

# 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 DYNAMICKÝCH SIL NA PRODOVODNÉ DRÁZE JISTIČE 160 A

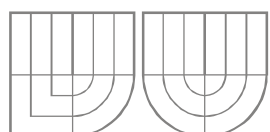
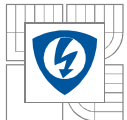
DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Marek Punčochář

BRNO 2014



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 dynamických sil na proudovodné dráze jističe 160 A

ENUMERATION OF DYNAMICS FORCES ON CURRENT-CARRYING PATH BREAKER 160 A

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

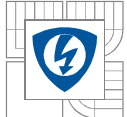
Bc. Marek Punčochář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO, 2014



# Diplomová práce

magisterský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Bc. Punčochář Marek

**ID:** 115263

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/14

## NÁZEV TÉMATU:

**Výpočet dynamických sil na proudovodné dráze jističe 160 A**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte teoretický rozbor působení elektrodynamických sil na proudovodnou dráhu zadaného přístroje.
2. Vytvořte geometrický model proudovodné dráhy vhodný pro numerický výpočet sil.
3. Provedte numerický výpočet sil pro stanovené jednofázové i třífázové proudy ve statickém i dynamickém režimu včetně analytického řešení síly od proudové úžiny.
4. Získané výsledky přehledně zhodnoťte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HALEVKA, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985

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

**Termín zadání:** 27.09.2013

**Termín odevzdání:** 28.5.2014

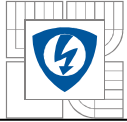
**Vedoucí projektu:** Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

**Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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



## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá výpočtem sil, které působí na proudovodnou dráhu jističe, konkrétně se jedná o typ BC160A fy OEZ Letohrad.

V práci je popsán princip vzniku elektrodynamických sil a výpočet těchto sil pro různé možnosti proudovodné dráhy.

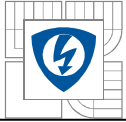
Na konci práce je vytvořen model jističe a pomocí simulačního programu jsou vypočteny síly, které vzniknou při průchodu proudů různých velikostí

## **Abstract**

This work deals with the calculation of forces acting on a current carrying path breakers, namely of type BC160 fy Letohrad.

There is described the principle of electrodynamic forces and calculation of these forces for different current carrying path.

Finally, a simplified model is created by using a circuit breaker simulation program and then forces that arise during the passage of a current are calculated.

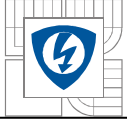


### **Klíčová slova**

Proudovodná dráha; elektrodynamická síla; elektrický proud; kontakt; jistič; OEZ; magnetické pole, materiály

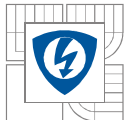
### **Keywords**

conductor-path; electrodynamic forces; current; contact; circuit-breaker; OEZ; magnetic field, materials



### **Bibliografická citace**

PUNČOCHÁŘ, M. Výpočet dynamických sil na proudovodné dráze jističe 160 A. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 105 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D..



## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Výpočet dynamických sil na proudovodné dráze jističe 160 A* 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, dále Ing. Lukáši Dostálovi za poskytnutí modelu jističe a v neposlední řadě mé rodině za podporu během celého studia.

V Brně dne .....

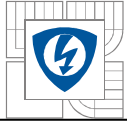
Podpis autora .....



