-0,85	48,30	7,64

6.5 Výpočet odpudivé síly F_u v proudové úžině

K vypočítané síle F_z dále přičteme odpudivou sílu, která vzniká v proudové úžině. Tuto sílu můžeme rozložit do složky působící v ose z a do složky působící v ose y . Zajímáme se pouze o sílu, která působí ve směru osy z , budeme jí značit F_u . Síla ve směru osy y je eliminována materiálovou pevností kontaktního materiálu. [3]

Zavedeme zjednodušující předpoklady:

- proud prochází dvěma proudovými úžinami
- proud procházející přes dva kontakty hlavní a jeden kontakt opalovací rozdělíme ve stejném poměru

Následně sílu odpovídající těmto předpokladům vypočítáme podle vzorce (6.16).

$$F_u = 2 \cdot \frac{\left(\frac{I}{3}\right)^2}{2} \cdot \ln \frac{D\sqrt{2}}{a} \cdot 10^{-7} \quad [N; A, m] \quad (6.16)$$

, kde D je rozměr kontaktu a a značí plochu styku

$$a = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot HB}} \quad [mm; N, MPa] \quad (6.17)$$

, kde F je přítláčná síla kontaktu a HB je tvrdost materiálu kontaktu

$$D = \sqrt{a_1 \cdot b} \quad (6.18)$$

Příklad výpočtu pro pravý (hlavní) kontakt první fáze – proud 65kA:

Z důvodu deformace materiálu použijeme hodnotu tvrdosti materiálu měkčího.

$$F_u = 2 \cdot \frac{\left(\frac{I}{3}\right)^2}{2} \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{a_1 \cdot b} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot HB}} \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 10^{-7} \quad [N; A, m] \quad (6.19)$$

$$F_u = 2 \cdot \frac{\left(\frac{91924}{3}\right)^2}{2} \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{0,01 \cdot 0,013 \cdot \sqrt{2}}}{\sqrt{\frac{4 \cdot 70}{\pi \cdot 410}} \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 10^{-7} = \underline{\underline{332,66 N}} \quad (6.20)$$

Tabulka 6-10: Přítláčné síly a tvrdost kontaktů

Kontakt	Materiál	Přítláčná síla F [N]	Tvrdost [MPa]
Pevný kontakt – hlavní	AgC5	-	410
Pevný kontakt – opalovací	AgW75	-	625
Pohyblivý kontakt – hlavní	AgW50	70	450 - 575
Pohyblivý kontakt – opalovací	AgW75	130	625

6.5.1 Vypočítané hodnoty odpudivých sil F_u v proudové úžině

Tabulka 6-11: Síla v proudové úžině (Fáze 1)

Proud	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
2	0,31	0,30	0,31
5	1,97	1,89	1,97
10	7,87	7,57	7,87
15	17,71	17,02	17,71
25	49,21	47,28	49,21
36	102,04	98,04	102,04
50	196,84	189,13	196,84
65	332,66	319,64	332,66

Tabulka 6-12: Síla v proudové úžině (Fáze 2)

Proud	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
2	0,08	0,08	0,08
5	0,49	0,47	0,49
10	1,97	1,89	1,97
15	4,43	4,26	4,43
25	12,30	11,82	12,30
36	25,51	24,51	25,51
50	49,21	47,28	49,21
65	83,17	79,91	83,17

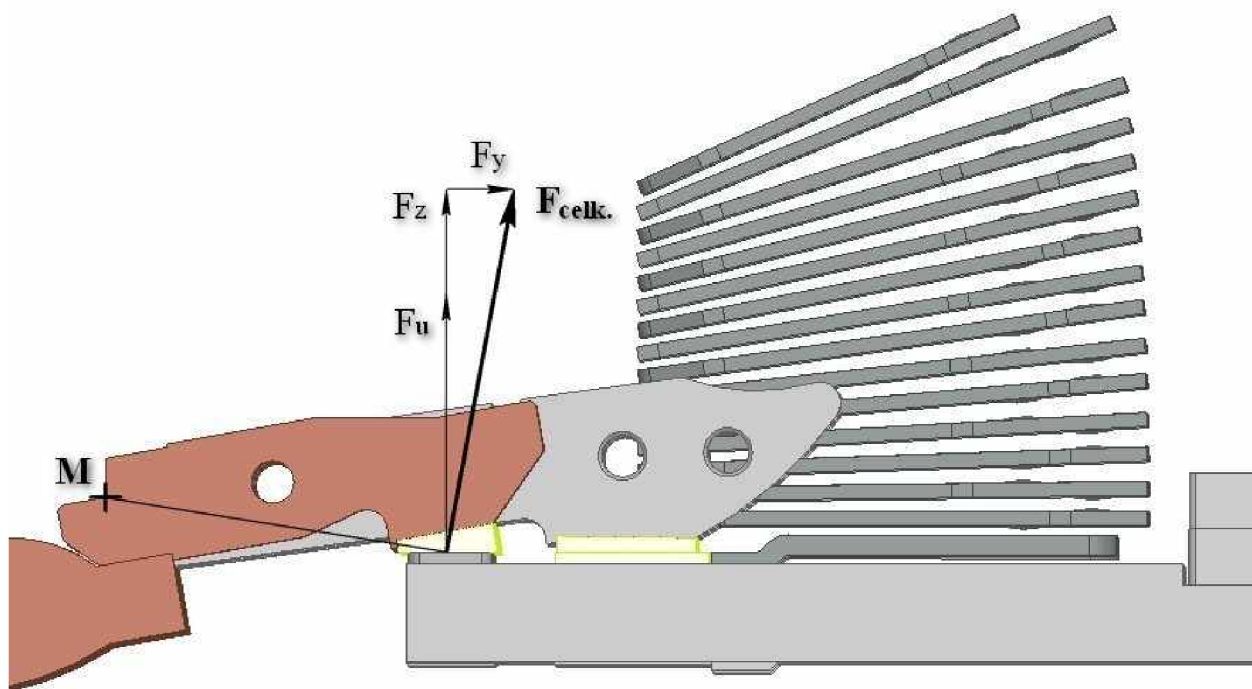
Tabulka 6-13: Síla v proudové úžině (Fáze 3)

Proud	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
2	0,08	0,08	0,08
5	0,49	0,47	0,49
10	1,97	1,89	1,97
15	4,43	4,26	4,43
25	12,30	11,82	12,30
36	25,51	24,51	25,51
50	49,21	47,28	49,21
65	83,17	79,91	83,17

6.6 Výpočet výsledné odpudivé síly $F_{celk.}$

V předešlých výpočtech jsme zjistili sílu F_z , která působí v ose z, sílu F_y působící v ose y a odpudivou sílu F_u vznikající v proudové úžině, která působí v ose z. Výslednou sílu působící na jednotlivé kontakty přístroje určíme podle vzorce (6.21), situace je znázorněna na obrázku (6-7).

$$F_{celk.} = \sqrt{(F_z + F_u)^2 + F_y^2} \quad (6.21)$$



Obrázek 6-7: Určení výsledné síly $F_{celk.}$

Příklad výpočtu pro pravý (hlavní) kontakt první fáze – proud 65kA:

$$F_{celk.} = \sqrt{(F_z + F_u)^2 + F_y^2} \quad (6.22)$$

$$F_{celk.} = \sqrt{(176,57 + 332,66)^2 + 27,93^2} \quad (6.23)$$

$$F_{celk.} = \underline{\underline{509,99 \text{ N}}} \quad (6.24)$$

6.6.1 Vypočítané hodnoty výsledné odporivé síly $F_{celk.}$

Tabulka 6-14: Výsledná odporivá síla (Fáze 1)

Proud	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	$F_{celk.}$ [N]	$F_{celk.}$ [N]	$F_{celk.}$ [N]
2	0,51	0,29	0,53
5	3,21	1,77	3,29
10	12,78	7,01	13,08
15	28,45	15,65	29,21
25	78,04	42,89	80,02
36	159,89	88,15	163,92
50	304,56	168,58	311,76
65	509,99	282,89	521,20

Tabulka 6-15: Výsledná odporivá síla (Fáze 2)

Proud	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	$F_{celk.}$ [N]	$F_{celk.}$ [N]	$F_{celk.}$ [N]
2	0,14	0,08	0,14
5	0,83	0,45	0,83
10	3,31	1,80	3,29
15	7,44	4,02	7,40
25	20,49	11,04	20,31
36	42,21	22,69	41,77
50	80,50	43,38	79,32
65	135,25	72,53	132,45

Tabulka 6-16: Výsledná odporivá síla (Fáze 3)

Proud	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	$F_{celk.}$ [N]	$F_{celk.}$ [N]	$F_{celk.}$ [N]
2	0,12	0,08	0,14
5	0,81	0,45	0,83
10	3,27	1,77	3,31
15	7,30	4,02	7,42
25	19,98	11,04	20,41
36	40,91	22,44	41,55
50	77,58	42,76	79,10
65	129,15	71,68	131,69

6.7 Zhodnocení výsledků

Při stacionárním výpočtu jsme počítali elektrodynamické síly v určitý časový okamžik, kdy obvodem protékal ustálený proud. Jelikož jsme respektovali fázové posunutí proudů o 120° , vyšly výsledné elektrodynamické síly v jednotlivých fázích odlišně. V našem případě jsme simulovali stav, kdy proud první fáze měl maximální hodnotu a proudy, ve zbývajících dvou fázích, měly hodnoty poloviční.

Z naměřených hodnot momentů, které jsou zaznamenány v tabulkách (6-1) až (6-3) vidíme, že nejvyšší moment působí na hlavní kontakty první fáze. Tento moment je v porovnání s vypočítanými momenty působícími na hlavní kontakty třetí fáze přibližně čtyřnásobný. Moment působící na hlavní kontakty druhé fáze, vyšel přibližně o 10% vyšší, než moment působící na hlavní kontakty fáze třetí. Tato skutečnost je způsobena vzájemným ovlivňováním kontaktů od první a třetí fáze. Momenty působící na kontakty opalovací vyšly ve všech fázích s opačným znaménkem, než na kontakty hlavní. To je způsobeno vzájemným ovlivňováním jednotlivých kontaktů. Této skutečnosti využíváme, jelikož nám následně na opalovací kontakty působí nejmenší odpudivá síla.

Po převedení jednotlivých momentů na síly, působících v místě styku kontaktu pevného a pohyblivého, se nám poměr sil působících v jednotlivých fázích nezměnil. Co se nám ovšem změnilo, je poměr sil mezi kontakty hlavními a opalovacími. Síla na kontaktu opalovacím se snižuje, jelikož vzdálenost působící síly F od místa výpočtu momentu M je větší, než vzdálenost kontaktu hlavního (viz. vzorec 6.7). Nejvyšší odpudivá síla $F=190N$ vyšla na kontaktu hlavním, první fáze, při průchodu zkratového proudu 65kA efektivních.

Sílu F , která působí v místě styku, jsme rozdělili do jednotlivých složek F_z a F_y . Pro hlavní kontakty působí přibližně 86% síly, ve směru osy z a zbylých 14 % působí ve směru osy y . Pro kontakty opalovací je to 90% síly ve směru osy z a 10% ve směru osy y . Vypočítané hodnoty pro jednotlivé proudy jsou zaznamenány v tabulkách (6-7) až (6-9).

Posledním článkem, který jsme potřebovali znát k tomu, abychom určili výslednou odpudivou sílu, je síla vznikající v proudové úžině F_u . Tato síla se velkou mírou podílí na velikosti výsledné síly F_{celk} . Porovnáme-li vypočítané síly F_u a F_z , na hlavních kontaktech, vidíme, že síla vznikající v proudové úžině, má přibližně 1,6 až 1,8mi násobnou velikost. Ještě výrazněji se podílí na výsledné síle F_{celk} u kontaktů opalovacích. V tomto případě je to právě síla F_u , která určuje, že výsledná síla působí odpudivě. Vypočítané hodnoty síly F_u pro jednotlivé proudy jsou zaznamenány v tabulkách (6-11) až (6-13).

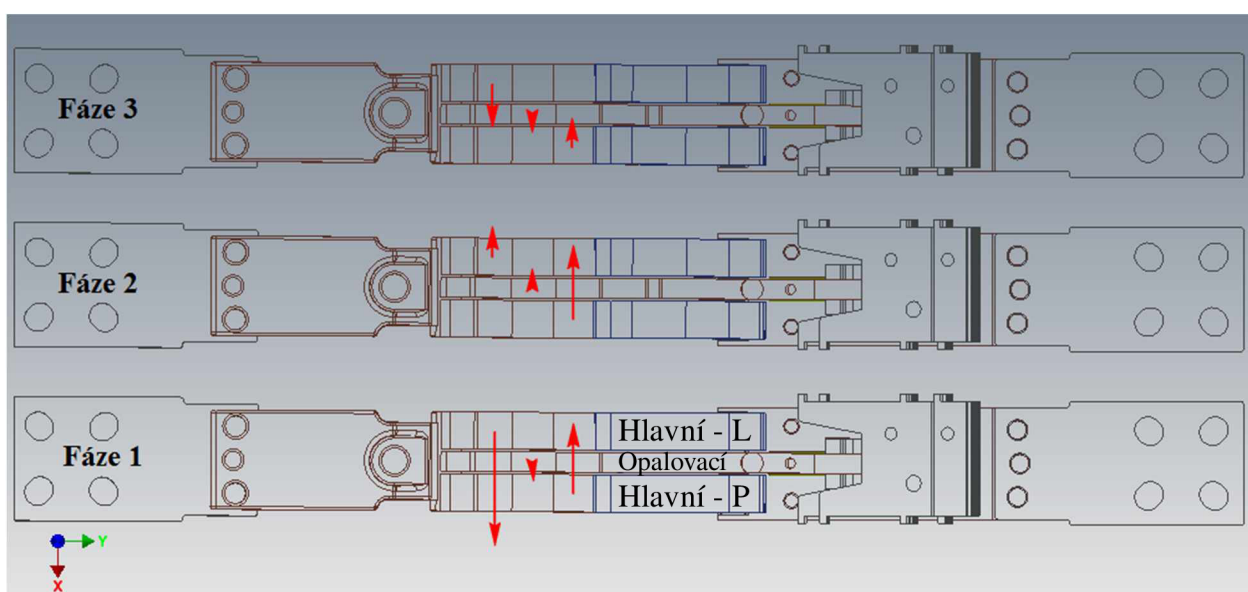
Výsledná odpudivá síla F_{celk} je složena ze sil F_z , F_y , F_u a určili jsme jí podle vzorce (6.21). Z hodnot od výrobce víme, že přítláčná síla působící na kontakty hlavní je nastavena na 70N a přítláčná síla na kontakty opalovací je 130N. Porovnáme-li tyto hodnoty s námi vypočítanými odpudivými silami, které jsou zaznamenány v tabulkách (6-14) až (6-16), vidíme, že v celém vypínacím rozsahu je zaručeno rozpojení kontaktů hlavních dříve než kontaktů opalovacích. Toto je pro jistící prvek velmi důležitá vlastnost, jelikož nedochází ke zkracování životnosti hlavních kontaktů. Přítláčná síla je nastavena tak, aby nedocházelo k nadskočení kontaktů až do hodnoty 20kA. Nadskočení kontaktů, u vyšších proudů, využíváme k omezení zkratových proudů.

7 STACIONÁRNÍ VÝPOČET SÍLY PŮSOBÍCÍ MEZI JEDNOTLIVÝMI KONTAKTY

Na trojici pohyblivých kontaktů v jednotlivých fázích nepůsobí elektrodynamické síly pouze v ose z , ale také síly v dalších dvou osách. Síla v ose x nám reprezentuje vzájemné působení kontaktů. Jelikož se procházející proud rozloží mezi dva kontakty hlavní a jeden kontakt opalovací, vzniká proudovodná dráha, kde proud tekoucí stejným směrem vyvolá přitažlivé silové účinky.

Síly uvedené v tabulkách (7.1) až (7.3) jsou síly působící na celý objem jednotlivých kontaktů ve směru osy x , y , z . Nejedná se o sílu rotační, ale o sílu posuvnou.

V síle $F(z)$ není zahrnuta odpudivá síla v proudové úžině.



Obrázek 7-1: Směr výsledných sil $F(x)$ a poměr jejich velikostí

Tabulka 7-1: Posuvné síly působící v první fázi

Proud [kA]	Fáze 1								
	Kontakt hlavní - P			Kontakt opalovací			Kontakt hlavní - L		
	F(x) [N]	F(y) [N]	F(z) [N]	F(x) [N]	F(y) [N]	F(z) [N]	F(x) [N]	F(y) [N]	F(z) [N]
2	-0,53	0,07	0,31	0	0	-0,02	1,09	0,07	0,34
5	-3,28	0,47	1,96	0,04	0,04	-0,13	6,85	0,45	2,08
10	-13,07	1,82	7,74	0,16	0,12	-0,57	27,35	1,74	8,16
15	-29,35	3,9	16,98	0,37	0,22	-1,41	61,43	3,69	18,08
25	-80,75	10,14	45,58	1,07	0,42	-4,51	170,09	9,44	48,57
36	-166,3	20	91,87	2,25	0,58	-10,15	351,6	18,44	97,4
50	-318,4	36,3	171,4	4,42	0,79	-21,13	676,2	32,86	182,2
65	-537,1	59,4	282,6	7,58	0,97	-37,65	1138,2	51,4	299,2

Tabulka 7-2: Posuvné síly působící v druhé fázi

Proud	Fáze 2								
	Kontakt hlavní - P			Kontakt opalovací			Kontakt hlavní - L		
	F(x) [N]	F(y) [N]	F(z) [N]	F(x) [N]	F(y) [N]	F(z) [N]	F(x) [N]	F(y) [N]	F(z) [N]
2	-0,57	0,02	0,08	0	0	0	-0,14	0,02	0,08
5	-3,59	0,15	0,54	-0,05	0	-0,02	-0,91	0,12	0,53
10	-14,33	0,56	2,13	-0,2	0,02	-0,1	-3,65	0,46	2,13
15	-32,22	1,24	4,75	-0,44	0,05	-0,25	-8,21	1,01	4,75
25	-89,35	3,22	13,05	-1,24	0,12	-0,79	-22,74	2,66	12,83
36	-184,7	6,27	26,63	-2,64	0,17	-1,86	-47,08	5,3	26,1
50	-354,62	11,61	50,08	-5	0,25	-3,98	-90,78	9,8	48,32
65	-597,3	19,3	82,9	-8,8	0,35	-7,57	-152,6	15,5	79,3

Tabulka 7-3: Posuvné síly působící v třetí fázi

Proud	Fáze 3								
	Kontakt hlavní - P			Kontakt opalovací			Kontakt hlavní - L		
	F(x) [N]	F(y) [N]	F(z) [N]	F(x) [N]	F(y) [N]	F(z) [N]	F(x) [N]	F(y) [N]	F(z) [N]
2	-0,12	0,02	0,08	0	0	0	0,22	0,02	0,08
5	-0,72	0,11	0,52	0	0	-0,02	1,41	0,11	0,54
10	-2,89	0,47	2,09	0,02	0,03	-0,12	5,65	0,43	2,15
15	-6,51	1,04	4,59	0,04	0,06	-0,25	12,69	0,96	4,8
25	-17,89	2,75	12,31	0,14	0,12	-0,8	35,17	2,49	12,98
36	-36,83	5,37	24,69	0,37	0,2	-2,13	72,37	4,79	25,77
50	-70,64	9,98	45,61	0,79	0,24	-4,63	139,3	8,72	47,92
65	-118,63	16,1	73,82	1,36	0,22	-8,43	234,1	13,86	77,97

7.1 Zhodnocení výsledků

V této kapitole jsme se zabývali silami působícími mezi jednotlivými kontakty. Nejvíce jsme se zaměřili na sílu vznikající v ose x . Tato síla nám vyjadřuje vzájemné působení a ovlivňování jednotlivých kontaktů. Z vypočítaných hodnot, které jsou uvedeny v tabulkách (7-1) až (7-3) a následně graficky zaznamenány do obrázku (7-1) vidíme, že hlavní kontakty v jednotlivých fázích se přitahují. Tato síla je následkem toho, že proud tekoucí stejným směrem vyvolá přitažlivé silové účinky. Síla $F(x)$, vznikající v druhé fázi, na hlavním levém kontaktu, má odpuzující směr od kontaktu opalovacího (viz. Obrázek 7-1). Směr této síly je odlišný od ostatních fází z toho důvodu, jelikož proud tekoucí první fází má opačný směr a maximální velikost. Tento proud nám vytváří odpuzující sílu, která ovlivňuje kontakty prostřední fáze.