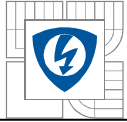
## OBSAH

<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>16</b>
<b>2 JISTIČÍ PRVKY V OBVODU</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 POJISTKA</b> .....	<b>17</b>
<b>OBR. 2.1 : POJISTKA – HLAVNÍ ČÁSTI [2]</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2 JISTIČ</b> .....	<b>18</b>
<b>3 MATERIÁLY V ELEKTROTECHNICE</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 IZOLANTY</b> .....	<b>22</b>
3.1.1 MATERIÁLY .....	22
3.1.1.1 Plyná dielektrika .....	22
3.1.1.2 Kapalná dielektrika .....	23
3.1.1.3 Tuhá dielektrika .....	23
<b>3.2 VODIČE</b> .....	<b>23</b>
3.2.1 MATERIÁLY KOVOVÝCH VODIČŮ.....	24
3.2.1.1 Čisté kovy.....	24
3.2.1.2 Slitiny kovů .....	24
<b>3.3 KONTAKTY</b> .....	<b>25</b>
3.3.1 MATERIÁL .....	25
3.3.1.1 Čisté kovy.....	25
3.3.1.2 Slitiny kovů .....	25
3.3.1.3 Kompozitní kovy .....	26
<b>3.4 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>27</b>
3.4.1 MATERIÁLY PRO KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY .....	27
3.4.1.1 Kovové konstrukční materiály.....	27
3.4.1.2 Plasty.....	27
3.4.1.3 Konstrukční keramika .....	28
3.4.1.4 Kompozitní materiály.....	28
<b>4 SÍLY V JISTIČI</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1 SÍLY VE VÍCE PROUDOVÝCH DRAHÁCH</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2 SÍLY STRÍDAVÉHO PROUDU</b> .....	<b>32</b>
<b>4.3 SÍLY V TROJFÁZOVÉ SOUSTAV</b> .....	<b>34</b>
<b>4.4 SÍLY V ZAKŘIVENÉ PROUDOVÉ DRÁZE</b> .....	<b>36</b>
4.4.1 JEDNODUCHÝ PRAVOÚHLÝ ZÁHYB .....	36
4.4.2 DVOJITÝ PRAVOÚHLÝ ZÁHYB .....	37
<b>4.5 SÍLY V KONTAKTNÍ ÚŽINĚ</b> .....	<b>38</b>
<b>5 KOMPAKTNÍ JISTIČ MODEION BC160 FIRMY OEZ</b> .....	<b>40</b>
<b>5.1 MODEL JISTIČE</b> .....	<b>41</b>
<b>6 VÝPOČET SIL V PROGRAMU MAXWELL</b> .....	<b>47</b>





<b>6.1 PŘÍRAZENÍ MATERIÁLŮ .....</b>	<b>47</b>
<b>6.2 PŘÍRAZENÍ KOMPONENT PRO VÝPOČET .....</b>	<b>49</b>
<b>6.3 NASTAVENÍ PROUDU .....</b>	<b>50</b>
6.3.1 NASTAVENÍ STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU .....	50
6.3.2 NASTAVENÍ STŘÍDAVÉHO PROUDU .....	50
6.3.3 NASTAVENÍ EXPONENCIÁLNĚ KLESAJÍCÍHO PROUDU.....	50
<b>6.4 NASTAVENÍ PARAMETRŮ ANALÝZY .....</b>	<b>51</b>
6.4.1 NASTAVENÍ ANALÝZY PŘI PRŮCHODU STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU .....	51
6.4.2 NASTAVENÍ ANALÝZY PŘI PRŮCHODU STŘÍDAVÉHO PROUDU .....	51
6.4.3 NASTAVENÍ ANALÝZY PŘI PRŮCHODU EXPONENCIÁLNĚ KLESAJÍCÍHO PROUDU .....	52
<b>7 VÝSLEDKY .....</b>	<b>53</b>
<b>7.1 MAGNETOSTATICKÁ ANALÝZA.....</b>	<b>53</b>
7.1.1 VÝSLEDKY PRO JEDNOPÓLOVÝ MODEL.....	53
7.1.2 VÝSLEDKY PRO TŘÍPÓLOVÝ MODEL.....	56
<b>7.2 TRANZIENTNÍ ANALÝZA.....</b>	<b>60</b>
7.2.1 JEDNOPÓLOVÝ MODEL .....	60
7.2.2 TŘÍPÓLOVÝ MODEL .....	75
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>102</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>104</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>105</b>

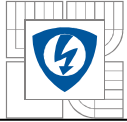


## SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

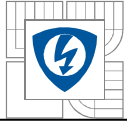
OBR. 2.1 : POJISTKA – HLAVNÍ ČÁSTI [2].....	18
OBR. 2.2: MALÝ JISTIČ (MCB) [3].....	19
OBR. 2.3: KOMPAKTNÍ JISTIČ BC160 [4].....	20
OBR. 2.4: VZDUCHOVÝ JISTIČ WL13 [5].....	21
OBR. 4.1: SÍLA VZNIKAJÍCÍ PRŮCHODEM EL. PROUDU [6].....	29
OBR. 4.2: SÍLA MEZI DVĚMA VODIČI [6].....	30
OBR. 4.3: USPOŘÁDÁNÍ VODIČŮ.....	31
GRAF 4.1: OPRAVNÉ ČINITELE K PRO VODIČE .....	31
OBR. 4.4: PRŮBĚH SIL PŘI HARMONICKÉM PROUDU [1] .....	33
OBR. 4.5: PRŮBĚH SÍLY PRO PRŮCHODU ZKRATOVÉHO PROUDU [1] .....	34
OBR. 4.6: USPOŘÁDÁNÍ VODIČŮ A SMĚR SIL VE TŘÍFÁZOVÉ SOUSTAVĚ.....	34
OBR. 4.7: PRŮBĚH SIL V TROJFÁZOVÉ SOUSTAVĚ PŘI PRŮCHODU HARMONICKÝCH A ZKRATOVÝCH (DOLE) PROUDŮ [8] .....	35
OBR. 4.8: PROUDOVODNÁ PRAVOÚHLÁ DRÁHA, SMĚRY A VELIKOSTI SIL.....	36
OBR. 4.9: SLOŽENÁ PRAVOÚHLÁ PROUDOVODNÁ DRÁHA, SMĚRY A VELIKOSTI SIL...37	
OBR. 4.10: SÍLY VZNIKAJÍCÍ PŘI ZMĚNĚ PRŮŘEZU [9].....	38
OBR. 4.11: SKUTEČNÝ KONTAKT [9].....	39
OBR. 5.1: JISTIČ MODEION BC160 FIRMY OEZ.....	40
OBR. 5.2: ZJEDNODUŠENÝ MODEL JISTIČE BC160 FY OEZ .....	41
OBR. 5.3: ZJEDNODUŠENÝ MODEL JISTIČE BC160 FY OEZ .....	42
OBR. 5.4: ZJEDNODUŠENÝ MODEL JISTIČE BC160 FY OEZ .....	43
OBR. 5.5: NÁHRADA SPLETENÉHO CU VODIČE PLNÝM VODIČEM.....	44
OBR. 5.6: FLEXOPASS .....	44
OBR. 5.6: NÁHRADA KONTAKTU S PŘÍMKOVÝM NEBO BODOVÝM STYKEM ZA PLOŠNÝ STYK.....	45
OBR. 5.7: DETAIL PLOŠNÉHO STYKU.....	45
OBR.6.1: PŘÍŘAZENÍ MATERIÁLU PRO ZHÁŠECÍ KOMORU – OCEL.....	47
OBR.6.2: PŘÍŘAZENÍ MATERIÁLU PRO PROUDOVODNOU DRÁHU – MĚĎ .....	48
OBR. 6.3 PROUDOVODNÁ DRÁHA.....	48
OBR. 6.4: PRVKY, NA KTERÝCH BUDOU PROVÁDĚNY VÝPOČTY SÍLY.....	49