8 STACIONÁRNÍ VÝPOČET SÍLY V PROSTŘEDÍ ANSYS MAXWELL SE ZANEDBÁNÍM ZHÁŠECÍ KOMORY

V této kapitole se budeme zabývat výpočtem momentu a elektrodynamických sil při zanedbání zhášecí komory. Výpočet provádíme pro ustálený stejnosměrný proud o hodnotách 10, 25, 65 kA. Nachází-li se proudovodná dráha v blízkosti feromagnetického rozhraní, v našem případě v blízkosti ocelových desek zhášecí komory, působí na ní síla. Porovnáním vypočítaných sil, s předcházející kapitolou, zjistíme, jak velký vliv má na výsledné elektrodynamické síly zhášecí komora.

8.1 Vypočítaný moment pomocí programu Ansys Maxwell

Výpočet je prováděn stejným postupem jako stacionární výpočet se zhášecí komorou, který je popsán v kapitole (6.2).

8.1.1 Vypočítané hodnoty

Tabulka 8-1: Moment působící v první fázi

Proud	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
10	0,181	-0,082	0,192
25	1,132	-0,516	1,197
65	7,652	-3,488	8,094

Tabulka 8-2: Moment působící v druhé fázi

Proud	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
10	0,054	-0,018	0,046
25	0,337	-0,112	0,289
65	2,278	-0,76	1,955

Tabulka 8-3: Moment působící ve třetí fázi

Proud	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
10	0,04	-0,021	0,045
25	0,252	-0,129	0,278
65	1,702	-0,878	1,883

8.2 Výsledná odpudivá síla

Tabulka 8-4: Výsledná odpudivá síla (Fáze 1)

Proud	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	$F_{celk.} [N]$	$F_{celk.} [N]$	$F_{celk.} [N]$
10	11,48	6,49	11,70
25	71,78	40,48	73,08
65	485,24	273,71	494,07

Tabulka 8-5: Výsledná odpudivá síla (Fáze 2)

Proud	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	$F_{celk.} [N]$	$F_{celk.} [N]$	$F_{celk.} [N]$
10	3,05	1,65	2,89
25	19,02	10,34	18,06
65	128,61	69,90	122,15

Tabulka 8-6: Výsledná odpudivá síla (Fáze 3)

Proud	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	$F_{celk.} [N]$	$F_{celk.} [N]$	$F_{celk.} [N]$
10	2,77	1,61	2,87
25	17,32	10,12	17,84
65	117,09	68,35	120,71

8.3 Zhodnocení a porovnání výsledků

Při našem výpočtu, kdy jsme zanedbali vliv zhášecí komory, která nám představuje blízké feromagnetikum, jsme zjistili, že odpudivá síla F_z působící na kontakty hlavní a kontakt opalovací, vychází přibližně o 14 až 30% nižší, než v případě proudovodné dráhy se zhášecí komorou. Tento pokles je způsoben zeslabením magnetického pole v okolí pohyblivých kontaktů. Všechny vypočítané hodnoty síl F_z jsou zaznamenány v příloze A této diplomové práce, tabulka (A-4 až A-6). Zaměříme-li se pouze na výsledné odpudivé síly $F_{celk.}$, zjistíme, že rozdíl výsledných sil klesl přibližně na 5 až 11%. Snížení výsledného rozdílu je způsobeno připočítáním odpudivé síly vznikající v proudové úžině.

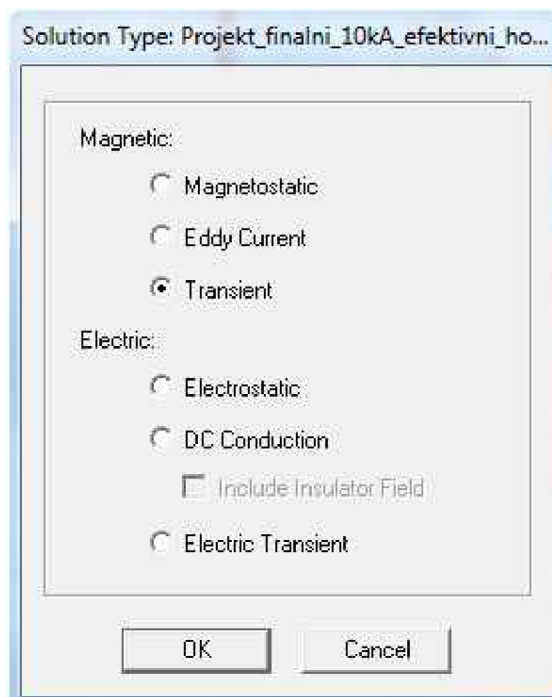
9 DYNAMICKÝ VÝPOČET SÍLY V PROSTŘEDÍ ANSYS MAXWELL

Při dynamickém výpočtu zjišťujeme moment a elektrodynamické síly pro ustálený střídavý proud o hodnotách 10, 25 a 65kA efektivních. Tento výpočet nám umožňuje sledovat měnící se síly v určitém časovém intervalu. Při této analýze se již nezanedbávají jevy spojené se vznikem vířivých proudů a povrchového jevu.

Jednotlivé kroky, které vedou ke zjištění výsledné odpudivé síly $F_{celk.}$, jsou detailně popsány v kapitole 6. V následujících kapitolách se tedy budeme věnovat konkrétním vypočítaným hodnotám a grafickému zpracování. Tabulky s vypočítanými hodnotami naleznete v příloze této práce. Příloha B až D.

9.1 Postup simulace

Při dynamickém výpočtu nastavíme typ analýzy Transient (Obr. 9.1). Materiály zůstávají stejné jako při stacionárním výpočtu.



Obrázek 9-1: Nastavení analýzy

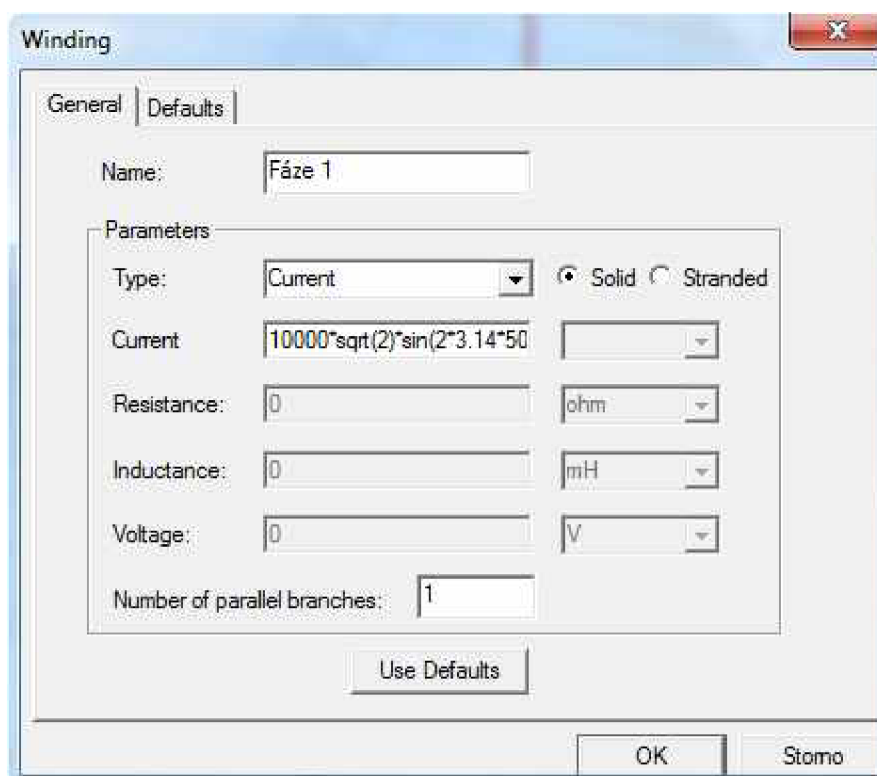
Nastavení proudů:

$$\text{Fáze 1:} \quad i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \text{TIME}) \quad (9.1)$$

$$\text{Fáze 2:} \quad i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \text{TIME} + \frac{2}{3} \cdot \pi\right) \quad (9.2)$$

$$\text{Fáze 3:} \quad i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \text{TIME} + \frac{4}{3} \cdot \pi\right) \quad (9.3)$$

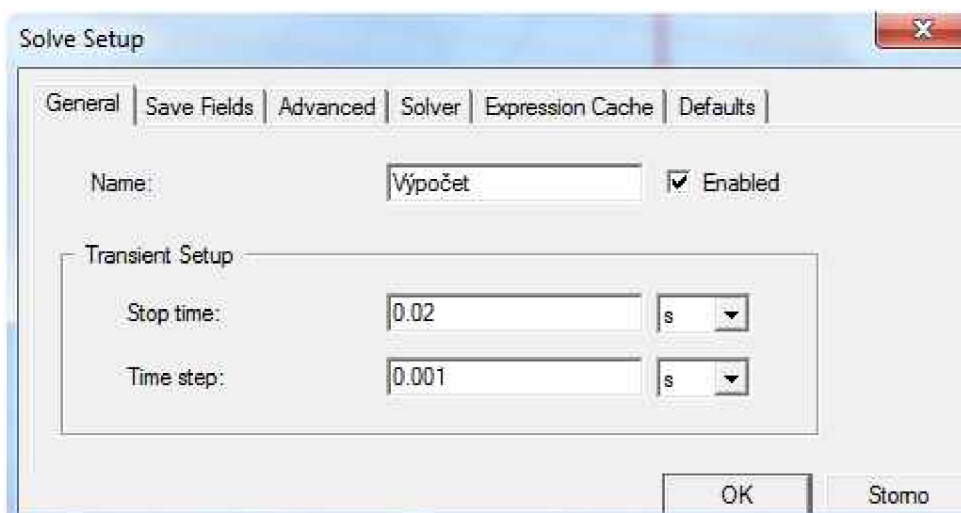
Dříve než nastavíme proudy v jednotlivých fázích, musíme v každé z fází vytvořit vinutí, do kterého vložíme vstupní a výstupní proud (Excitations → AddWinding).



Obrázek 9-2:Nastavení proudů

Nastavení výpočtu:

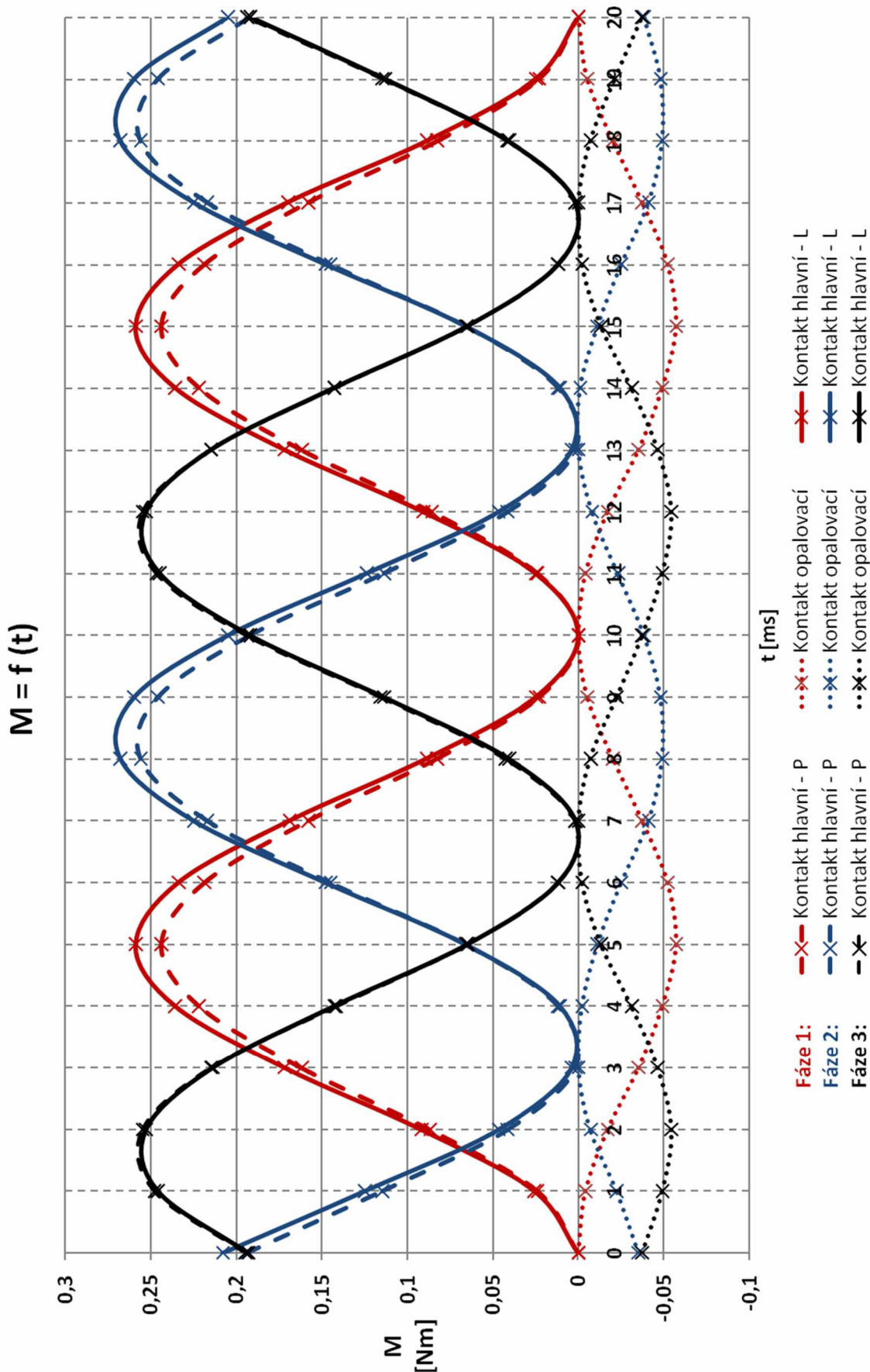
Jelikož se jedná o dynamickou analýzu, musíme nastavit časový úsek, ve kterém bude výpočet proveden (Analysis → AddSolutionSetup). Čas výpočtu volíme 20 ms s výpočtovým krokem 1ms. Nastavení délky výpočtu odpovídá jedné periodě při frekvenci 50 Hz.



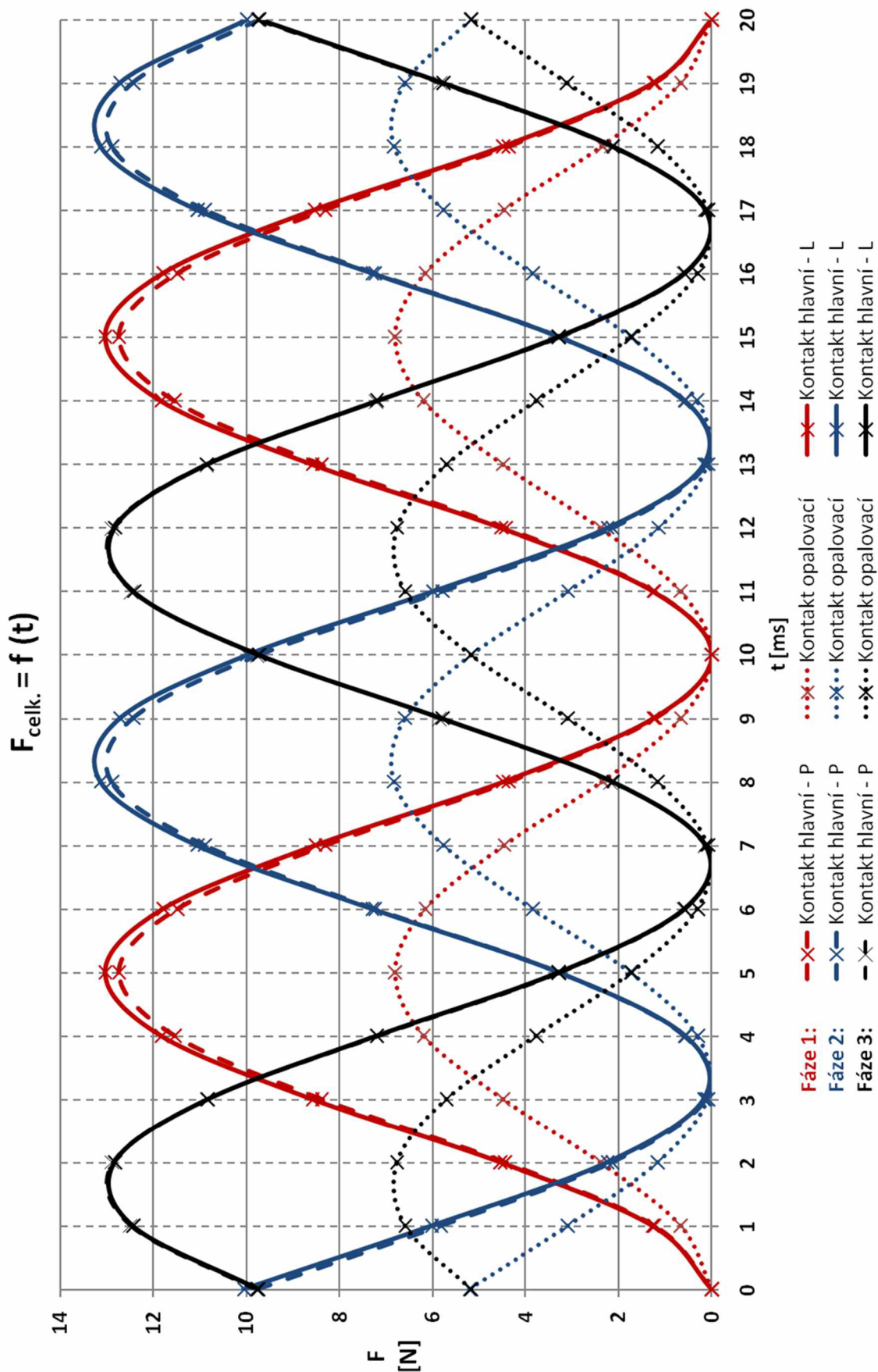
Obrázek 9-3:Nastavení času výpočtu

9.2 Střídavý proud 10kA

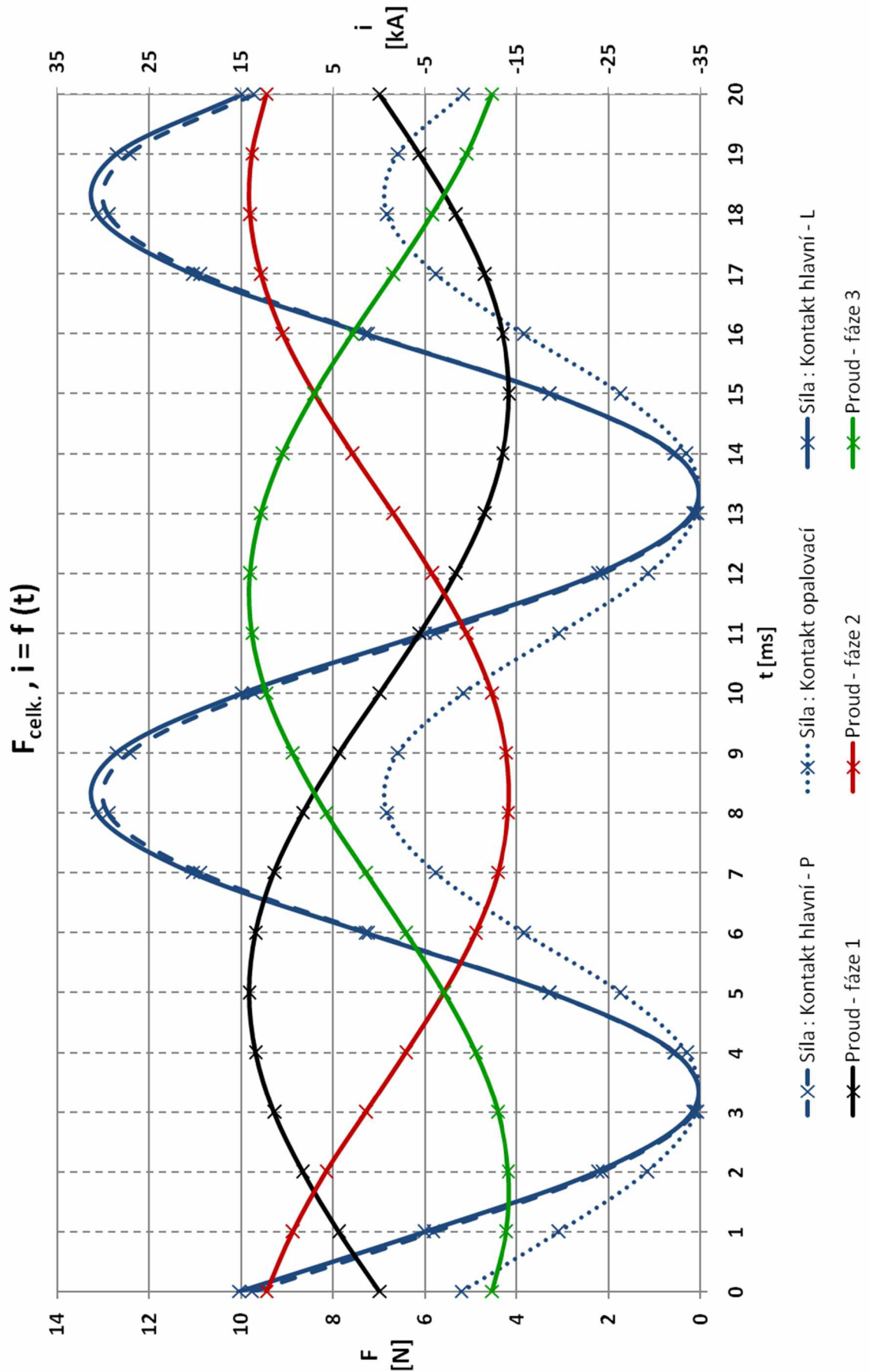
9.2.1 Graf momentů M pro střídavý proud 10kA:



9.2.2 Graf výsledné odporivé síly $F_{celk.}$ pro střídavý proud 10kA:

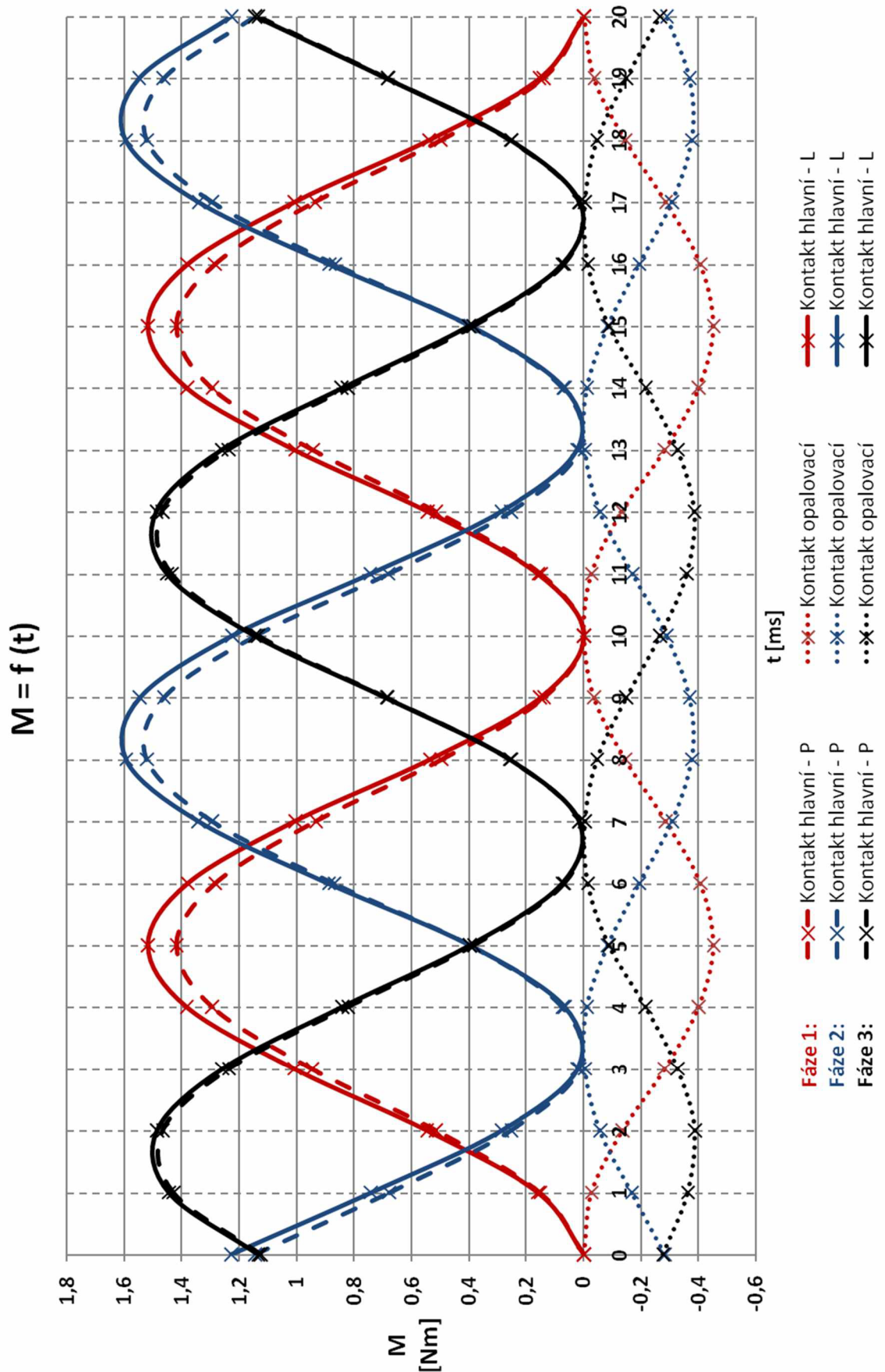


9.2.3 Graf výsledné odporivé síly $F_{celk.}$ fáze L2 se zobrazením průběhů proudů:

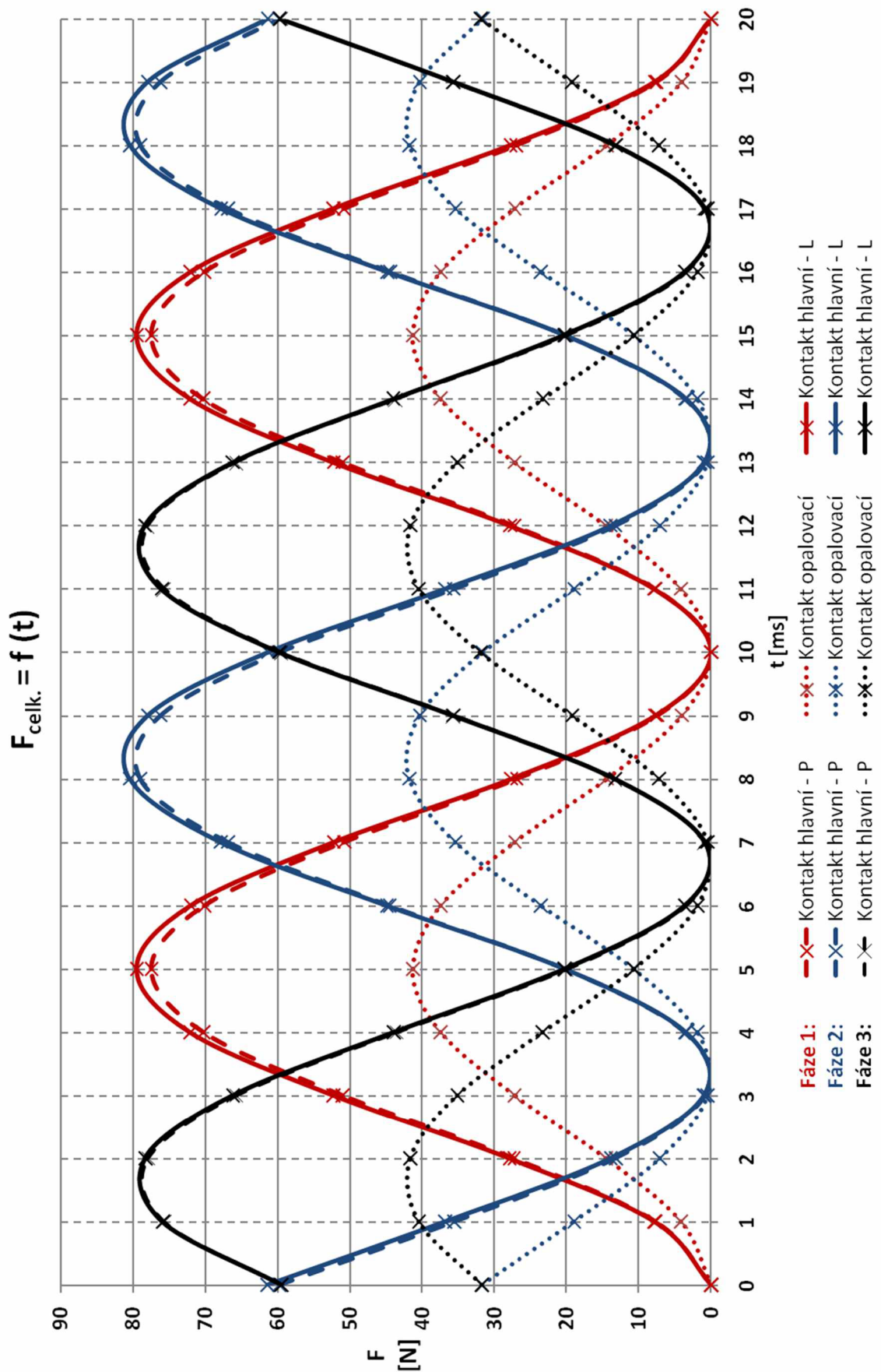


9.3 Střídavý proud 25kA

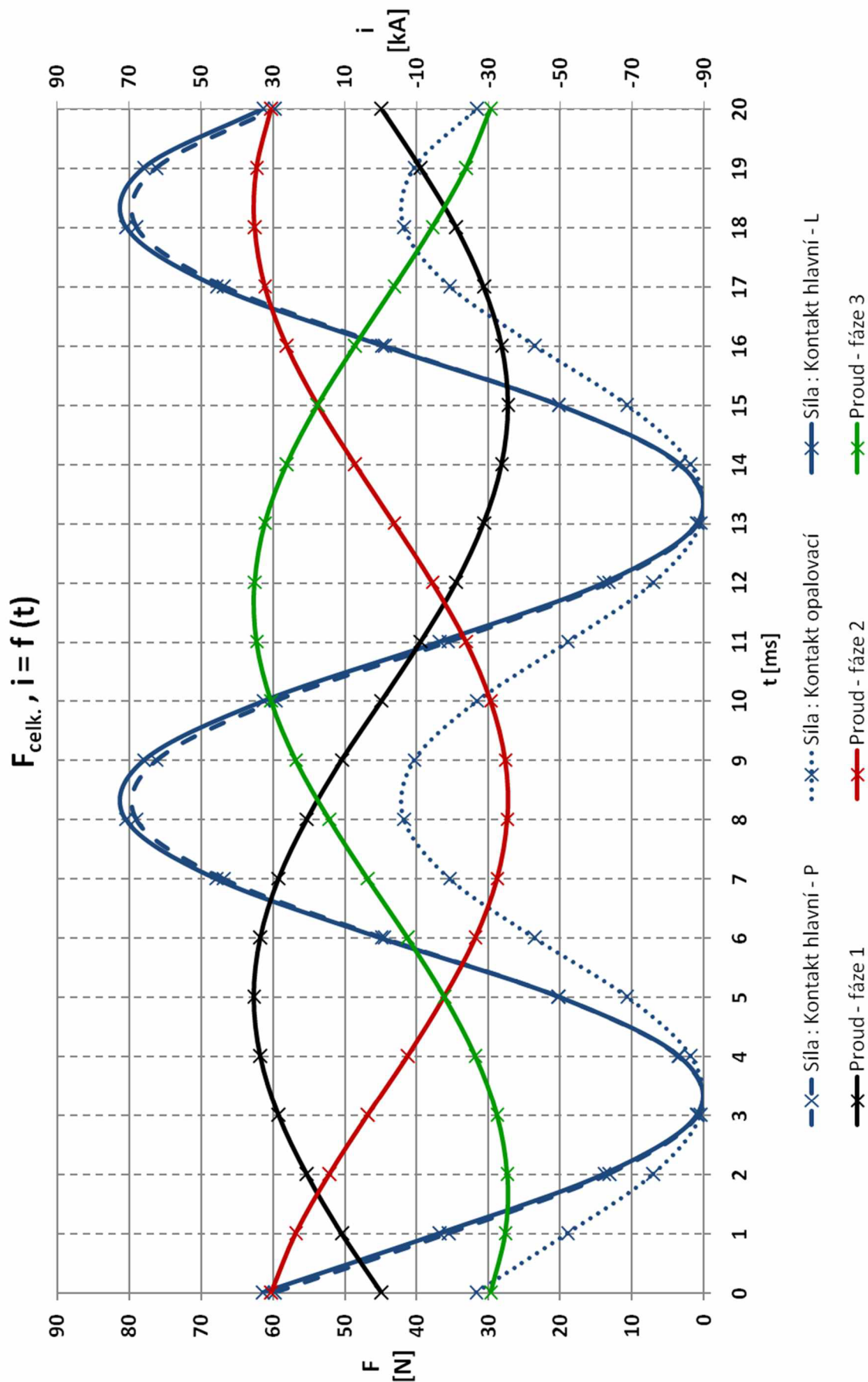
9.3.1 Graf momentů M pro střídavý proud 25kA:



9.3.2 Graf výsledné odporivé síly $F_{celk.}$ pro střídavý proud 25kA:

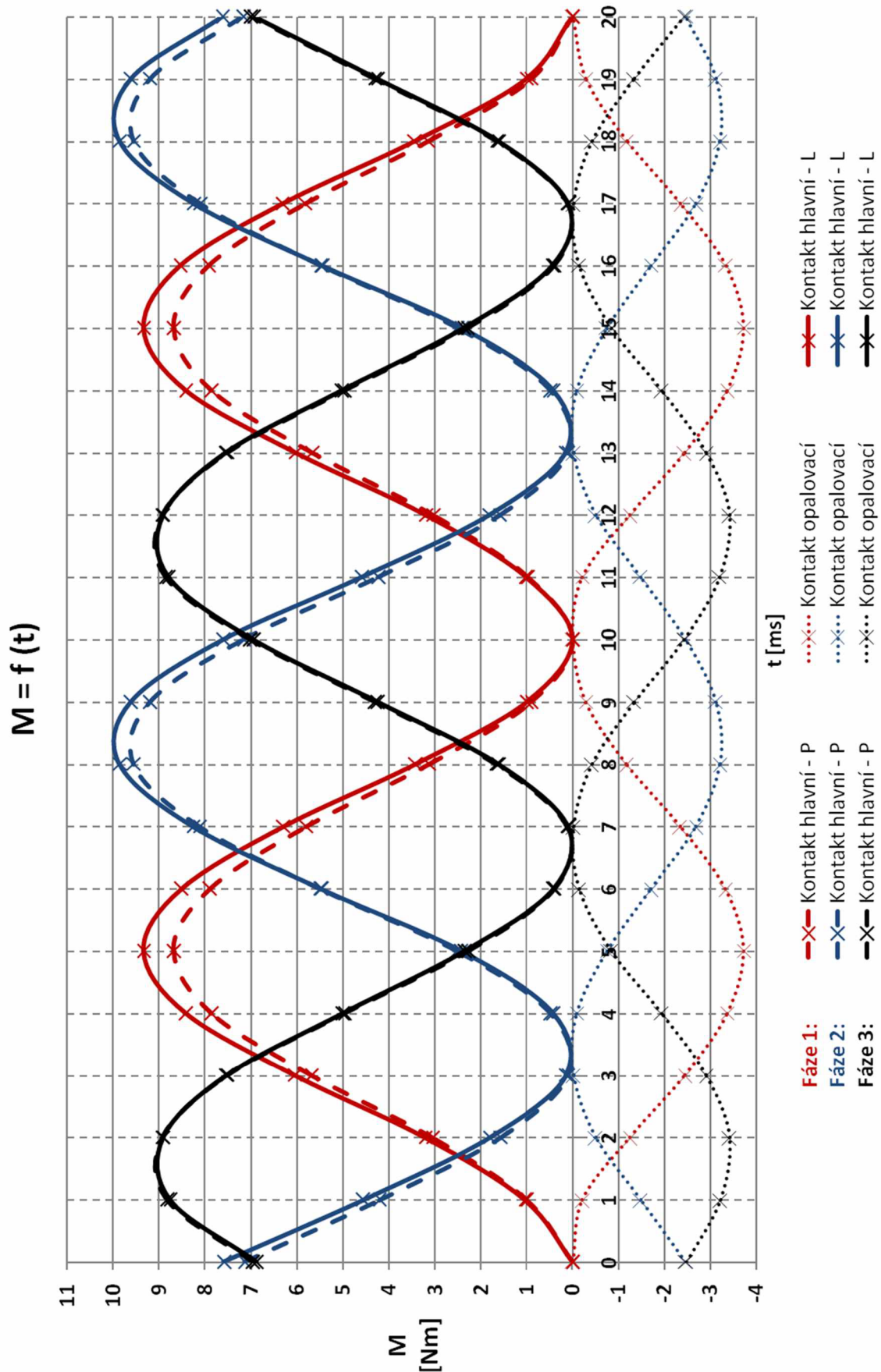


9.3.3 Graf výsledné odporivé síly $F_{celk.}$ fáze L2 se zobrazením průběhů proudů:

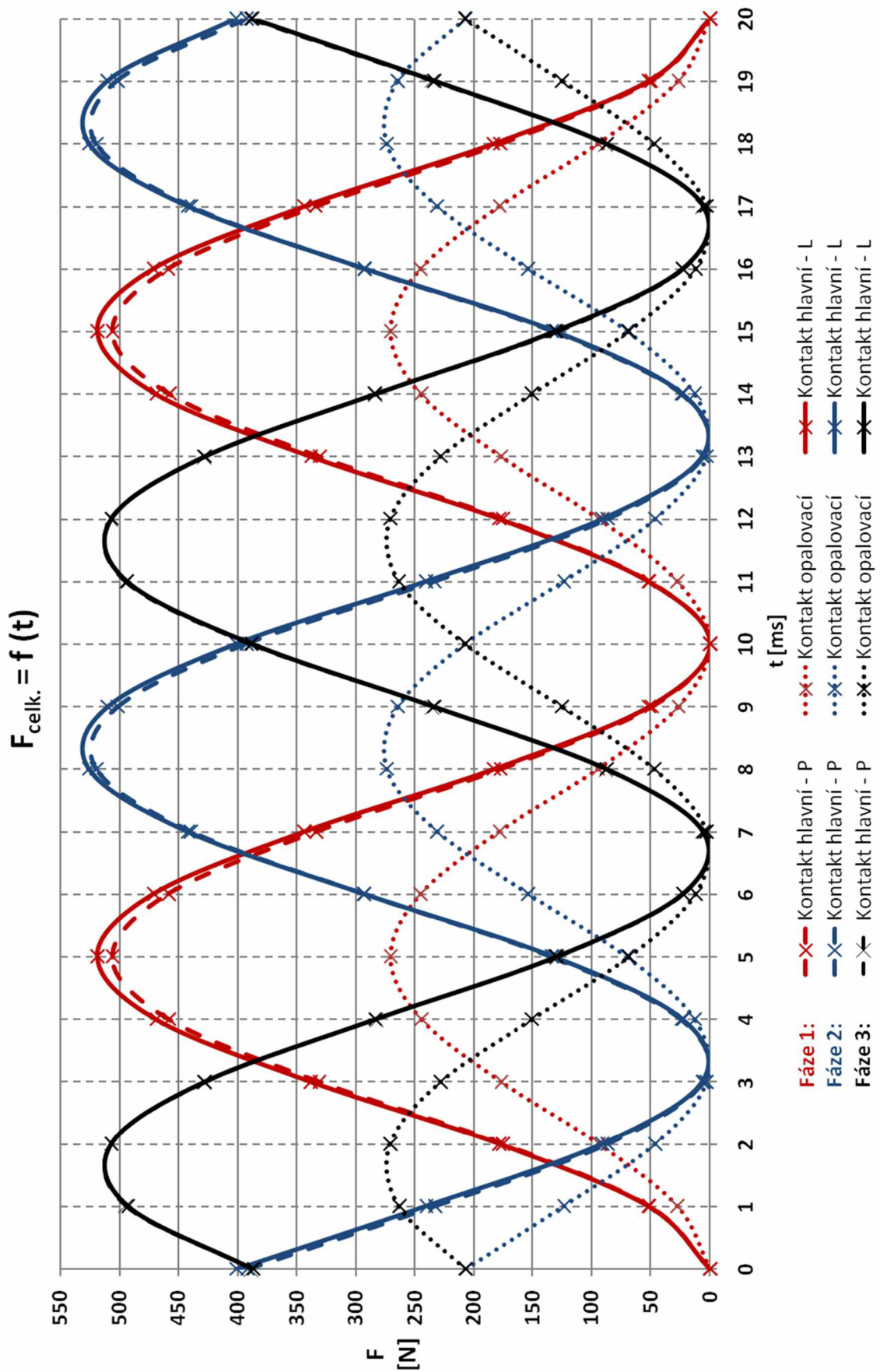


9.4 Střídavý proud 65kA

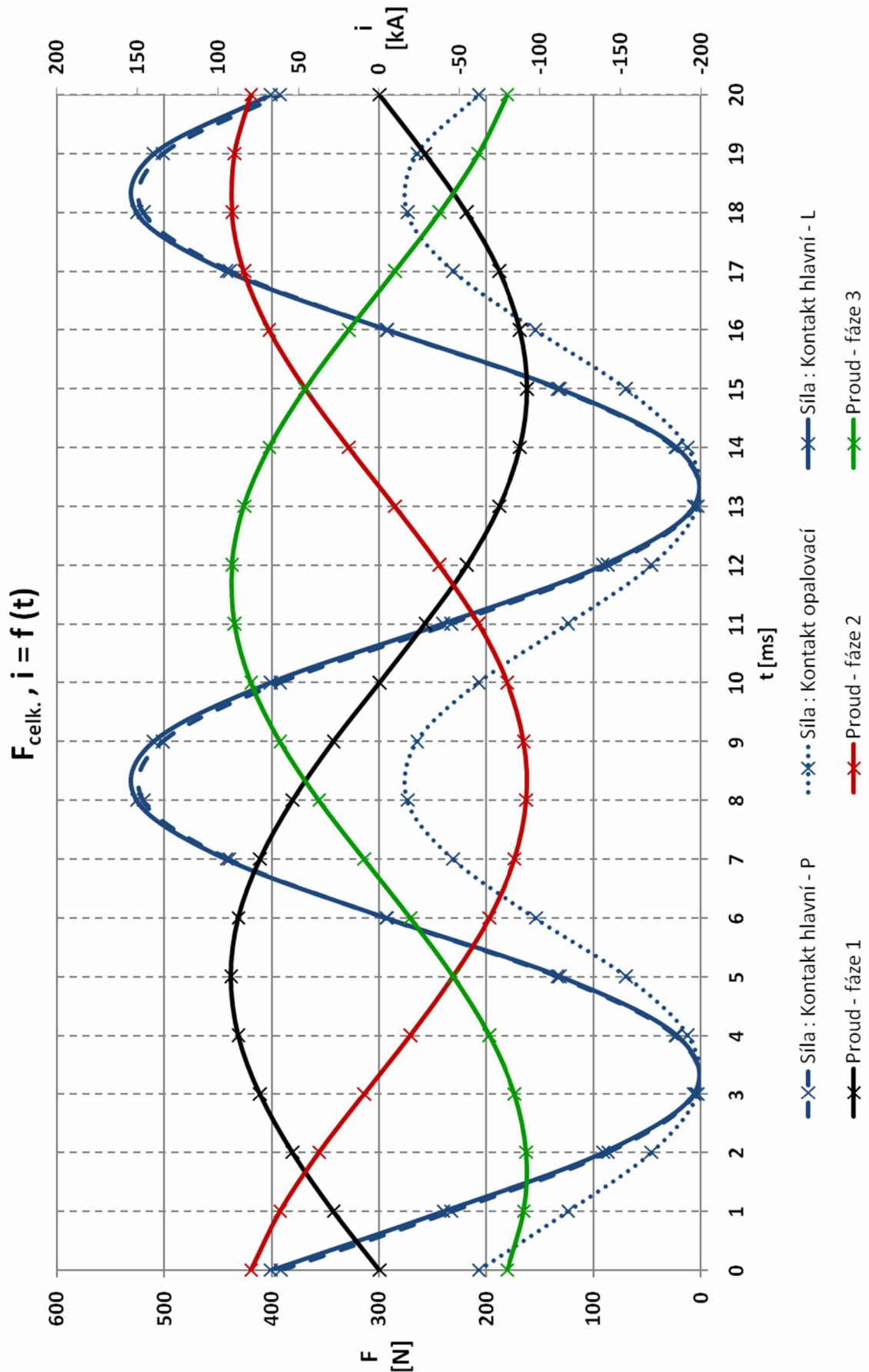
9.4.1 Graf momentů M pro střídavý proud 65kA:



9.4.2 Graf výsledné odpudivé síly $F_{celk.}$ pro střídavý proud 65kA:



9.4.3 Graf výsledné odporivé síly $F_{celk.}$ fáze L2 se zobrazením průběhů proudů:



9.5 Zhodnocení výsledků

Při dynamickém výpočtu jsme počítali elektrodynamické síly pro ustálený střídavý proud o hodnotách 10, 25 a 65kA efektivních. Výpočet nám umožnil sledovat měnící se síly v časovém intervalu 20ms. Tento časový úsek odpovídá jedné periodě při frekvenci sítě 50Hz.

Z vypočítaných hodnot momentů, jsme vytvořili grafické průběhy pro jednotlivé proudy. Grafy obsahují všechny momenty, působící v místě pohyblivých kontaktů, pro jednotlivé fáze. Máme-li v každé fázi tři pohyblivé kontakty, vznikne nám pro nastavený proud devět průběhů v jednom grafu. V grafu 9.2.1 vidíme, že výsledný moment na kontaktech hlavních vychází kladný a v jednotlivých fázích přibližně stejný. Na kontaktech opalovacích vychází moment záporný a je přibližně pětkrát menší. To je způsobeno vzájemným ovlivňováním jednotlivých kontaktů. Této skutečnosti využíváme, jelikož nám po přepočítání momentu na výslednou sílu vychází na opalovacích kontaktech nejmenší odpudivá síla. V průbězích 9.3.1 a 9.4.1 jsou zobrazeny průběhy momentů pro proudy 25kA a 65kA. Poměry mezi kontakty hlavními a opalovacími jsou podobné jako v předcházejícím případě. Nejvyšší moment vychází v druhé fázi na hlavním levém kontaktu při průchodu zkratového proudu 65kA a to $M=10Nm$.

Z určených momentů, jsem postupem pospaným v kapitole 6, vypočítali výsledné síly působící na jednotlivé kontakty. Z těchto hodnot jsme vytvořili průběhy sil v jednotlivých fázích. V průbězích 9.2.2, 9.3.2 a 9.4.2 vidíme, že ze záporných momentů, které vycházely na opalovacích kontaktech, se stala kladná (odpudivá) síla. Tato skutečnost je způsobena působením odpudivé síly F_u , působící v proudové úžině. Pro proud 10kA vychází maximální síla na kontaktech hlavních $F_{celk.} = 13,14N$. Pro kontakty opalovací je tato síla přibližně poloviční $F_{celk.} = 6,84N$. Pro proud 25kA vychází maximální síla na kontaktech hlavních $F_{celk.} = 80,49N$ a na kontaktech opalovacích $F_{celk.} = 41,81N$. Pro zkratový proud 65kA vychází maximální síla na kontaktech hlavních $F_{celk.} = 525,87N$. Pro kontakty opalovací je tato síla opět přibližně poloviční $F_{celk.} = 273,91N$. Z vypočítaných hodnot vidíme, že při spínání zkratového proudu 25 kA, dochází již k nadskočení hlavních kontaktů.

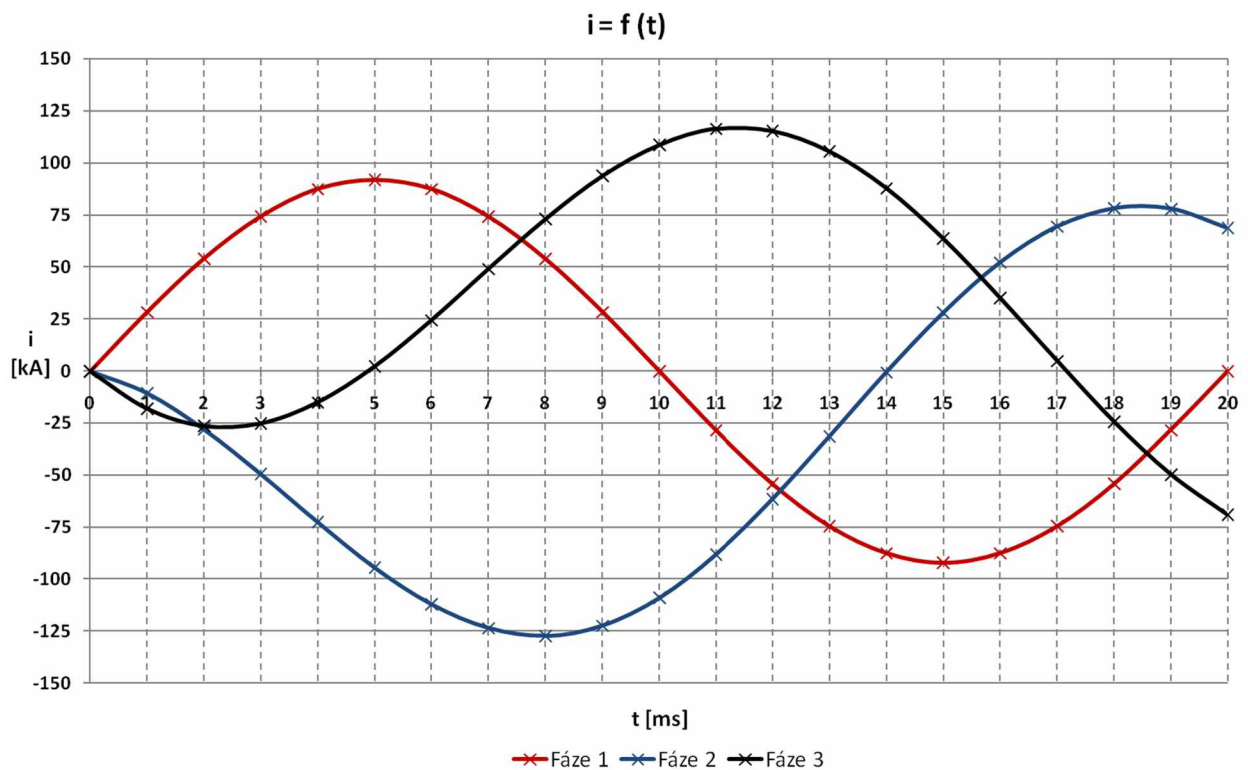
Tato část práce je také doplněna o grafy výsledných odpudivých sil $F_{celk.}$ v druhé fázi, při zobrazení okamžitých hodnot proudů, tekoucích v jednotlivých fázích. Veškeré vypočítané hodnoty, týkající se dynamického výpočtu sil, v kapitole 9, jsou zaznamenány v tabulkách, které jsou umístěny v příloze B až D této diplomové práce.

10 DYNAMICKÝ VÝPOČET SÍLY S PŘECHODOVÝM JEVEM PRO STŘÍDAVÝ PROUD 65kA

Při dynamickém výpočtu s přechodovým jevem zjišťujeme moment a elektrodynamické síly pro neustálý střídavý proud o hodnotě 65kA efektivních. Tento výpočet nám umožňuje sledovat měnící se síly v jednotlivých fázích v určitém časovém intervalu. Čas pro výpočet byl opět zvolen na 20ms, což odpovídá jedné periodě při frekvenci sítě 50Hz.

Při současném spínání v jednotlivých fázích, jsou napětí ve všech fázích stejná, časově posunutá o úhel $2/3\pi$. Jsou-li jednotlivé fáze stejně zatíženy, je stejná ustálená složka proudu a ve všech fázích posunutí o stejný úhel φ vzhledem k napětí. Průběhy přechodových složek jsou různé, protože jejich počáteční velikosti v jednotlivých fázích nejsou stejné. V grafu (10-1) vidíme průběhy proudů, pro hodnotu proudu 65kA efektivních. [2]

Nastavení proudů:



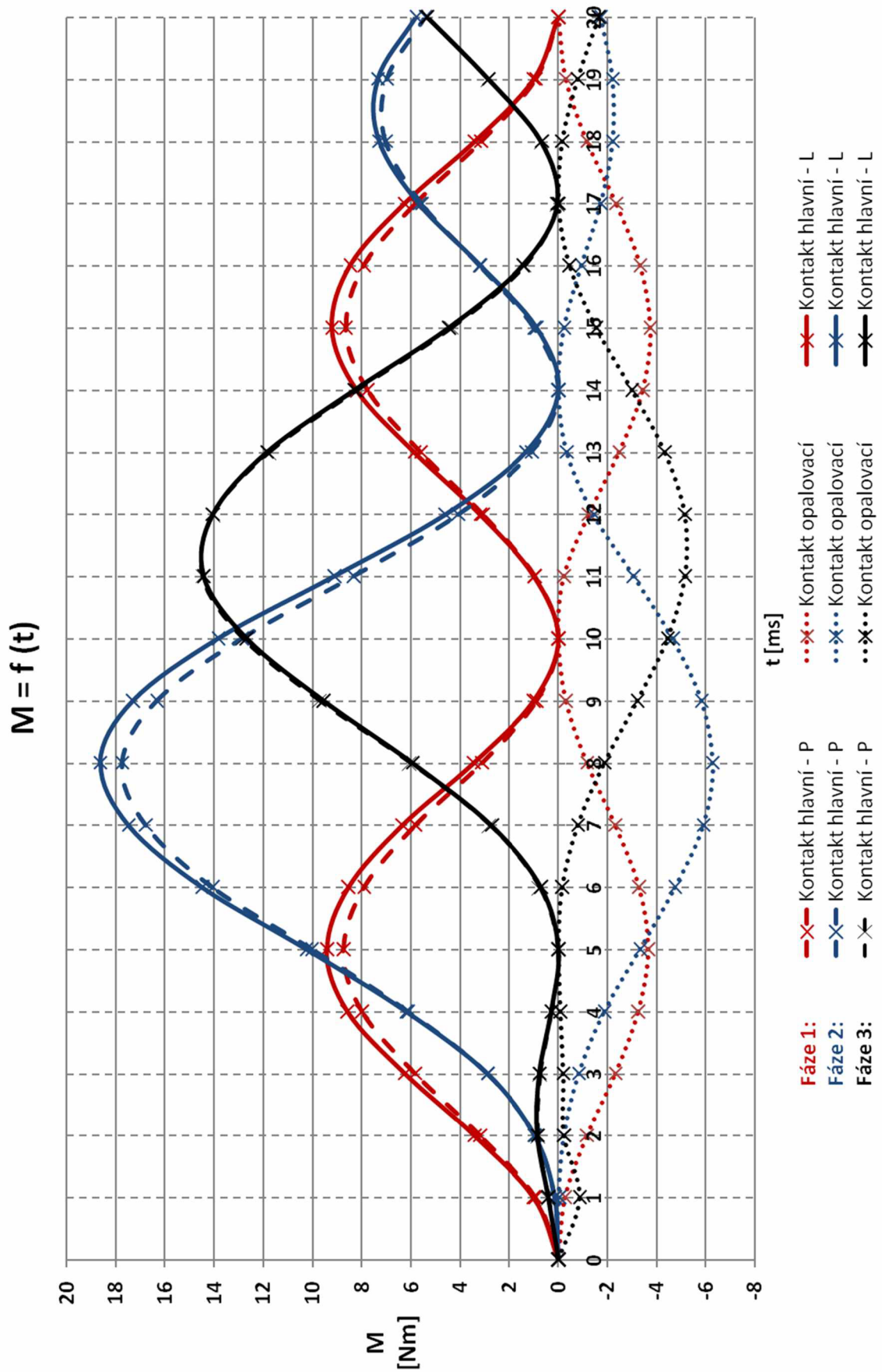
Graf 10-1: Zapínání obvodu trojfázové soustavy (65kA)

Fáze 1:
$$i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot TIME) \quad (10.1)$$

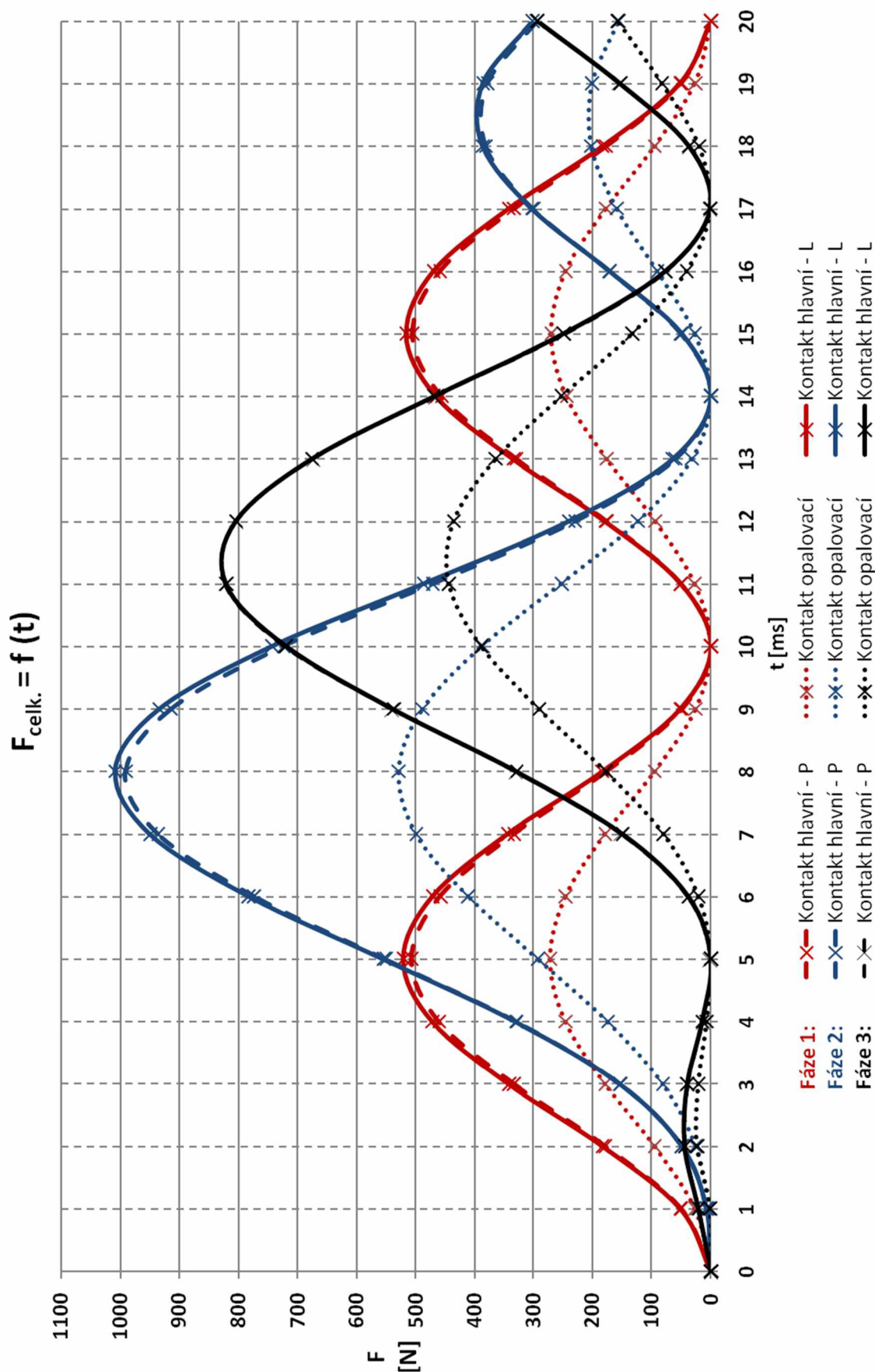
Fáze 2:
$$i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \left\{ \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot TIME + \frac{2}{3} \cdot \pi\right) - \sin\left[\left(\frac{2}{3} \cdot f\right) \cdot e^{\frac{TIME}{0,01}}\right] \right\} \quad (10.2)$$

Fáze 3:
$$i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \left\{ \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot TIME + \frac{4}{3} \cdot \pi\right) - \sin\left[\left(\frac{4}{3} \cdot f\right) \cdot e^{\frac{TIME}{0,01}}\right] \right\} \quad (10.3)$$