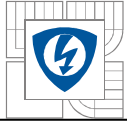
<b>OBR. 6.5: VYTVOŘENÍ NOVÉHO SOUŘADNÉHO SYSTÉMU PRO VÝPOČET MOMENTU ..</b>	<b>49</b>
<b>GRAF 7.1.1: PRŮBĚH SÍLY FX .....</b>	<b>54</b>
<b>GRAF 7.1.2: PRŮBĚHY SIL FY .....</b>	<b>55</b>
<b>GRAF 7.1.3: PRŮBĚHY SIL FZ.....</b>	<b>55</b>
<b>GRAF 7.1.4: PRŮBĚHY MOMENTU PŮSOBÍCÍ NA KONTAKT.....</b>	<b>56</b>
<b>GRAF 7.1.5: PRŮBĚHY SIL FX .....</b>	<b>58</b>
<b>GRAF 7.1.7: PRŮBĚHY SIL FZ.....</b>	<b>59</b>
<b>GRAF 7.1.8: PRŮBĚHY MOMENTŮ PŮSOBÍCÍCH NA KONTAKTY .....</b>	<b>59</b>
<b>GRAF 7.2.1: PRŮBĚH SÍLY FX .....</b>	<b>61</b>
<b>GRAF 7.2.2: PRŮBĚHY SIL FY .....</b>	<b>61</b>
<b>GRAF 7.2.3: PRŮBĚH SÍLY FZ.....</b>	<b>62</b>
<b>GRAF 7.2.4: PRŮBĚH MOMENTU.....</b>	<b>62</b>
<b>GRAF 7.2.5: PRŮBĚH SÍLY FX .....</b>	<b>64</b>
<b>GRAF 7.2.6: PRŮBĚH SIL FY .....</b>	<b>64</b>
<b>GRAF 7.2.7: PRŮBĚH SÍLY FZ.....</b>	<b>65</b>
<b>GRAF 7.2.8: PRŮBĚH MOMENTU.....</b>	<b>65</b>
<b>GRAF 7.2.9: PRŮBĚH SÍLY FX .....</b>	<b>67</b>
<b>GRAF 7.2.10: PRŮBĚHY SÍL FY.....</b>	<b>67</b>
<b>GRAF 7.2.11: PRŮBĚH SÍLY FZ.....</b>	<b>68</b>
<b>GRAF 7.2.12: PRŮBĚH MOMENTU.....</b>	<b>68</b>
<b>GRAF 7.2.13: PRŮBĚH SÍLY FX.....</b>	<b>70</b>
<b>GRAF 7.2.14: PRŮBĚHY SIL FY.....</b>	<b>70</b>
<b>GRAF 7.2.15: PRŮBĚH SÍLY FZ.....</b>	<b>71</b>
<b>GRAF 7.2.16: PRŮBĚH MOMENTU.....</b>	<b>71</b>
<b>GRAF 7.2.17: PRŮBĚH SÍLY FX.....</b>	<b>73</b>
<b>GRAF 7.2.18: PRŮBĚHY SIL FY.....</b>	<b>73</b>
<b>GRAF 7.2.19: PRŮBĚH SÍLY FZ.....</b>	<b>74</b>
<b>GRAF 7.2.20: PRŮBĚH MOMENTU.....</b>	<b>74</b>
<b>GRAF 7.2.21 PRŮBĚHY SIL FX.....</b>	<b>78</b>
<b>GRAF.7.2.22 PRŮBĚHY SIL FY PRO L1 .....</b>	<b>79</b>
<b>GRAF.7.2.23 PRŮBĚHY SIL FY PRO L2 .....</b>	<b>79</b>



<b>GRAF.7.2.24 PRŮBĚHY SIL FY PRO L3 .....</b>	<b>80</b>
<b>GRAF.7.2.25 PRŮBĚHY SIL FY .....</b>	<b>80</b>
<b>GRAF.7.2.26 PRŮBĚHY SIL FZ .....</b>	<b>81</b>
<b>GRAF.7.2.27 PRŮBĚHY MOMENTŮ .....</b>	<b>81</b>
<b>GRAF.7.2.28 PRŮBĚHY SIL FX .....</b>	<b>82</b>
<b>GRAF.7.2.29 PRŮBĚHY SIL FY PRO L1 .....</b>	<b>82</b>
<b>GRAF.7.2.30 PRŮBĚHY SIL FY PRO L2 .....</b>	<b>83</b>
<b>GRAF.7.2.31 PRŮBĚHY SIL FY PRO L3 .....</b>	<b>83</b>
<b>GRAF.7.2.32 PRŮBĚHY SIL FY .....</b>	<b>84</b>
<b>GRAF.7.2.33 PRŮBĚHY SIL FZ .....</b>	<b>85</b>
<b>GRAF.7.2.34 PRŮBĚHY MOMENTŮ .....</b>	<b>85</b>
<b>GRAF.7.2.35 PRŮBĚHY SIL FX .....</b>	<b>86</b>
<b>GRAF.7.2.36 PRŮBĚHY SIL FY PRO L1 .....</b>	<b>86</b>
<b>GRAF.7.2.37 PRŮBĚHY SIL FY PRO L2 .....</b>	<b>87</b>
<b>GRAF.7.2.38 PRŮBĚHY SIL FY PRO L3 .....</b>	<b>87</b>
<b>GRAF.7.2.39 PRŮBĚHY SIL FY .....</b>	<b>88</b>
<b>GRAF.7.2.40 PRŮBĚHY SIL FZ .....</b>	<b>88</b>
<b>GRAF.7.2.41 PRŮBĚHY MOMENTŮ .....</b>	<b>89</b>
<b>GRAF.7.2.42 PRŮBĚHY SIL FX .....</b>	<b>89</b>
<b>GRAF.7.2.43 PRŮBĚHY SIL FY PRO L1 .....</b>	<b>90</b>
<b>GRAF.7.2.44 PRŮBĚHY SIL FY PRO L2 .....</b>	<b>90</b>
<b>GRAF.7.2.45 PRŮBĚHY SIL FY PRO L3 .....</b>	<b>91</b>
<b>GRAF.7.2.46 PRŮBĚHY SIL FY .....</b>	<b>91</b>
<b>GRAF.7.2.47 PRŮBĚHY SIL FZ .....</b>	<b>92</b>
<b>GRAF.7.2.48 PRŮBĚHY MOMENTŮ .....</b>	<b>92</b>
<b>GRAF.7.2.49 PRŮBĚHY SIL FX .....</b>	<b>93</b>
<b>GRAF.7.2.50 PRŮBĚHY SIL FY PRO L1 .....</b>	<b>93</b>
<b>GRAF.7.2.51 PRŮBĚHY SIL FY PRO L2 .....</b>	<b>94</b>
<b>GRAF.7.2.52 PRŮBĚHY SIL FY PRO L3 .....</b>	<b>94</b>
<b>GRAF.7.2.53 PRŮBĚHY SIL FY .....</b>	<b>95</b>
<b>GRAF.7.2.54 PRŮBĚHY SIL FZ .....</b>	<b>95</b>

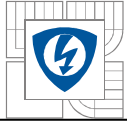


<b>GRAF.7.2.55 PRŮBĚHY MOMENTŮ .....</b>	<b>96</b>
<b>GRAF 7.2.56: PRŮBĚHY SIL FX.....</b>	<b>100</b>
<b>GRAF 7.2.57 PRŮBĚHY SIL FY .....</b>	<b>100</b>
<b>GRAF 7.2.58 PRŮBĚHY SIL FZ .....</b>	<b>101</b>
<b>GRAF 7.2.59 PRŮBĚHY MOMENTŮ .....</b>	<b>101</b>



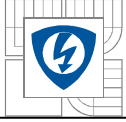
## SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Vlastnosti prvků – elektrická vodivost, tepelná vodivost, hustota .....	24
Tab. 4.1: Hodnoty činitelů $k_h$ a $k_b$ [7] .....	32
Tab. 5.1: parametry jističe BC160 Fy OEZ .....	40
Tab. 7.1.1: Výsledky magnetostatické analýzy pro jednopólový model .....	54
Tab. 7.1.2: Výsledky magnetostatické analýzy pro třípólový model .....	56
Tab. 7.1.3: Výsledné hodnoty pro sílu ve směru osy y .....	57
Tab. 7.2.1: Hodnoty pro proud 5 kA .....	60
Tab. 7.2.2: Hodnoty pro proud 10 kA .....	63
Tab. 7.2.3: Hodnoty pro proud 15 kA .....	66
Tab. 7.2.4: Hodnoty pro proud 20 kA .....	69
Tab. 7.2.5: Hodnoty pro proud 25 kA .....	72
Tab. 7.2.6: Hodnoty sil pro proud 15 kA .....	75



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	tloušťka proudovodné dráhy
B	magnetická indukce
b	šířka/výška vodiče
D	průměr kontaktu
d	průměr kontaktního místa
E	modul pružnosti
F	síla
H <sub>B</sub>	tvrdost materiálu podle Brinnela
h	vzdálenost od středu
I	elektrický proud
i	okamžitá hodnota elektrického proudu
l	délka ramene
R <sub>s</sub>	stykový odpor
S	plocha
t	čas
β	úhel
μ	permeabilita
ζ	činitel zohledňující vliv pružné deformace
τ	časová konstanta
φ	fázový posun mezi proudem a napětím
ω	úhlová frekvence

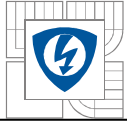


# 1 ÚVOD

Jako účinná ochrana člověka a zvířat před účinky elektrického proudu, je jistící prvek, nejčastěji jistič nebo pojistka. Každý jistící prvek musí zaručit bezpečnost při svém normálním provozu. Aby byl jistící prvek bezpečný, musíme znát nejen jeho parametry za normálních podmínek, ale také během poruchového stavu obvodu. Poruchovým stavem se myslí průchod nadproudů. Při velkých nadproudech – zkratech, dosahuje hodnota proudu až 100 násobku své jmenovité hodnoty. Při tak velkých proudech vzniká nejen velké množství tepla, ale i elektrodynamické síly, které mohou způsobit poškození přístroje, nebo jeho selhání.