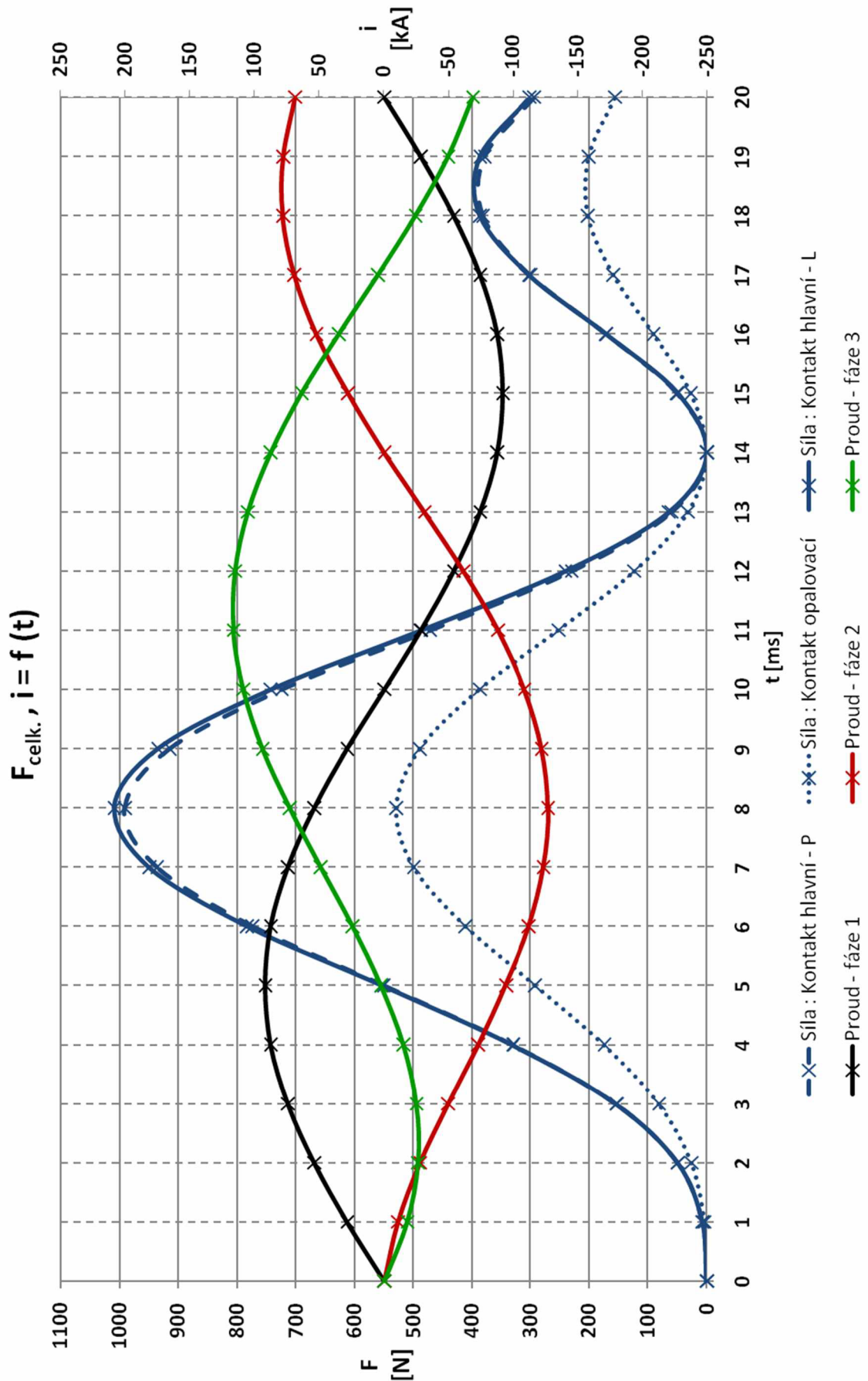
10.1 Graf momentů M pro střídavý proud 65 kA – přechodový jev:

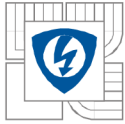


10.2 Graf výsledné odporivé síly $F_{celk.}$ pro střídavý proud 65kA - přechodový jev:



10.3 Graf výsledné odporuvé síly $F_{celk.}$ fáze L2 se zobrazením průběhů proudů:



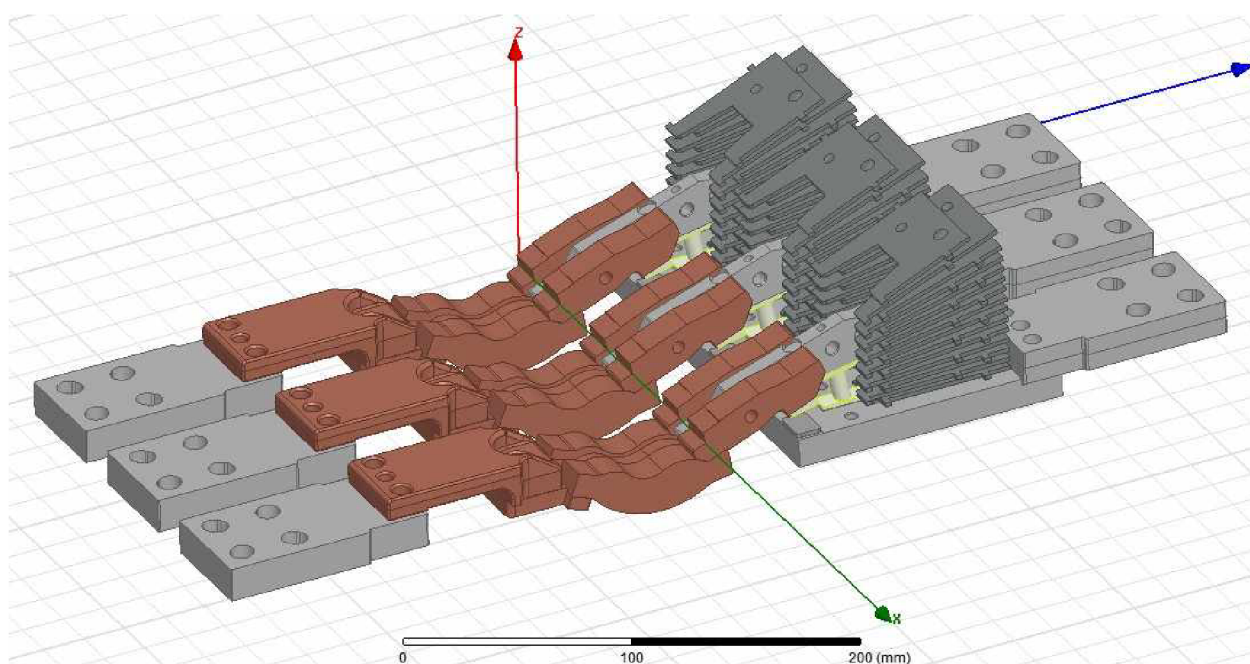


10.4 Zhodnocení výsledků:

Z výpočtu elektrodynamických sil, které působí na pohyblivé kontakty proudovodné dráhy, při průchodu střídavého proudu 65kA efektivních, s přechodovým jevem, jsme zjistili, že nejvyšší síla působí na hlavní kontakty druhé fáze v čase 8 ms. Výsledná síla dosahuje maximální velikosti 1009N. Porovnáme-li tuto hodnotu s maximální velikostí síly, kterou jsme určili v kapitole 9, kde jsme počítali sílu pro ustálený proud 65kA, vidíme, že rozdíl činí 484N. Ve třetí fázi dosahuje síla svého maxima v čase 11,5ms a je rovna 825N. V první fázi, kde nám nefiguruje žádný posun, je maximální hodnota výsledné síly stejná jako při výpočtu pro ustálený proud.

11 STACIONÁRNÍ VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL PŘI ELEKTRICKÉM OBLOUKU

V této kapitole simulujeme vypínání zkratového proudu 25, 45 a 65kA. Z předcházejících výpočtů víme, že při vypínání zkratového proudu, vzniká na opalovacích kontaktech elektrický oblouk. Při této simulaci se budeme zajímat o síly působící na pohyblivé kontakty a také o sílu, která vhání elektrický oblouk do prostoru zhášecí komory. Výpočet je prováděn pro situaci, kdy pohyblivé kontakty proudovodné dráhy jsou v rozpojené poloze a na opalovacích kontaktech vzniká elektrický oblouk (Obrázek 11-1).



Obrázek 11-1: Proudovodná dráha s obloukem na opalovacích kontaktech

11.1 Síla působící na pohyblivé kontakty

Při výpočtu se zabýváme silami vznikajícími na pohyblivých kontaktech proudovodné dráhy. Jedná se o stacionární výpočet, se stejným nastavením parametrů, jako v kapitole 6. V první řadě zjistíme moment, působící kolem osy x a následně tento moment přepočítáme podle vzorce (6.7) na výslednou sílu F , působící v místě styku pohyblivého kontaktu. V kapitole (6) musíme tuto sílu rozložit do jednotlivých složek F_z a F_y a následně přičíst sílu vznikající v proudové úžině F_u . Zde tento krok vynecháme, jelikož pohyblivé a pevné kontakty na sebe nedosedají. Tudíž síla F_u , vznikající v proudové úžině, se nám při tomto výpočtu neuplatňuje.

Tabulka 11-1: Síla působící na pohyblivé kontakty (fáze1)

Proud	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	$F_{\text{celk. [N]}}$	$F_{\text{celk. [N]}}$	$F_{\text{celk. [N]}}$
25	0	218,22	0
45	0	644,68	0
65	0	1269,93	0

Tabulka 11-2: Síla působící na pohyblivé kontakty (fáze2)

Proud	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	$F_{\text{celk. [N]}}$	$F_{\text{celk. [N]}}$	$F_{\text{celk. [N]}}$
25	0	59,17	0
45	0	173,73	0
65	0	339,42	0

Tabulka 11-3: Síla působící na pohyblivé kontakty (fáze3)

Proud	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	$F_{\text{celk. [N]}}$	$F_{\text{celk. [N]}}$	$F_{\text{celk. [N]}}$
25	0	58,77	0
45	0	171,43	0
65	0	331,85	0

11.2 Vliv zhášecí komory na elektrický oblouk

V této kapitole zjistíme síly, které působí na elektrický oblouk, při průchodu zkratového proudu 25, 45 a 65kA. Chceme-li určit vliv zhášecí komory na elektrodynamické síly, které působí na elektrický oblouk, musíme vypočítat obě varianty. Proto provedeme výpočet síly působící na elektrický oblouk se zhášecí komorou a následně spustíme stejný výpočet se zanedbáním zhášecí komory. Síly uvedené v tabulkách (11-4) až (11-9) jsou síly působící na celý objem elektrického oblouku, ve směru osy x , y , z . Nejedná se o sílu rotační, ale o sílu posuvnou. My se nejvíce zajímáme o sílu ve směru osy y . Síla $F(y)$ nám reprezentuje sílu, která vtahuje elektrický oblouk směrem dovnitř zhášecí komory. Toto je také jedna z velmi užitečných vlastností zhášecí komory, jelikož dochází k rychlému přemístění elektrického oblouku z prostoru kontaktního ústrojí.

11.2.1 Proud 25 kA

Tabulka 11-4: Se zhášecí komorou

Fáze	F(x)	F(y)	F(z)
	[N]	[N]	[N]
L1	14,931	133,19	113,9
L2	-25,501	42,243	30,697
L3	2,902	41,874	30,883

Tabulka 11-5: Bez zhášecí komory

Fáze	F(x)	F(y)	F(z)
	[N]	[N]	[N]
L1	13,393	64,178	99,562
L2	-14,034	16,133	24,967
L3	2,445	16,762	25,27

11.2.2 Proud 45 kA

Tabulka 11-6: Se zhášecí komorou

Fáze	F(x)	F(y)	F(z)
	[N]	[N]	[N]
L1	54,712	343,91	352,1
L2	-74,55	105,86	92,57
L3	11,15	107,85	92,84

Tabulka 11-7: Bez zhášecí komory

Fáze	F(x)	F(y)	F(z)
	[N]	[N]	[N]
L1	43,39	207,95	322,61
L2	-45,47	52,27	80,91
L3	7,92	54,31	81,88

11.2.3 Proud 65 kA

Tabulka 11-8: Se zhášecí komorou

Fáze	F(x)	F(y)	F(z)
	[N]	[N]	[N]
L1	117,38	625,16	718,31
L2	-143,97	186,67	185,01
L3	26,073	190,61	185,77

Tabulka 11-9: Bez zhášecí komory

Fáze	F(x)	F(y)	F(z)
	[N]	[N]	[N]
L1	90,544	433,87	673,09
L2	-94,879	109,06	168,79
L3	16,535	113,32	170,84

11.3 Zhodnocení výsledků

Nejvyšší odpudivá síla, působící na pohyblivé kontakty, vychází $F_{celk.}=1269,9N$ na opalovacím kontaktu první fáze, při průchodu zkratového proudu 65kA efektivních. Síla při průchodu zkratového proudu 25kA efektivních, vychází na opalovacím kontaktu první fáze, $F_{celk.}=218N$. Vypočítané hodnoty jsou zaznamenány v tabulkách (11-1) až (11-3).

Při výpočtu síly působící na elektrický oblouk, jsme zjistili, že při průchodu proudu 25kA efektivních (proudovodná dráha se zhášecí komorou), vychází vtahující síla $F(y)$ o 69N vyšší, to je přibližně o 107% více než bez zhášecí komory. Při nastavení proudu 45 kA (proudovodná dráha se zhášecí komorou), vychází vtahující síla o 136N vyšší, to je o 65% více než bez zhášecí komory. A při nastavení maximálního zkratového proudu 65 kA efektivních, vychází vtahující síla o 191N vyšší, to je přibližně o 44% více než bez zhášecí komory. Z těchto výsledků je zřejmé, že zhášecí komora má velký vliv na elektrodynamickou sílu $F(y)$, která vtahuje elektrický oblouk do prostoru zhášecí komory. Vypočítané hodnoty jsou zaznamenány v tabulkách (11-4) až (11-9).

12 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo popsat princip vzniku elektrodynamických sil a vytvořit podrobný rozbor konstrukčního uspořádání vybraného kompaktního jističe BL1600 od firmy OEZ Letohrad. Tyto dva základní body jsou splněny v druhé a třetí kapitole. Následně bylo požadováno, na vytvořeném modelu proudovodné dráhy, provést výpočty elektrodynamických sil působících na pohyblivé kontakty jisticího prvku. Pro výpočet jsme využívali program Ansys Maxwell.

Zjistili jsme, že výrobcem nastavená přitlačná síla na kontakty hlavní $F = 70\text{N}$ a kontakty opalovací $F = 130\text{N}$ udrží pohyblivé kontakty v zapnuté poloze až do hodnoty zkratového proudu 20kA efektivních. Do této hodnoty proudu by nemělo při spínání docházet k odskoku pohyblivých kontaktů. Z vypočítaných hodnot také vidíme, že v celém vypínacím rozsahu je zaručeno rozpojení kontaktů hlavních dříve než kontaktů opalovacích. Toto je pro jisticí prvek velmi důležitá vlastnost, jelikož nedochází ke zkracování životnosti hlavních kontaktů.

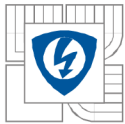
V kapitole 7 jsme si potvrdili, že proudy tekoucí stejným směrem vyvolávají přitažlivé účinky. To je viditelné z vypočítaných hodnot sil v jednotlivých fázích, kde se nám hlavní kontakty přitahují. Dochází také k vzájemnému ovlivňování od jednotlivých fází. Na obrázku 7-1 vidíme, že proud tekoucí první fází, který má dvojnásobnou velikost a opačný směr vytváří odpuzující sílu, která působí na kontakty druhé fáze. Zde mají všechny síly stejný směr a dochází zde k vyrušení přitažlivosti hlavních kontaktů druhé fáze.

V další části práce jsme se zabývali vlivem zhášecí komory na elektrodynamické síly, působící na pohyblivé kontakty. Z výpočtů jsme zjistili, že výsledná odpudivá síla $F_{celk.}$ klesla při zanedbání zhášecí komory přibližně o 10%. Tento pokles je způsoben zeslabením magnetického pole v okolí pohyblivých kontaktů. Na samotnou sílu F_z , v ose z , má zhášecí komora větší vliv, ovšem pokles na výsledných 10% je zapříčiněn připočtením vlivu odpudivé síly F_u , která vzniká v proudové úžině. Pro náš jisticí prvek jsme zjistili, že odpudivá síla vznikající v proudové úžině tvoří přibližně 65% výsledné odpudivé síly $F_{celk.}$

V kapitole 10, kde jsme řešili výpočet elektrodynamických sil při zapínání obvodu trojfázové soustavy, jsme zjistili, že nejvyšší síla působí na hlavní kontakty druhé fáze v čase 8ms . Pro proud 65kA efektivních vychází maximální síla $F_{celk.} = 1009\text{N}$. Porovnáme-li tuto hodnotu s maximální velikostí síly, kterou jsme určili v kapitole 9, kde jsme počítali sílu pro ustálený proud 65kA , vidíme, že rozdíl činí 484N . Ve třetí fázi dosahuje síla svého maxima v čase $11,5\text{ms}$ a je rovna 825N . V první fázi, kde nám nefiguruje žádný posun, je maximální hodnota výsledné síly stejná, jako při výpočtu pro ustálený proud.

Výrazných výsledků jsme také dosáhli při simulaci vypínání zkratového proudu, kdy pohyblivé kontakty proudovodné dráhy jsou v rozpojené poloze a na opalovacích kontaktech vzniká elektrický oblouk. Zde nás zajímali síly působící na pohyblivé opalovací kontakty a síla vtahující elektrický oblouk do prostoru zhášecí komory. Z výsledků je zřetelné, že zhášecí komora má velký vliv na sílu vtahující elektrický oblouk do prostoru zhášecí komory. Při výpočtu síly působící na elektrický oblouk, se zhášecí komorou, jsme zjistili, že při průchodu proudu 25kA efektivních, vychází vtahující síla $F(y)$ o 69N vyšší, to je přibližně o 107% více než bez zhášecí komory. Pro zkratový proud 65kA efektivních činí tento rozdíl sil 191N .

Všechny zjištěné výsledky jsou detailněji popsány v dílčích závěrech u jednotlivých kapitol.



LITERATURA

- [1] MUSIL, P. *Rozložení proudu a tepelné ztráty v jističi nízkého napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 52 s.
- [2] HAVELKA O. A KOL., *Elektrické přístroje*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1985. 440 s. ISBN 04-529-85.
- [3] BUŠOV, Bohuslav. 2013. Stavba a výroba elektrických přístrojů, s. 47.
- [4] *Kompaktní jističe Modeion* [online]. [cit. 2014-10-31]. Katalog OEZ, s. . Dostupné z WWW: <<http://www.oez.cz/file/366>>.
- [5] *Příručka elektrotechnika* [online]. [cit. 2014-11-1]. OEZ, s. . Dostupné z WWW: <<http://www.oez.cz/ke-stazeni/prirucky> >.
- [6] VALENTA, Jiří. 2011. Diagnostika a jistění elektrických zařízení, s. 99.
- [7] FALTUS, Ivo. Výklad a praktický význam parametrů jisticích přístrojů a odpínačů nn. *Odborné časopisy pro elektrotechniku* [online]. 2005, 8, [cit. 2011-11-28]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26413>.
- [8] DĚDKOVÁ, Jarmila. *Modelování elektromagnetických polí*. první. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4401-0.
- [9] HAVELKA O. A KOL., *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. Vysoké učení technické v Brně, 1985. 188 s.