Tato práce pojednává o vzniku elektrodynamických sil, mezi různě na sebe navzájem orientovaných proudovodných, ale také o vzniku sil mezi pohyblivým a pevným kontaktem.





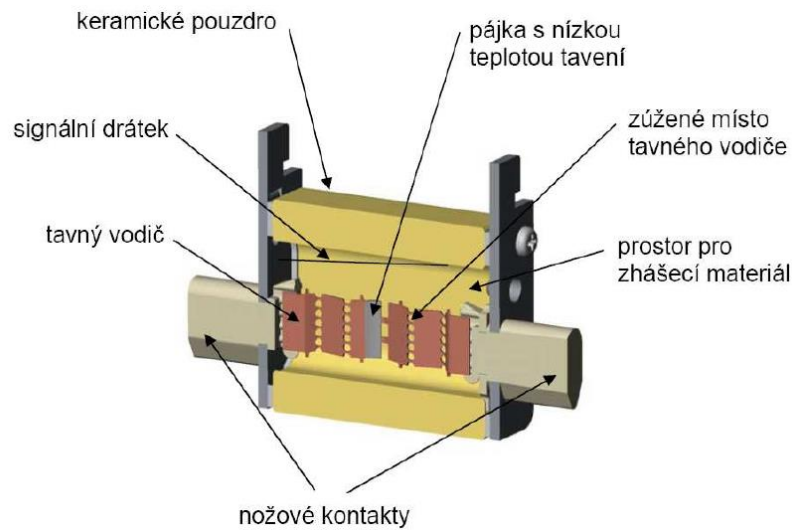
## 2 JISTÍCÍ PRVKY V OBVODU

Před účinky *nadproudů* jistíme elektrická zařízení *tavnými pojistkami* a samočinnými spínacími přístroji nazývanými *jističe*.

### 2.1 Pojistka

Vyměnitelná část obvodu obsahující tavný vodič, jehož průřez je úmyslně zmenšen. Představuje proto nejslabší místo obvodu, v němž se tepelným účinkem nadproudů tavný vodič přetaví. To má za následek vznik elektrického oblouku, po jehož zániku dojde k přerušení proudu. Působí tedy jednorázově. Výpočtové a experimentální metody ukazují, že velké poruchové nadproudy způsobí velmi rychlé přetavení, zatímco malé nadproudy vyvolané pracovním přetížením vedou k dlouhým dobám tavení. Navíc v oblasti malých nadproudů i malé změny proudu způsobují velké změny doby tavení. Odtud vyplývá vhodnost použití pojistek především k jistění sítí vůči zkratovým proudům a nevhodnost k jistění elektromotorů. Snaha o co největší využití materiálu elektromotorů zvětšuje jejich citlivost na malá a dlouhodobá přetížení, takže zmíněné velké změny doby tavení se již mohou projevit nepříznivě. Kromě toho větší násobky (záběrné proudy) vypínají pojistky ve velmi krátkých dobách, což narušuje spouštění motorů. Zvolí-li se z tohoto důvodu pojistka na větší jmenovitý proud, než je jmenovitý proud motoru, jističí účinek se při trvalém chodu motoru zmenší. Tento nedostatek se částečně odstranil použitím pomalých pojistek, které mají v oblasti větších nadproudů přiměřeně delší dobu tavení. Dalším specifickým nedostatkem pojistek je okolnost, že následkem výrobních tolerancí, materiálových vlastností kolísajících s vlivem měnící se teploty okolí není charakteristikou pojistky jednoznačná křivka, ale pásmo. Jeho šířka může být někdy tak velká, že se překrývají pásma charakteristik rychlých a pomalých pojistek. Kromě toho nelze pojistku použít ke spínání, tj. k připojení a odpojení spotřebičů od sítě. [1]