Příloha A: Tabulky pro stacionární výpočet se zanedbáním zhášecí komory

Síla F v ose kontaktu

Tabulka A-1: Síla působící v první fázi

Proud	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F [N]	F [N]	F [N]
10	3,64	-1,09	3,86
25	22,76	-6,84	24,07
65	153,87	-46,22	162,76

Tabulka A-2: Síla působící v druhé fázi

Proud	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F [N]	F [N]	F [N]
10	1,09	-0,24	0,92
25	6,78	-1,48	5,81
65	45,81	-10,07	39,31

Tabulka A-3: Síla působící v třetí fázi

Proud	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F [N]	F [N]	F [N]
10	0,80	-0,28	0,90
25	5,07	-1,71	5,59
65	34,22	-11,63	37,86

Rozložení síly do složek F_z a F_y

Tabulka A-4: Síla F_z a F_y působící v první fázi

Proud	Fáze 1					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
[kA]	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]
10	3,59	0,57	-1,08	-0,11	3,81	0,60
25	22,48	3,56	-6,80	-0,70	23,77	3,76
65	151,98	24,04	-45,97	-4,76	160,76	25,43

Tabulka A-5: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi

Proud	Fáze 2					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
[kA]	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]
10	1,07	0,17	-0,24	-0,02	0,91	0,14
25	6,69	1,06	-1,48	-0,15	5,74	0,91
65	45,24	7,16	-10,02	-1,04	38,83	6,14

Tabulka A-6: Síla F_z a F_y působící v třetí fázi

Proud	Fáze 3					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
[kA]	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]	F_z [N]	F_y [N]
10	0,79	0,13	-0,28	-0,03	0,89	0,14
25	5,01	0,79	-1,70	-0,18	5,52	0,87
65	33,80	5,35	-11,57	-1,20	37,40	5,92

Odpudivé síly F_u v proudové úžině

Tabulka A-7: Síla v proudové úžině (Fáze 1)

Proud	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
10	7,87	7,57	7,87
25	49,21	47,28	49,21
65	332,66	319,64	332,66

Tabulka A-8: Síla v proudové úžině (Fáze 2)

Proud	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
10	1,97	1,89	1,97
25	12,30	11,82	12,30
65	83,17	79,91	83,17

Tabulka A-9: Síla v proudové úžině (Fáze 3)

Proud	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[kA]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
10	1,97	1,89	1,97
25	12,30	11,82	12,30
65	83,17	79,91	83,17

Příloha B: Tabulky pro dynamický výpočet 10kA

Vypočítaný moment pomocí programu Ansys Maxwell

Tabulka B-1: Moment působící v první fázi (10kA)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P M [Nm]	Kontakt opalovací M [Nm]	Kontakt hlavní - L M [Nm]
0	0	0	0
1	0,024	-0,004	0,026
2	0,087	-0,017	0,092
3	0,162	-0,035	0,172
4	0,222	-0,049	0,236
5	0,244	-0,057	0,259
6	0,219	-0,052	0,234
7	0,158	-0,037	0,169
8	0,083	-0,02	0,089
9	0,023	-0,005	0,025
10	0	0	0
11	0,024	-0,004	0,025
12	0,086	-0,017	0,091
13	0,162	-0,035	0,172
14	0,222	-0,049	0,236
15	0,244	-0,057	0,259
16	0,219	-0,052	0,234
17	0,158	-0,037	0,17
18	0,083	-0,02	0,089
19	0,023	-0,005	0,025
20	0	0	0

Tabulka B-2: Moment působící v druhé fázi (10kA)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P M [Nm]	Kontakt opalovací M [Nm]	Kontakt hlavní - L M [Nm]
0	0,194	-0,035	0,208
1	0,115	-0,022	0,125
2	0,042	-0,007	0,047
3	0,002	0	0,004
4	0,012	-0,002	0,011
5	0,066	-0,011	0,066
6	0,145	-0,025	0,148
7	0,217	-0,041	0,225
8	0,256	-0,049	0,268

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
9	0,246	-0,048	0,26
10	0,192	-0,038	0,205
11	0,114	-0,023	0,124
12	0,042	-0,008	0,047
13	0,002	0	0,004
14	0,012	-0,001	0,011
15	0,066	-0,011	0,066
16	0,145	-0,025	0,148
17	0,217	-0,041	0,225
18	0,256	-0,049	0,268
19	0,246	-0,048	0,26
20	0,192	-0,038	0,205

Tabulka B-3: Moment působící ve třetí fázi (10kA)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
0	0,195	-0,037	0,193
1	0,248	-0,049	0,246
2	0,255	-0,054	0,253
3	0,215	-0,046	0,214
4	0,142	-0,031	0,143
5	0,065	-0,013	0,066
6	0,012	-0,002	0,012
7	0,002	0	0,002
8	0,043	-0,007	0,041
9	0,116	-0,022	0,114
10	0,194	-0,037	0,192
11	0,247	-0,049	0,245
12	0,255	-0,054	0,253
13	0,215	-0,046	0,215
14	0,143	-0,031	0,143
15	0,065	-0,013	0,066
16	0,012	-0,002	0,012
17	0,002	0	0,002
18	0,042	-0,007	0,041
19	0,115	-0,021	0,113
20	0,194	-0,037	0,192

Síla F v ose kontaktu

Tabulka B-4: Síla působící v první fázi (10kA)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P F [N]	Kontakt opalovací F [N]	Kontakt hlavní - L F [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	0,48	-0,05	0,52
2	1,75	-0,23	1,85
3	3,26	-0,46	3,46
4	4,46	-0,65	4,75
5	4,91	-0,76	5,21
6	4,40	-0,69	4,71
7	3,18	-0,49	3,40
8	1,67	-0,27	1,79
9	0,46	-0,07	0,50
10	0,00	0,00	0,00
11	0,48	-0,05	0,50
12	1,73	-0,23	1,83
13	3,26	-0,46	3,46
14	4,46	-0,65	4,75
15	4,91	-0,76	5,21
16	4,40	-0,69	4,71
17	3,18	-0,49	3,42
18	1,67	-0,27	1,79
19	0,46	-0,07	0,50
20	0,00	0,00	0,00

Tabulka B-5: Síla působící v druhé fázi (10kA)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P F [N]	Kontakt opalovací F [N]	Kontakt hlavní - L F [N]
0	3,90	-0,46	4,18
1	2,31	-0,29	2,51
2	0,84	-0,09	0,95
3	0,04	0,00	0,08
4	0,24	-0,03	0,22
5	1,33	-0,15	1,33
6	2,92	-0,33	2,98
7	4,36	-0,54	4,52
8	5,15	-0,65	5,39

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F [N]	F [N]	F [N]
9	4,95	-0,64	5,23
10	3,86	-0,5	4,12
11	2,29	-0,30	2,49
12	0,84	-0,11	0,95
13	0,04	0,00	0,08
14	0,24	-0,01	0,22
15	1,33	-0,15	1,33
16	2,92	-0,33	2,98
17	4,36	-0,54	4,52
18	5,15	-0,65	5,39
19	4,95	-0,64	5,23
20	3,86	-0,50	4,12

Tabulka B-6: Síla působící v třetí fázi (10kA)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F [N]	F [N]	F [N]
0	3,92	-0,49	3,88
1	4,99	-0,65	4,95
2	5,13	-0,72	5,09
3	4,32	-0,61	4,30
4	2,86	-0,41	2,88
5	1,31	-0,17	1,33
6	0,24	-0,03	0,24
7	0,04	0,00	0,04
8	0,86	-0,09	0,82
9	2,33	-0,29	2,29
10	3,90	-0,49	3,86
11	4,97	-0,65	4,93
12	5,13	-0,72	5,09
13	4,32	-0,61	4,32
14	2,88	-0,41	2,88
15	1,31	-0,17	1,33
16	0,24	-0,03	0,24
17	0,04	0,00	0,04
18	0,84	-0,09	0,82
19	2,31	-0,28	2,27
20	3,90	-0,49	3,86

Rozložení síly do složek F_z a F_y

Tabulka B-7: Síla F_z a F_y působící v první fázi (10kA)

ČAS [ms]	Fáze 1					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,48	0,08	-0,05	-0,01	0,52	0,08
2	1,73	0,27	-0,22	-0,02	1,83	0,29
3	3,22	0,51	-0,46	-0,05	3,42	0,54
4	4,41	0,70	-0,65	-0,07	4,69	0,74
5	4,85	0,77	-0,75	-0,08	5,14	0,81
6	4,35	0,69	-0,69	-0,07	4,65	0,74
7	3,14	0,50	-0,49	-0,05	3,36	0,53
8	1,65	0,26	-0,26	-0,03	1,77	0,28
9	0,46	0,07	-0,07	-0,01	0,50	0,08
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,48	0,08	-0,05	-0,01	0,50	0,08
12	1,71	0,27	-0,22	-0,02	1,81	0,29
13	3,22	0,51	-0,46	-0,05	3,42	0,54
14	4,41	0,70	-0,65	-0,07	4,69	0,74
15	4,85	0,77	-0,75	-0,08	5,14	0,81
16	4,35	0,69	-0,69	-0,07	4,65	0,74
17	3,14	0,50	-0,49	-0,05	3,38	0,53
18	1,65	0,26	-0,26	-0,03	1,77	0,28
19	0,46	0,07	-0,07	-0,01	0,50	0,08
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabulka B-8: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi (10kA)

ČAS [ms]	Fáze 2					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	3,85	0,61	-0,46	-0,05	4,13	0,65
1	2,28	0,36	-0,29	-0,03	2,48	0,39
2	0,83	0,13	-0,09	-0,01	0,93	0,15
3	0,04	0,01	0,00	0,00	0,08	0,01
4	0,24	0,04	-0,03	0,00	0,22	0,03
5	1,31	0,21	-0,14	-0,02	1,31	0,21
6	2,88	0,46	-0,33	-0,03	2,94	0,46
7	4,31	0,68	-0,54	-0,06	4,47	0,71
8	5,08	0,80	-0,65	-0,07	5,32	0,84
9	4,89	0,77	-0,63	-0,07	5,16	0,82
10	3,81	0,60	-0,50	-0,05	4,07	0,64

ČAS [ms]	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
11	2,26	0,36	-0,30	-0,03	2,46	0,39
12	0,83	0,13	-0,11	-0,01	0,93	0,15
13	0,04	0,01	0,00	0,00	0,08	0,01
14	0,24	0,04	-0,01	0,00	0,22	0,03
15	1,31	0,21	-0,14	-0,02	1,31	0,21
16	2,88	0,46	-0,33	-0,03	2,94	0,46
17	4,31	0,68	-0,54	-0,06	4,47	0,71
18	5,08	0,80	-0,65	-0,07	5,32	0,84
19	4,89	0,77	-0,63	-0,07	5,16	0,82
20	3,81	0,60	-0,50	-0,05	4,07	0,64

Tabulka B-9: Síla F_z a F_y působící v třetí fázi (10kA)

ČAS [ms]	Fáze 3					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	3,87	0,61	-0,49	-0,05	3,83	0,61
1	4,93	0,78	-0,65	-0,07	4,89	0,77
2	5,06	0,80	-0,71	-0,07	5,02	0,79
3	4,27	0,68	-0,61	-0,06	4,25	0,67
4	2,82	0,45	-0,41	-0,04	2,84	0,45
5	1,29	0,20	-0,17	-0,02	1,31	0,21
6	0,24	0,04	-0,03	0,00	0,24	0,04
7	0,04	0,01	0,00	0,00	0,04	0,01
8	0,85	0,14	-0,09	-0,01	0,81	0,13
9	2,30	0,36	-0,29	-0,03	2,26	0,36
10	3,85	0,61	-0,49	-0,05	3,81	0,60
11	4,91	0,78	-0,65	-0,07	4,87	0,77
12	5,06	0,80	-0,71	-0,07	5,02	0,79
13	4,27	0,68	-0,61	-0,06	4,27	0,68
14	2,84	0,45	-0,41	-0,04	2,84	0,45
15	1,29	0,20	-0,17	-0,02	1,31	0,21
16	0,24	0,04	-0,03	0,00	0,24	0,04
17	0,04	0,01	0,00	0,00	0,04	0,01
18	0,83	0,13	-0,09	-0,01	0,81	0,13
19	2,28	0,36	-0,28	-0,03	2,24	0,35
20	3,85	0,61	-0,49	-0,05	3,81	0,60

Odpudivé síly F_u v proudové úžině

Tabulka B-10: Odpudivé síly v proudové úžině – 10kA (Fáze 1)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P F_u [N]	Kontakt opalovací F_u [N]	Kontakt hlavní - L F_u [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	0,75	0,72	0,75
2	2,72	2,61	2,72
3	5,15	4,95	5,15
4	7,12	6,84	7,12
5	7,87	7,57	7,87
6	7,12	6,84	7,12
7	5,15	4,95	5,15
8	2,72	2,61	2,72
9	0,75	0,72	0,75
10	0,00	0,00	0,00
11	0,75	0,72	0,75
12	2,72	2,61	2,72
13	5,15	4,95	5,15
14	7,12	6,84	7,12
15	7,87	7,57	7,87
16	7,12	6,84	7,12
17	5,15	4,95	5,15
18	2,72	2,61	2,72
19	0,75	0,72	0,75
20	0,00	0,00	0,00

Tabulka B-11: Odpudivé síly v proudové úžině – 10kA (Fáze 2)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P F_u [N]	Kontakt opalovací F_u [N]	Kontakt hlavní - L F_u [N]
0	5,91	5,67	5,91
1	3,53	3,39	3,53
2	1,30	1,25	1,30
3	0,09	0,08	0,09
4	0,34	0,33	0,34
5	1,97	1,89	1,97
6	4,35	4,18	4,35
7	6,57	6,31	6,57
8	7,79	7,48	7,79
9	7,53	7,24	7,53
10	5,91	5,67	5,91

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
11	3,53	3,39	3,53
12	1,30	1,25	1,30
13	0,09	0,08	0,09
14	0,34	0,33	0,34
15	1,97	1,89	1,97
16	4,35	4,18	4,35
17	6,57	6,31	6,57
18	7,79	7,48	7,79
19	7,53	7,24	7,53
20	5,91	5,67	5,91

Tabulka B-12: Odpudivá síla v proudové úžině – 10kA (Fáze 3)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
0	5,91	5,67	5,91
1	7,53	7,24	7,53
2	7,79	7,48	7,79
3	6,57	6,31	6,57
4	4,35	4,18	4,35
5	1,97	1,89	1,97
6	0,34	0,33	0,34
7	0,09	0,08	0,09
8	1,30	1,25	1,30
9	3,53	3,39	3,53
10	5,91	5,67	5,91
11	7,53	7,24	7,53
12	7,79	7,48	7,79
13	6,57	6,31	6,57
14	4,35	4,18	4,35
15	1,97	1,89	1,97
16	0,34	0,33	0,34
17	0,09	0,08	0,09
18	1,30	1,25	1,30
19	3,53	3,39	3,53
20	5,91	5,67	5,91

Výsledné odpudivé síly $F_{celk.}$

Tabulka B-13: Výsledná odpudivá síla (Fáze 1)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P $F_{celk.}$ [N]	Kontakt opalovací $F_{celk.}$ [N]	Kontakt hlavní - L $F_{celk.}$ [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	1,23	0,67	1,27
2	4,46	2,39	4,56
3	8,39	4,49	8,59
4	11,55	6,20	11,83
5	12,74	6,81	13,04
6	11,49	6,16	11,79
7	8,31	4,46	8,53
8	4,38	2,35	4,50
9	1,21	0,66	1,25
10	0,00	0,00	0,00
11	1,23	0,67	1,25
12	4,44	2,39	4,54
13	8,39	4,49	8,59
14	11,55	6,20	11,83
15	12,74	6,81	13,04
16	11,49	6,16	11,79
17	8,31	4,46	8,55
18	4,38	2,35	4,50
19	1,21	0,66	1,25
20	0,00	0,00	0,00

Tabulka B-14: Výsledná odpudivá síla (Fáze 2)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P $F_{celk.}$ [N]	Kontakt opalovací $F_{celk.}$ [N]	Kontakt hlavní - L $F_{celk.}$ [N]
0	9,78	5,21	10,06
1	5,82	3,10	6,02
2	2,14	1,16	2,24
3	0,13	0,08	0,17
4	0,58	0,30	0,56
5	3,29	1,75	3,29
6	7,24	3,85	7,30
7	10,90	5,77	11,06
8	12,90	6,84	13,14
9	12,44	6,61	12,72
10	9,74	5,17	10,00

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$
11	5,80	3,08	6,00
12	2,14	1,15	2,24
13	0,13	0,08	0,17
14	0,58	0,31	0,56
15	3,29	1,75	3,29
16	7,24	3,85	7,30
17	10,90	5,77	11,06
18	12,90	6,84	13,14
19	12,44	6,61	12,72
20	9,74	5,17	10,00

Tabulka B-15: Výsledná odporivá síla (Fáze 3)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$
0	9,80	5,19	9,76
1	12,48	6,59	12,44
2	12,88	6,77	12,84
3	10,86	5,71	10,84
4	7,18	3,77	7,20
5	3,27	1,72	3,29
6	0,58	0,30	0,58
7	0,13	0,08	0,13
8	2,16	1,16	2,12
9	5,84	3,10	5,80
10	9,78	5,19	9,74
11	12,46	6,59	12,42
12	12,88	6,77	12,84
13	10,86	5,71	10,86
14	7,20	3,77	7,20
15	3,27	1,72	3,29
16	0,58	0,30	0,58
17	0,13	0,08	0,13
18	2,14	1,16	2,12
19	5,82	3,11	5,78
20	9,78	5,19	9,74

Příloha C: Tabulky pro dynamický výpočet 25kA

Vypočítaný moment pomocí programu Ansys Maxwell

Tabulka C-1: Moment působící v první fázi (25kA)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P M [Nm]	Kontakt opalovací M [Nm]	Kontakt hlavní - L M [Nm]
0	0	0	0
1	0,152	-0,028	0,159
2	0,516	-0,134	0,547
3	0,946	-0,282	1,008
4	1,295	-0,4	1,384
5	1,418	-0,452	1,519
6	1,284	-0,405	1,38
7	0,934	-0,285	1,006
8	0,497	-0,144	0,538
9	0,139	-0,036	0,153
10	0	0	0
11	0,15	-0,028	0,158
12	0,515	-0,133	0,546
13	0,945	-0,282	1,006
14	1,294	-0,4	1,382
15	1,418	-0,452	1,519
16	1,286	-0,405	1,381
17	0,936	-0,286	1,008
18	0,499	-0,145	0,541
19	0,141	-0,037	0,154
20	0	0	0

Tabulka C-2: Moment působící v druhé fázi (25kA)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P M [Nm]	Kontakt opalovací M [Nm]	Kontakt hlavní - L M [Nm]
0	1,146	-0,283	1,229
1	0,68	-0,168	0,743
2	0,254	-0,057	0,287
3	0,016	-0,003	0,022
4	0,074	-0,011	0,067
5	0,399	-0,083	0,398
6	0,87	-0,194	0,889
7	1,296	-0,308	1,344

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
8	1,522	-0,376	1,594
9	1,463	-0,369	1,548
10	1,143	-0,288	1,225
11	0,682	-0,169	0,745
12	0,255	-0,057	0,289
13	0,016	-0,003	0,023
14	0,072	-0,011	0,066
15	0,397	-0,083	0,396
16	0,867	-0,193	0,887
17	1,295	-0,307	1,342
18	1,522	-0,376	1,594
19	1,464	-0,369	1,549
20	1,146	-0,289	1,227

Tabulka C-3: Moment působící ve třetí fázi (25kA)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
0	1,126	-0,276	1,135
1	1,43	-0,362	1,446
2	1,467	-0,386	1,487
3	1,237	-0,326	1,26
4	0,822	-0,215	0,842
5	0,384	-0,088	0,399
6	0,068	-0,015	0,074
7	0,016	-0,003	0,015
8	0,258	-0,046	0,256
9	0,684	-0,148	0,687
10	1,136	-0,266	1,147
11	1,436	-0,358	1,452
12	1,469	-0,385	1,489
13	1,239	-0,327	1,262
14	0,824	-0,216	0,845
15	0,386	-0,088	0,402
16	0,069	-0,015	0,075
17	0,016	-0,003	0,014
18	0,256	-0,046	0,254
19	0,682	-0,147	0,685
20	1,135	-0,266	1,145

Síla F v ose kontaktu

Tabulka C-4: Síla působící v první fázi (25kA)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P F [N]	Kontakt opalovací F [N]	Kontakt hlavní - L F [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	3,06	-0,37	3,20
2	10,38	-1,78	11,00
3	19,02	-3,74	20,27
4	26,04	-5,30	27,83
5	28,51	-5,99	30,54
6	25,82	-5,37	27,75
7	18,78	-3,78	20,23
8	9,99	-1,91	10,82
9	2,80	-0,48	3,08
10	0,00	0,00	0,00
11	3,02	-0,37	3,18
12	10,36	-1,76	10,98
13	19,00	-3,74	20,23
14	26,02	-5,30	27,79
15	28,51	-5,99	30,54
16	25,86	-5,37	27,77
17	18,82	-3,79	20,27
18	10,03	-1,92	10,88
19	2,84	-0,49	3,10
20	0,00	0,00	0,00

Tabulka C-5: Síla působící v druhé fázi (25kA)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P F [N]	Kontakt opalovací F [N]	Kontakt hlavní - L F [N]
0	23,04	-3,75	24,71
1	13,67	-2,23	14,94
2	5,11	-0,76	5,77
3	0,32	-0,04	0,44
4	1,49	-0,15	1,35
5	8,02	-1,10	8,00
6	17,49	-2,57	17,88
7	26,06	-4,08	27,03
8	30,60	-4,98	32,05

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F [N]	F [N]	F [N]
9	29,42	-4,89	31,13
10	22,98	-3,82	24,63
11	13,71	-2,24	14,98
12	5,13	-0,76	5,81
13	0,32	-0,04	0,46
14	1,45	-0,15	1,33
15	7,98	-1,10	7,96
16	17,43	-2,56	17,84
17	26,04	-4,07	26,99
18	30,60	-4,98	32,05
19	29,44	-4,89	31,15
20	23,04	-3,83	24,67