Konstrukce pojistky je na Obr.2.1



Obr. 2.1 : Pojistka – hlavní části [2]

## 2.2 Jistič

Uvedené nevýhody pojistek v oblasti malých nadproudů mohly být přitom vyřešeny jinými způsoby jištění. Jistič musí jistit jak síť, tak spotřebiče, nesmí se poškodit ani při přerušování velkých nadproudů, aby byl schopen nového zapnutí. Vykazuje tedy velkou vypínací schopnost. Není však vhodný k častému spínání. Vypínání zajišťuje pružina, která se při zapnutí napne. Protože však napnutá pružina stále tlačí pohyblivé kontakty do zapnuté polohy, je nutné zapnutou polohu zajistit zámkem. Jeho uvolnění se dosáhne působením řídicích článků, které kontrolují změnu některé fyzikální veličiny zvolené vhodně vzhledem k druhu poruchového stavu a po dosažení podmínky vypnutí dávají popud k uvolnění zámkem. Jističe pro malé jmenovité proudy mají zámkové provedení, nejčastěji jako západky nebo prolomené páky. U jističů pro velké jmenovité proudy s mohutnými vypínacími pružinami je požadavek malé síly k vybavení zámkem řešen volnoběžkami, což je v podstatě soustava několika vzájemně spojených jednoduchých zámků. Řídicí články jističů mohou být začleněny jako spouště nebo jako relé.

*Spoušť* je součástí jističe, neboť působí mechanicky přímo na zámek nebo volnoběžku. Proto musí mít co nejmenší rozměry, což však má za následek, že vyvolává poměrně malou vybavovací sílu. *Zámky a volnoběžky* musí být proto konstruovány tak, aby i tato malá síla stačila k uvolnění vypínacího mechanismu. Pojmem relé označujeme tytéž řídicí články, jestliže působí nepřímo, nejčastěji prostřednictvím pomocného elektrického obvodu. V tomto případě mohou být umístěny v rozváděči samostatně mimo prostor jističe. Podle zapojení spouští v síti je klasifikujeme jako *primární* a *sekundární*. Primární spouští prochází plný proud sítě. Jsou-li proudy sítě velké nebo jde-li o jištění sítě vysokého napětí, kdy mechanismus spouště musí být izolačně oddělen od sítě, napájí se spouště z proudového transformátoru. V tomto případě jde o spouště sekundární. Nejčastějším případem bývá nadproud vyvolaný provozním přetížením spotřebičů a zkrat v síti. Veličinou kontrolovanou spouští je proud obvodu. Zvláštním případem je proudové přetížení spotřebičů vyvolané snížením napětí v části sítě před místem velkého odběru. Toto snížení napětí nazýváme *podpětí*.

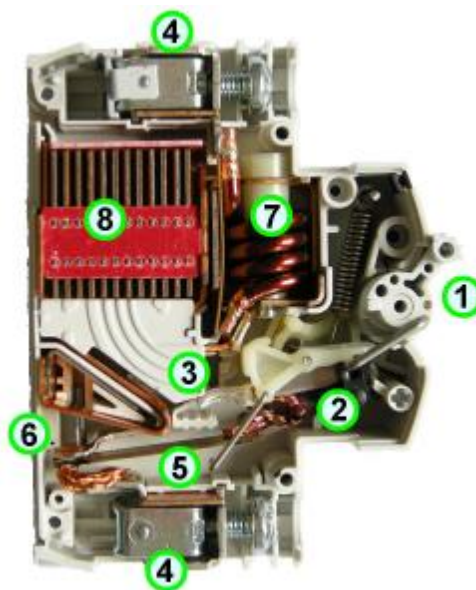
Tedy je kontrolovanou veličinou napětí sítě. U vypínačů na vysoké a velmi vysoké napětí vytvářejí vypínací impuls jističi relé, jejichž součástí je ještě řídicí článek časový. Umožňuje časové zpoždění vypínacího impulsu vzhledem k okamžiku vzniku poruchy. [1]

Rozeznáváme několik druhů jističů (zde rozdělení podle velikosti proudu a způsobu jejich použití): [2]