Tabulka C-6: Síla působící v třetí fázi (25kA)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F [N]	F [N]	F [N]
0	22,64	-3,66	22,82
1	28,75	-4,80	29,08
2	29,50	-5,11	29,90
3	24,87	-4,32	25,34
4	16,53	-2,85	16,93
5	7,72	-1,17	8,02
6	1,37	-0,20	1,49
7	0,32	-0,04	0,30
8	5,19	-0,61	5,15
9	13,75	-1,96	13,81
10	22,84	-3,52	23,06
11	28,88	-4,74	29,20
12	29,54	-5,10	29,94
13	24,91	-4,33	25,38
14	16,57	-2,86	16,99
15	7,76	-1,17	8,08
16	1,39	-0,20	1,51
17	0,32	-0,04	0,28
18	5,15	-0,61	5,11
19	13,71	-1,95	13,77
20	22,82	-3,52	23,02

Rozložení síly do složek F_z a F_y

Tabulka C-7: Síla F_z a F_y působící v první fázi (25kA)

ČAS [ms]	Fáze 1					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	3,02	0,48	-0,37	-0,04	3,16	0,50
2	10,25	1,62	-1,77	-0,18	10,86	1,72
3	18,79	2,97	-3,72	-0,38	20,02	3,17
4	25,72	4,07	-5,27	-0,55	27,49	4,35
5	28,16	4,45	-5,96	-0,62	30,17	4,77
6	25,50	4,03	-5,34	-0,55	27,41	4,33
7	18,55	2,93	-3,76	-0,39	19,98	3,16
8	9,87	1,56	-1,90	-0,20	10,69	1,69
9	2,76	0,44	-0,47	-0,05	3,04	0,48
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	2,98	0,47	-0,37	-0,04	3,14	0,50
12	10,23	1,62	-1,75	-0,18	10,84	1,72
13	18,77	2,97	-3,72	-0,38	19,98	3,16
14	25,70	4,06	-5,27	-0,55	27,45	4,34
15	28,16	4,45	-5,96	-0,62	30,17	4,77
16	25,54	4,04	-5,34	-0,55	27,43	4,34
17	18,59	2,94	-3,77	-0,39	20,02	3,17
18	9,91	1,57	-1,91	-0,20	10,74	1,70
19	2,80	0,44	-0,49	-0,05	3,06	0,48
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabulka C-8: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi (25kA)

ČAS [ms]	Fáze 2					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	22,76	3,60	-3,73	-0,39	24,41	3,86
1	13,51	2,14	-2,21	-0,23	14,76	2,33
2	5,04	0,80	-0,75	-0,08	5,70	0,90
3	0,32	0,05	-0,04	0,00	0,44	0,07
4	1,47	0,23	-0,14	-0,02	1,33	0,21
5	7,92	1,25	-1,09	-0,11	7,90	1,25
6	17,28	2,73	-2,56	-0,26	17,66	2,79
7	25,74	4,07	-4,06	-0,42	26,69	4,22
8	30,23	4,78	-4,96	-0,51	31,66	5,01
9	29,06	4,60	-4,86	-0,50	30,75	4,86
10	22,70	3,59	-3,80	-0,39	24,33	3,85

ČAS [ms]	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
11	13,55	2,14	-2,23	-0,23	14,80	2,34
12	5,06	0,80	-0,75	-0,08	5,74	0,91
13	0,32	0,05	-0,04	0,00	0,46	0,07
14	1,43	0,23	-0,14	-0,02	1,31	0,21
15	7,88	1,25	-1,09	-0,11	7,87	1,24
16	17,22	2,72	-2,54	-0,26	17,62	2,79
17	25,72	4,07	-4,05	-0,42	26,65	4,22
18	30,23	4,78	-4,96	-0,51	31,66	5,01
19	29,08	4,60	-4,86	-0,50	30,77	4,87
20	22,76	3,60	-3,81	-0,39	24,37	3,85

Tabulka C-9: Síla F_z a F_y působící v třetí fázi (25kA)

ČAS [ms]	Fáze 3					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	22,36	3,54	-3,64	-0,38	22,54	3,57
1	28,40	4,49	-4,77	-0,49	28,72	4,54
2	29,14	4,61	-5,09	-0,53	29,53	4,67
3	24,57	3,89	-4,30	-0,44	25,03	3,96
4	16,33	2,58	-2,83	-0,29	16,72	2,64
5	7,63	1,21	-1,16	-0,12	7,92	1,25
6	1,35	0,21	-0,20	-0,02	1,47	0,23
7	0,32	0,05	-0,04	0,00	0,30	0,05
8	5,12	0,81	-0,61	-0,06	5,08	0,80
9	13,59	2,15	-1,95	-0,20	13,64	2,16
10	22,56	3,57	-3,51	-0,36	22,78	3,60
11	28,52	4,51	-4,72	-0,49	28,84	4,56
12	29,18	4,61	-5,07	-0,53	29,57	4,68
13	24,61	3,89	-4,31	-0,45	25,06	3,96
14	16,37	2,59	-2,85	-0,29	16,78	2,65
15	7,67	1,21	-1,16	-0,12	7,98	1,26
16	1,37	0,22	-0,20	-0,02	1,49	0,24
17	0,32	0,05	-0,04	0,00	0,28	0,04
18	5,08	0,80	-0,61	-0,06	5,04	0,80
19	13,55	2,14	-1,94	-0,20	13,60	2,15
20	22,54	3,57	-3,51	-0,36	22,74	3,60

Odpudivé síly F_u v proudové úžině

Tabulka C-10: Odpudivá síla v proudové úžině – 25kA (Fáze 1)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P F_u [N]	Kontakt opalovací F_u [N]	Kontakt hlavní - L F_u [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	4,70	4,52	4,70
2	17,00	16,34	17,00
3	32,21	30,95	32,21
4	44,51	42,77	44,51
5	49,21	47,28	49,21
6	44,51	42,77	44,51
7	32,21	30,95	32,21
8	17,00	16,34	17,00
9	4,70	4,52	4,70
10	0,00	0,00	0,00
11	4,70	4,52	4,70
12	17,00	16,34	17,00
13	32,21	30,95	32,21
14	44,51	42,77	44,51
15	49,21	47,28	49,21
16	44,51	42,77	44,51
17	32,21	30,95	32,21
18	17,00	16,34	17,00
19	4,70	4,52	4,70
20	0,00	0,00	0,00

Tabulka C-11: Odpudivé síly v proudové úžině - 25kA (Fáze 2)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P F_u [N]	Kontakt opalovací F_u [N]	Kontakt hlavní - L F_u [N]
0	36,91	35,46	36,91
1	22,03	21,17	22,03
2	8,14	7,82	8,14
3	0,54	0,52	0,54
4	2,13	2,04	2,13
5	12,30	11,82	12,30
6	27,18	26,11	27,18
7	41,07	39,46	41,07
8	48,67	46,77	48,67
9	47,08	45,24	47,08
10	36,91	35,46	36,91

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
11	22,03	21,17	22,03
12	8,14	7,82	8,14
13	0,54	0,52	0,54
14	2,13	2,04	2,13
15	12,30	11,82	12,30
16	27,18	26,11	27,18
17	41,07	39,46	41,07
18	48,67	46,77	48,67
19	47,08	45,24	47,08
20	36,91	35,46	36,91

Tabulka C-12: Odpudivé síly v proudové úžině - 25kA (Fáze 3)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
0	36,91	35,46	36,91
1	47,08	45,24	47,08
2	48,67	46,77	48,67
3	41,07	39,46	41,07
4	27,18	26,11	27,18
5	12,30	11,82	12,30
6	2,13	2,04	2,13
7	0,54	0,52	0,54
8	8,14	7,82	8,14
9	22,03	21,17	22,03
10	36,91	35,46	36,91
11	47,08	45,24	47,08
12	48,67	46,77	48,67
13	41,07	39,46	41,07
14	27,18	26,11	27,18
15	12,30	11,82	12,30
16	2,13	2,04	2,13
17	0,54	0,52	0,54
18	8,14	7,82	8,14
19	22,03	21,17	22,03
20	36,91	35,46	36,91

Výsledné odpudivé síly $F_{celk.}$

Tabulka C-13: Výsledná odpudivá síla - 25kA (Fáze 1)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P $F_{celk.}$ [N]	Kontakt opalovací $F_{celk.}$ [N]	Kontakt hlavní - L $F_{celk.}$ [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	7,73	4,15	7,87
2	27,30	14,57	27,92
3	51,08	27,23	52,32
4	70,35	37,50	72,13
5	77,50	41,33	79,52
6	70,13	37,43	72,05
7	50,84	27,19	52,28
8	26,92	14,44	27,74
9	7,47	4,04	7,75
10	0,00	0,00	0,00
11	7,69	4,15	7,85
12	27,28	14,58	27,90
13	51,06	27,23	52,28
14	70,33	37,50	72,09
15	77,50	41,33	79,52
16	70,17	37,43	72,07
17	50,88	27,18	52,32
18	26,96	14,43	27,80
19	7,51	4,03	7,77
20	0,00	0,00	0,00

Tabulka C-14: Výsledná odpudivá síla - 25kA (Fáze 2)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P $F_{celk.}$ [N]	Kontakt opalovací $F_{celk.}$ [N]	Kontakt hlavní - L $F_{celk.}$ [N]
0	59,78	31,73	61,44
1	35,60	18,96	36,86
2	13,21	7,07	13,87
3	0,86	0,48	0,98
4	3,60	1,90	3,46
5	20,27	10,73	20,25
6	44,54	23,56	44,92
7	66,93	35,40	67,89
8	79,05	41,81	80,49
9	76,28	40,38	77,98

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	$F_{\text{celk.}}$ [N]	$F_{\text{celk.}}$ [N]	$F_{\text{celk.}}$ [N]
10	59,72	31,67	61,36
11	35,64	18,94	36,90
12	13,23	7,07	13,91
13	0,86	0,48	1,00
14	3,56	1,90	3,44
15	20,23	10,73	20,21
16	44,48	23,57	44,88
17	66,91	35,42	67,85
18	79,05	41,81	80,49
19	76,30	40,38	78,00
20	59,78	31,66	61,40

Tabulka C-15: Výsledná odporivá síla - 25kA (Fáze 3)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	$F_{\text{celk.}}$ [N]	$F_{\text{celk.}}$ [N]	$F_{\text{celk.}}$ [N]
0	59,38	31,83	59,56
1	75,62	40,47	75,94
2	77,95	41,68	78,35
3	65,75	35,17	66,21
4	43,58	23,28	43,98
5	19,97	10,66	20,27
6	3,48	1,85	3,60
7	0,86	0,48	0,84
8	13,29	7,22	13,25
9	35,68	19,22	35,74
10	59,58	31,96	59,80
11	75,74	40,52	76,06
12	77,99	41,70	78,39
13	65,79	35,15	66,25
14	43,62	23,27	44,04
15	20,01	10,66	20,33
16	3,50	1,85	3,62
17	0,86	0,48	0,82
18	13,25	7,22	13,21
19	35,64	19,23	35,70
20	59,56	31,96	59,76

Příloha D: Tabulky pro dynamický výpočet 65kA

Vypočítaný moment pomocí programu Ansys Maxwell

Tabulka D-1: Moment působící v první fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P M [Nm]	Kontakt opalovací M [Nm]	Kontakt hlavní - L M [Nm]
0	0	0,001	0
1	0,995	-0,216	1,032
2	3,054	-1,251	3,213
3	5,684	-2,444	6,05
4	7,872	-3,363	8,428
5	8,687	-3,72	9,336
6	7,907	-3,326	8,528
7	5,816	-2,339	6,309
8	3,144	-1,172	3,439
9	0,897	-0,293	1,002
10	0	0,001	0
11	0,986	-0,215	1,025
12	3,041	-1,245	3,2
13	5,671	-2,438	6,036
14	7,864	-3,36	8,419
15	8,687	-3,72	9,336
16	7,915	-3,33	8,537
17	5,829	-2,345	6,323
18	3,158	-1,177	3,454
19	0,906	-0,296	1,011
20	0	0,001	0

Tabulka D-2: Moment působící v druhé fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P M [Nm]	Kontakt opalovací M [Nm]	Kontakt hlavní - L M [Nm]
0	7,139	-2,455	7,594
1	4,209	-1,481	4,577
2	1,583	-0,5	1,816
3	0,098	-0,025	0,148
4	0,49	-0,091	0,424
5	2,534	-0,749	2,437
6	5,496	-1,712	5,475
7	8,121	-2,688	8,255

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
8	9,56	-3,207	9,865
9	9,201	-3,117	9,619
10	7,162	-2,461	7,604
11	4,232	-1,484	4,595
12	1,594	-0,504	1,828
13	0,101	-0,026	0,153
14	0,483	-0,089	0,417
15	2,521	-0,745	2,424
16	5,481	-1,707	5,46
17	8,11	-2,684	8,244
18	9,557	-3,206	9,862
19	9,207	-3,118	9,625
20	7,175	-2,465	7,618

Tabulka D-3: Moment působící v třetí fázi (65kA)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
0	6,967	-2,472	6,89
1	8,825	-3,214	8,758
2	8,931	-3,417	8,916
3	7,522	-2,904	7,544
4	4,965	-1,937	5,018
5	2,283	-0,841	2,36
6	0,393	-0,145	0,43
7	0,114	-0,022	0,097
8	1,668	-0,421	1,624
9	4,321	-1,344	4,261
10	7,025	-2,431	6,955
11	8,858	-3,195	8,797
12	8,934	-3,418	8,919
13	7,532	-2,908	7,555
14	4,979	-1,943	5,033
15	2,295	-0,846	2,372
16	0,398	-0,147	0,436
17	0,11	-0,021	0,094
18	1,656	-0,417	1,613
19	4,306	-1,339	4,247
20	7,013	-2,426	6,943

Síla F v ose kontaktu

Tabulka D-4: Síla působící v první fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P F [N]	Kontakt opalovací F [N]	Kontakt hlavní - L F [N]
0	0,00	0,01	0,00
1	20,01	-2,86	20,75
2	61,41	-16,58	64,61
3	114,29	-32,38	121,65
4	158,29	-44,56	169,47
5	174,68	-49,29	187,73
6	159,00	-44,07	171,48
7	116,95	-30,99	126,86
8	63,22	-15,53	69,15
9	18,04	-3,88	20,15
10	0,00	0,01	0,00
11	19,83	-2,85	20,61
12	61,15	-16,50	64,35
13	114,03	-32,30	121,37
14	158,13	-44,52	169,29
15	174,68	-49,29	187,73
16	159,16	-44,12	171,66
17	117,21	-31,07	127,14
18	63,50	-15,60	69,45
19	18,22	-3,92	20,33
20	0,00	0,01	0,00

Tabulka D-5: Síla působící v druhé fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P F [N]	Kontakt opalovací F [N]	Kontakt hlavní - L F [N]
0	143,55	-32,53	152,70
1	84,64	-19,62	92,04
2	31,83	-6,63	36,52
3	1,97	-0,33	2,98
4	9,85	-1,21	8,53
5	50,95	-9,92	49,00
6	110,51	-22,68	110,09
7	163,30	-35,62	165,99
8	192,23	-42,49	198,37

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F [N]	F [N]	F [N]
9	185,02	-41,30	193,42
10	144,01	-32,61	152,90
11	85,10	-19,66	92,40
12	32,05	-6,68	36,76
13	2,03	-0,34	3,08
14	9,71	-1,18	8,39
15	50,69	-9,87	48,74
16	110,21	-22,62	109,79
17	163,08	-35,56	165,77
18	192,17	-42,48	198,31
19	185,14	-41,31	193,54
20	144,28	-32,66	153,18

Tabulka D-6: Síla působící v třetí fázi (65kA)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F [N]	F [N]	F [N]
0	140,09	-32,75	138,55
1	177,45	-42,59	176,11
2	179,59	-45,28	179,28
3	151,25	-38,48	151,70
4	99,84	-25,67	100,90
5	45,91	-11,14	47,46
6	7,90	-1,92	8,65
7	2,29	-0,29	1,95
8	33,54	-5,58	32,66
9	86,89	-17,81	85,68
10	141,26	-32,21	139,85
11	178,12	-42,33	176,89
12	179,65	-45,29	179,34
13	151,45	-38,53	151,92
14	100,12	-25,75	101,20
15	46,15	-11,21	47,70
16	8,00	-1,95	8,77
17	2,21	-0,28	1,89
18	33,30	-5,53	32,43
19	86,59	-17,74	85,40
20	141,02	-32,15	139,61

Rozložení síly do složek F_z a F_y

Tabulka D-7: Síla F_z a F_y působící v první fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 1					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
1	19,76	3,13	-2,85	-0,29	20,50	3,24
2	60,66	9,59	-16,49	-1,71	63,81	10,09
3	112,89	17,85	-32,21	-3,33	120,16	19,00
4	156,35	24,73	-44,32	-4,59	167,39	26,47
5	172,54	27,29	-49,03	-5,07	185,43	29,33
6	157,04	24,84	-43,84	-4,54	169,38	26,79
7	115,51	18,27	-30,83	-3,19	125,30	19,82
8	62,44	9,88	-15,45	-1,60	68,30	10,80
9	17,82	2,82	-3,86	-0,40	19,90	3,15
10	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
11	19,58	3,10	-2,83	-0,29	20,36	3,22
12	60,40	9,55	-16,41	-1,70	63,56	10,05
13	112,63	17,81	-32,13	-3,33	119,88	18,96
14	156,19	24,70	-44,28	-4,58	167,21	26,45
15	172,54	27,29	-49,03	-5,07	185,43	29,33
16	157,20	24,86	-43,89	-4,54	169,56	26,82
17	115,77	18,31	-30,91	-3,20	125,58	19,86
18	62,72	9,92	-15,51	-1,61	68,60	10,85
19	17,99	2,85	-3,90	-0,40	20,08	3,18
20	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00

Tabulka D-8: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 2					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	141,79	22,43	-32,36	-3,35	150,83	23,85
1	83,60	13,22	-19,52	-2,02	90,91	14,38
2	31,44	4,97	-6,59	-0,68	36,07	5,70
3	1,95	0,31	-0,33	-0,03	2,94	0,46
4	9,73	1,54	-1,20	-0,12	8,42	1,33
5	50,33	7,96	-9,87	-1,02	48,40	7,66
6	109,16	17,26	-22,56	-2,34	108,74	17,20
7	161,29	25,51	-35,43	-3,67	163,96	25,93
8	189,87	30,03	-42,27	-4,37	195,93	30,99
9	182,74	28,90	-41,08	-4,25	191,05	30,22
10	142,25	22,50	-32,44	-3,36	151,03	23,89

ČAS	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	[ms]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]
11	84,05	13,29	-19,56	-2,02	91,26	14,43
12	31,66	5,01	-6,64	-0,69	36,31	5,74
13	2,01	0,32	-0,34	-0,04	3,04	0,48
14	9,59	1,52	-1,17	-0,12	8,28	1,31
15	50,07	7,92	-9,82	-1,02	48,14	7,61
16	108,86	17,22	-22,50	-2,33	108,44	17,15
17	161,08	25,48	-35,37	-3,66	163,74	25,90
18	189,81	30,02	-42,25	-4,37	195,87	30,98
19	182,86	28,92	-41,09	-4,25	191,17	30,23
20	142,50	22,54	-32,49	-3,36	151,30	23,93

Tabulka D-9: Síla F_z a F_y působící ve třetí fázi (65kA)

ČAS	Fáze 3					
	[ms]	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	138,37	21,89	-32,58	-3,37	136,84	21,64
1	175,28	27,72	-42,36	-4,38	173,95	27,51
2	177,38	28,05	-45,04	-4,66	177,08	28,01
3	149,40	23,63	-38,27	-3,96	149,83	23,70
4	98,61	15,60	-25,53	-2,64	99,66	15,76
5	45,34	7,17	-11,08	-1,15	46,87	7,41
6	7,81	1,23	-1,91	-0,20	8,54	1,35
7	2,26	0,36	-0,29	-0,03	1,93	0,30
8	33,13	5,24	-5,55	-0,57	32,25	5,10
9	85,82	13,57	-17,71	-1,83	84,63	13,38
10	139,53	22,07	-32,04	-3,32	138,14	21,85
11	175,93	27,83	-42,11	-4,36	174,72	27,63
12	177,44	28,06	-45,05	-4,66	177,14	28,02
13	149,60	23,66	-38,33	-3,97	150,05	23,73
14	98,89	15,64	-25,61	-2,65	99,96	15,81
15	45,58	7,21	-11,15	-1,15	47,11	7,45
16	7,90	1,25	-1,94	-0,20	8,66	1,37
17	2,18	0,35	-0,28	-0,03	1,87	0,30
18	32,89	5,20	-5,50	-0,57	32,04	5,07
19	85,52	13,53	-17,65	-1,83	84,35	13,34
20	139,29	22,03	-31,97	-3,31	137,90	21,81

Odpudivé síly F_u v proudové úžině

Tabulka D-10: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 1)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	31,77	30,52	31,77
2	114,93	110,43	114,93
3	217,73	209,20	217,73
4	300,89	289,11	300,89
5	332,66	319,63	332,66
6	300,90	289,11	300,90
7	217,73	209,20	217,73
8	114,93	110,43	114,93
9	31,77	30,52	31,77
10	0,00	0,00	0,00
11	31,77	30,52	31,77
12	114,93	110,43	114,93
13	217,73	209,20	217,73
14	300,89	289,11	300,89
15	332,66	319,63	332,66
16	300,90	289,11	300,90
17	217,73	209,20	217,73
18	114,93	110,43	114,93
19	31,77	30,52	31,77
20	0,00	0,00	0,00

Tabulka D-11: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 2)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
0	249,50	239,73	249,50
1	148,94	143,11	148,94
2	55,03	52,88	55,03
3	3,63	3,49	3,63
4	14,38	13,82	14,38
5	83,16	79,91	83,16
6	183,72	176,52	183,72
7	277,63	266,76	277,63
8	329,03	316,14	329,03
9	318,28	305,82	318,28
10	249,50	239,73	249,50

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
11	148,95	143,11	148,95
12	55,03	52,88	55,03
13	3,64	3,49	3,64
14	14,38	13,82	14,38
15	83,16	79,91	83,16
16	183,71	176,52	183,71
17	277,63	266,75	277,63
18	329,03	316,14	329,03
19	318,28	305,82	318,28
20	249,50	239,73	249,50

Tabulka D-12: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 3)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
0	249,49	239,72	249,49
1	318,28	305,82	318,28
2	329,03	316,14	329,03
3	277,63	266,76	277,63
4	183,72	176,52	183,72
5	83,17	79,91	83,17
6	14,38	13,82	14,38
7	3,63	3,49	3,63
8	55,03	52,88	55,03
9	148,94	143,11	148,94
10	249,49	239,72	249,49
11	318,28	305,82	318,28
12	329,03	316,14	329,03
13	277,63	266,76	277,63
14	183,72	176,53	183,72
15	83,17	79,91	83,17
16	14,38	13,82	14,38
17	3,63	3,49	3,63
18	55,03	52,88	55,03
19	148,94	143,11	148,94
20	249,49	239,72	249,49

Výsledné odpudivé síly $F_{celk.}$

Tabulka D-13: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 1)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P $F_{celk.}$ [N]	Kontakt opalovací $F_{celk.}$ [N]	Kontakt hlavní - L $F_{celk.}$ [N]
0	0,00	0,01	0,00
1	51,62	27,68	52,36
2	175,85	93,96	179,03
3	331,10	177,02	338,42
4	457,91	244,83	469,03
5	505,93	270,65	518,92
6	458,61	245,32	471,03
7	333,74	178,40	343,61
8	177,65	95,00	183,55
9	49,66	26,66	51,76
10	0,00	0,01	0,00
11	51,44	27,69	52,22
12	175,59	94,04	178,77
13	330,84	177,10	338,14
14	457,75	244,87	468,85
15	505,93	270,65	518,92
16	458,77	245,27	471,22
17	334,00	178,33	343,89
18	177,93	94,93	183,85
19	49,84	26,63	51,94
20	0,00	0,01	0,00

Tabulka D-14: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 2)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P $F_{celk.}$ [N]	Kontakt opalovací $F_{celk.}$ [N]	Kontakt hlavní - L $F_{celk.}$ [N]
0	391,93	207,40	401,03
1	232,92	123,61	240,28
2	86,62	46,29	91,28
3	5,59	3,16	6,59
4	24,16	12,62	22,84
5	133,73	70,04	131,79
6	293,38	153,98	292,96
7	439,66	231,36	442,34
8	519,77	273,91	525,87
9	501,86	264,77	510,22

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$
10	392,39	207,32	401,23
11	233,38	123,57	240,64
12	86,84	46,24	91,52
13	5,65	3,15	6,69
14	24,02	12,64	22,70
15	133,47	70,10	131,53
16	293,08	154,04	292,66
17	439,44	231,41	442,12
18	519,71	273,92	525,81
19	501,98	264,76	510,34
20	392,65	207,27	401,52

Tabulka D-15: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 3)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$
0	388,49	207,17	386,94
1	494,33	263,49	492,99
2	507,18	271,15	506,88
3	427,68	228,52	428,12
4	282,76	151,02	283,82
5	128,71	68,84	130,25
6	22,22	11,91	22,96
7	5,91	3,20	5,57
8	88,32	47,33	87,44
9	235,16	125,41	233,95
10	389,65	207,71	388,24
11	494,99	263,74	493,77
12	507,24	271,13	506,94
13	427,88	228,46	428,34
14	283,04	150,94	284,12
15	128,95	68,77	130,49
16	22,32	11,88	23,08
17	5,83	3,22	5,51
18	88,08	47,38	87,22
19	234,85	125,47	233,67
20	389,40	207,78	388,00

Příloha E: Tabulky pro dynamický výpočet 65kA s přechodovým jevem

Vypočítaný moment pomocí programu Ansys Maxwell

Tabulka E-1: Moment působící v první fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P M [Nm]	Kontakt opalovací M [Nm]	Kontakt hlavní - L M [Nm]
0	0	0	0
1	0,933	-0,274	1,001
2	3,199	-1,151	3,424
3	5,845	-2,323	6,259
4	8,009	-3,246	8,595
5	8,755	-3,643	9,431
6	7,916	-3,284	8,564
7	5,831	-2,306	6,367
8	3,137	-1,166	3,467
9	0,887	-0,304	1,014
10	0	-0,002	0
11	0,974	-0,223	0,981
12	3,085	-1,219	3,183
13	5,604	-2,481	5,875
14	7,777	-3,418	8,229
15	8,659	-3,741	9,213
16	7,923	-3,328	8,468
17	5,836	-2,342	6,272
18	3,165	-1,177	3,424
19	0,909	-0,296	1,001
20	0	0	0

Tabulka E-2: Moment působící v druhé fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P M [Nm]	Kontakt opalovací M [Nm]	Kontakt hlavní - L M [Nm]
0	0	0	0
1	0,145	-0,026	0,142
2	0,964	-0,229	0,958
3	2,889	-0,838	2,895
4	6,122	-1,871	6,201
5	10,044	-3,332	10,255
6	14,062	-4,752	14,491

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
7	16,804	-5,895	17,491
8	17,747	-6,272	18,634
9	16,336	-5,819	17,32
10	12,881	-4,644	13,831
11	8,349	-3,059	9,125
12	4,097	-1,442	4,627
13	1,093	-0,336	1,331
14	0	0,003	0,003
15	0,981	-0,247	0,897
16	3,22	-0,942	3,184
17	5,569	-1,735	5,671
18	7,043	-2,218	7,308
19	6,985	-2,207	7,358
20	5,414	-1,727	5,798

Tabulka E-3: Moment působící v třetí fázi (65kA)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	M [Nm]	M [Nm]	M [Nm]
0	0	0	0
1	0,394	-0,88	0,407
2	0,812	-0,217	0,846
3	0,718	-0,205	0,765
4	0,253	-0,076	0,286
5	0,007	-0,007	0,002
6	0,763	-0,148	0,715
7	2,819	-0,791	2,73
8	6,055	-1,871	5,941
9	9,699	-3,222	9,579
10	12,805	-4,452	12,702
11	14,492	-5,158	14,435
12	14,044	-5,138	14,076
13	11,755	-4,321	11,858
14	8,188	-2,997	8,299
15	4,351	-1,547	4,469
16	1,362	-0,451	1,438
17	0,031	-0,011	0,041
18	0,704	-0,157	0,681
19	2,862	-0,777	2,846
20	5,342	-1,641	5,342

Síla F v ose kontaktu

Tabulka E-4: Síla působící v první fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P F [N]	Kontakt opalovací F [N]	Kontakt hlavní - L F [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	18,76	-3,63	20,13
2	64,33	-15,25	68,85
3	117,53	-30,78	125,86
4	161,05	-43,01	172,83
5	176,05	-48,27	189,64
6	159,18	-43,51	172,21
7	117,25	-30,56	128,03
8	63,08	-15,45	69,72
9	17,84	-4,03	20,39
10	0,00	-0,03	0,00
11	19,59	-2,95	19,73
12	62,03	-16,15	64,00
13	112,69	-32,87	118,14
14	156,38	-45,29	165,47
15	174,12	-49,57	185,26
16	159,32	-44,10	170,28
17	117,35	-31,03	126,12
18	63,64	-15,60	68,85
19	18,28	-3,92	20,13
20	0,00	0,00	0,00

Tabulka E-5: Síla působící v druhé fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P F [N]	Kontakt opalovací F [N]	Kontakt hlavní - L F [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	2,92	-0,34	2,86
2	19,38	-3,03	19,26
3	58,09	-11,10	58,21
4	123,10	-24,79	124,69
5	201,97	-44,15	206,21
6	282,76	-62,97	291,39
7	337,90	-78,11	351,71

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F [N]	F [N]	F [N]
8	356,86	-83,11	374,70
9	328,49	-77,10	348,27
10	259,01	-61,53	278,12
11	167,88	-40,53	183,49
12	82,38	-19,11	93,04
13	21,98	-4,45	26,76
14	0,00	0,04	0,06
15	19,73	-3,27	18,04
16	64,75	-12,48	64,02
17	111,98	-22,99	114,03
18	141,62	-29,39	146,95
19	140,46	-29,24	147,96
20	108,87	-22,88	116,59

Tabulka E-6: Síla působící v třetí fázi (65kA)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F [N]	F [N]	F [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	7,92	-11,66	8,18
2	16,33	-2,88	17,01
3	14,44	-2,72	15,38
4	5,09	-1,01	5,75
5	0,14	-0,09	0,04
6	15,34	-1,96	14,38
7	56,68	-10,48	54,90
8	121,76	-24,79	119,46
9	195,03	-42,69	192,62
10	257,49	-58,99	255,41
11	291,41	-68,35	290,26
12	282,40	-68,08	283,04
13	236,37	-57,25	238,44
14	164,65	-39,71	166,88
15	87,49	-20,50	89,86
16	27,39	-5,98	28,92
17	0,62	-0,15	0,82
18	14,16	-2,08	13,69
19	57,55	-10,30	57,23
20	107,42	-21,74	107,42

Rozložení síly do složek F_z a F_y

Tabulka E-7: Síla F_z a F_y působící v první fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 1					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	18,53	2,93	-3,61	-0,37	19,88	3,14
2	63,54	10,05	-15,17	-1,57	68,01	10,76
3	116,09	18,36	-30,62	-3,17	124,31	19,66
4	159,07	25,16	-42,78	-4,43	170,71	27,00
5	173,89	27,50	-48,01	-4,97	187,31	29,63
6	157,22	24,87	-43,28	-4,48	170,09	26,90
7	115,81	18,32	-30,39	-3,15	126,46	20,00
8	62,30	9,85	-15,37	-1,59	68,86	10,89
9	17,62	2,79	-4,01	-0,41	20,14	3,19
10	0,00	0,00	-0,03	0,00	0,00	0,00
11	19,34	3,06	-2,94	-0,30	19,48	3,08
12	61,27	9,69	-16,07	-1,66	63,22	10,00
13	111,30	17,60	-32,70	-3,38	116,69	18,45
14	154,46	24,43	-45,05	-4,66	163,44	25,85
15	171,98	27,20	-49,31	-5,10	182,98	28,94
16	157,36	24,89	-43,86	-4,54	168,19	26,60
17	115,91	18,33	-30,87	-3,19	124,57	19,70
18	62,86	9,94	-15,51	-1,61	68,01	10,76
19	18,05	2,86	-3,90	-0,40	19,88	3,14
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabulka E-8: Síla F_z a F_y působící v druhé fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 2					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	2,88	0,46	-0,34	-0,04	2,82	0,45
2	19,15	3,03	-3,02	-0,31	19,03	3,01
3	57,38	9,08	-11,04	-1,14	57,50	9,09
4	121,59	19,23	-24,66	-2,55	123,16	19,48
5	199,49	31,55	-43,92	-4,54	203,68	32,21
6	279,29	44,17	-62,63	-6,48	287,81	45,52
7	333,75	52,79	-77,70	-8,04	347,39	54,94
8	352,48	55,75	-82,66	-8,55	370,10	58,53
9	324,45	51,32	-76,69	-7,94	344,00	54,41
10	255,83	40,46	-61,21	-6,33	274,70	43,45

ČAS [ms]	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
11	165,82	26,23	-40,32	-4,17	181,23	28,66
12	81,37	12,87	-19,01	-1,97	91,90	14,53
13	21,71	3,43	-4,43	-0,46	26,44	4,18
14	0,00	0,00	0,04	0,00	0,06	0,01
15	19,48	3,08	-3,26	-0,34	17,82	2,82
16	63,95	10,11	-12,42	-1,28	63,24	10,00
17	110,61	17,49	-22,87	-2,37	112,63	17,81
18	139,88	22,12	-29,23	-3,03	145,15	22,96
19	138,73	21,94	-29,09	-3,01	146,14	23,11
20	107,53	17,01	-22,76	-2,36	115,16	18,21

Tabulka E-9: Síla F_z a F_y působící v třetí fázi (65kA)

ČAS [ms]	Fáze 3					
	Kontakt hlavní - P		Kontakt opalovací		Kontakt hlavní - L	
	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fz [N]	Fy [N]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	7,83	1,24	-11,60	-1,20	8,08	1,28
2	16,13	2,55	-2,86	-0,30	16,80	2,66
3	14,26	2,26	-2,70	-0,28	15,19	2,40
4	5,02	0,79	-1,00	-0,10	5,68	0,90
5	0,14	0,02	-0,09	-0,01	0,04	0,01
6	15,15	2,40	-1,95	-0,20	14,20	2,25
7	55,99	8,86	-10,43	-1,08	54,22	8,58
8	120,26	19,02	-24,66	-2,55	118,00	18,66
9	192,63	30,47	-42,47	-4,39	190,25	30,09
10	254,32	40,22	-58,68	-6,07	252,28	39,90
11	287,83	45,52	-67,98	-7,04	286,70	45,34
12	278,93	44,12	-67,72	-7,01	279,57	44,22
13	233,47	36,93	-56,95	-5,89	235,52	37,25
14	162,62	25,72	-39,50	-4,09	164,83	26,07
15	86,42	13,67	-20,39	-2,11	88,76	14,04
16	27,05	4,28	-5,94	-0,62	28,56	4,52
17	0,62	0,10	-0,14	-0,02	0,81	0,13
18	13,98	2,21	-2,07	-0,21	13,53	2,14
19	56,84	8,99	-10,24	-1,06	56,53	8,94
20	106,10	16,78	-21,63	-2,24	106,10	16,78

Odpudivé síly F_u v proudové úžině

Tabulka E-10: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 1)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P F_u [N]	Kontakt opalovací F_u [N]	Kontakt hlavní - L F_u [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	31,77	30,52	31,77
2	114,93	110,43	114,93
3	217,73	209,20	217,73
4	300,89	289,11	300,89
5	332,66	319,63	332,66
6	300,90	289,11	300,90
7	217,73	209,20	217,73
8	114,93	110,43	114,93
9	31,77	30,52	31,77
10	0,00	0,00	0,00
11	31,77	30,52	31,77
12	114,93	110,43	114,93
13	217,73	209,20	217,73
14	300,89	289,11	300,89
15	332,66	319,63	332,66
16	300,90	289,11	300,90
17	217,73	209,20	217,73
18	114,93	110,43	114,93
19	31,77	30,52	31,77
20	0,00	0,00	0,00

Tabulka E-11: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 2)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P F_u [N]	Kontakt opalovací F_u [N]	Kontakt hlavní - L F_u [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	4,40	4,22	4,40
2	30,49	29,29	30,49
3	96,08	92,32	96,08
4	206,97	198,87	206,97
5	349,90	336,20	349,90
6	494,09	474,75	494,09
7	600,78	577,25	600,78
8	637,10	612,15	637,10
9	588,85	565,80	588,85
10	466,99	448,70	466,99

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
11	305,04	293,10	305,04
12	148,33	142,52	148,33
13	38,61	37,10	38,61
14	0,01	0,01	0,01
15	31,28	30,05	31,28
16	107,39	103,19	107,39
17	189,74	182,31	189,74
18	241,07	231,63	241,07
19	239,52	230,14	239,52
20	186,50	179,20	186,50

Tabulka E-12: Odpudivá síla v proudové úžině - 65kA (Fáze 3)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	F_u [N]	F_u [N]	F_u [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	12,71	12,22	12,71
2	27,28	26,21	27,28
3	24,75	23,78	24,75
4	8,88	8,53	8,88
5	0,20	0,19	0,20
6	23,68	22,75	23,68
7	94,88	91,16	94,88
8	210,45	202,21	210,45
9	346,64	333,07	346,64
10	466,52	448,25	466,52
11	533,23	512,35	533,23
12	523,99	503,47	523,99
13	439,39	422,19	439,39
14	304,32	292,40	304,32
15	159,76	153,51	159,76
16	48,68	46,78	48,68
17	0,95	0,91	0,95
18	23,14	22,24	23,14
19	96,92	93,12	96,92
20	186,60	179,30	186,60

Výsledné odpudivé síly $F_{celk.}$

Tabulka E-13. Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 1)

ČAS [ms]	Fáze 1		
	Kontakt hlavní - P $F_{celk.}$ [N]	Kontakt opalovací $F_{celk.}$ [N]	Kontakt hlavní - L $F_{celk.}$ [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	50,38	26,91	51,74
2	178,75	95,27	183,25
3	334,32	178,61	342,61
4	460,65	246,37	472,37
5	507,29	271,67	520,82
6	458,79	245,87	471,75
7	334,04	178,84	344,77
8	177,51	95,08	184,11
9	49,46	26,52	52,00
10	0,00	0,03	0,00
11	51,20	27,58	51,34
12	176,47	94,38	178,43
13	329,50	176,54	334,92
14	456,01	244,11	465,05
15	505,37	270,38	516,45
16	458,93	245,29	469,83
17	334,14	178,37	342,87
18	178,07	94,93	183,25
19	49,90	26,63	51,74
20	0,00	0,00	0,00

Tabulka E-14: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 2)

ČAS [ms]	Fáze 2		
	Kontakt hlavní - P $F_{celk.}$ [N]	Kontakt opalovací $F_{celk.}$ [N]	Kontakt hlavní - L $F_{celk.}$ [N]
0	0,00	0,00	0,00
1	7,29	3,88	7,23
2	49,73	26,28	49,61
3	153,73	81,28	153,85
4	329,13	174,23	330,71
5	550,30	292,32	554,52
6	774,64	412,17	783,23
7	936,01	499,62	949,76
8	991,14	529,55	1008,89

ČAS	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$
9	914,75	489,17	934,44
10	723,95	387,54	742,96
11	471,59	252,81	487,12
12	230,06	123,53	240,66
13	60,42	32,68	65,18
14	0,01	0,05	0,07
15	50,86	26,80	49,18
16	171,65	90,78	170,93
17	300,86	159,46	302,90
18	381,60	202,42	386,90
19	378,89	201,08	386,35
20	294,52	156,45	302,21

Tabulka E-15: Výsledná odpudivá síla - 65kA (Fáze 3)

ČAS	Fáze 3		
	Kontakt hlavní - P	Kontakt opalovací	Kontakt hlavní - L
[ms]	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$	$F_{\text{celk.}} [\text{N}]$
0	0,00	0,00	0,00
1	20,58	1,35	20,84
2	43,48	23,35	44,16
3	39,08	21,08	40,02
4	13,92	7,53	14,58
5	0,34	0,10	0,24
6	38,90	20,80	37,94
7	151,13	80,74	149,35
8	331,26	177,57	328,98
9	540,13	290,63	537,73
10	721,96	389,62	719,90
11	822,32	444,42	821,18
12	804,13	435,81	804,77
13	673,87	365,28	675,93
14	467,65	252,93	469,87
15	246,56	133,13	248,92
16	75,86	40,84	77,38
17	1,57	0,77	1,77
18	37,19	20,17	36,73
19	154,02	82,89	153,70
20	293,18	157,68	293,18