- malé jističe (MCB) – určeny převážně pro použití v domácích a podobných instalacích, typicky do 125 A, upevňovány nejčastěji na U-lištu
- kompaktní jističe (MCCB) – nosným prvkem je plastová základna, jmenovité proudy obvykle do 1600 A
- vzduchové jističe (ACB) – nosným prvkem je ocelový rám, jmenovité proudy obvykle do 6300 A)

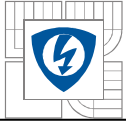
Příklad malého jističe je na Obr. 2.2

- 1 - ovládací páčka
- 2 - aretační mechanismus
- 3 - kontakty
- 4 - přívodní šroubová svorka
- 5 - bimetalový člen pro vybavení přetížením
- 6 - regulační prvek nastavení citlivosti
- 7 - elektromagnetická spoušť pro vybavení zkratem
- 8 - zhášecí komora



Obr. 2.2: Malý jistič (MCB) [3]

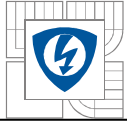
Příklad kompaktního jističe je na Obr. 2.3



Obr. 2.3: Kompaktní jistič BC160 [4]

Příklad vzduchového jističe je na Obr. 2.4





## 3 MATERIÁLY V ELEKTROTECHNICE

Materiály dělíme podle několika hledisek:

- podle skupenství – plynné, kapalné, pevné
- podle vedení elektrického proudu – dielektrika a izolanty, vodiče, polovodiče
- podle využití – vodiče, izolanty, konstrukční materiál, materiály pro kontakty

V této práci se zaměřím na rozdělení podle využití - vodiče, izolanty, konstrukční materiál, materiály pro kontakty

### 3.1 Izolanty

Hlavním účelem izolantu je zabránit průchodu elektrického proudu mezi dvěma body o různém potenciálu.

Ideální izolant – látka, která neobsahuje žádné nosiče náboje. Ve skutečnosti ideální izolant neexistuje. Každý reálný izolant obsahuje určité množství volných nosičů náboje, které mohou být pozůstatkem komponent z výroby nebo jiných nečistot. Nosiče mohou v izolantu vzniknout také působením různých vlivů – navlhnutím, zvýšením teploty, působením záření. [10]

Nejdůležitější vlastností u izolantů jsou:

Elektrická pevnost  $E_p$  [V/m]

Konduktivita  $\sigma$  [S/m]

Relativní permeabilita  $\epsilon_r$

Ztrátový činitel  $\text{tg}\delta$

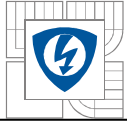
Mezi další vlastnosti patří chemická a tepelná odolnost, pevnost, tvrdost,...

#### 3.1.1 Materiály

##### 3.1.1.1 Plynná dielektrika

[10][11]

• *Vzduch* – nejpoužívanější izolant. Používá se jak ve vnitřních (např. jističe) tak venkovních přístrojích (např. odpojovač). Elektrická pevnost  $E_p = 31$  kV/cm, konduktivita  $\sigma = 10^{-14}$  S/m, relativní permeabilita  $\epsilon_r = 1,0000594$ , ztrátový činitel  $\text{tg}\delta = 10^{-6}$ . Uvedené hodnoty platí pro teplotu 20°C a tlak  $10^5$ Pa.



- *Hexafluorid síry  $SF_6$*  – používá se jako izolační a chladicí médium u transformátorů vn a vvn a jako zhašecí médium ve výkonových spínačích vvn. Tento plyn je nehořlavý, chemicky netečný, nejedovatý, bez zápachu. Elektrická pevnost  $E_p = 77$  kV/cm, což umožňuje zmenšit prostor pro rozvodnu při použití zapouzdřené rozvodny s  $SF_6$ .

- *Dusík* – má téměř shodné vlastnosti jako vzduch, je však lehčí a nemá oxidační účinky. Používá se jako chladicí médium velkých točivých strojů, inertní atmosféra olejových transformátorů a také jako náplň některých elektronek.

### 3.1.1.2 Kapalná dielektrika

[10][11]

- *Minerální oleje* – vyrábí se destilací z ropy. Používají se jako transformátorové oleje, kabelové oleje (impregnace, nejčastěji papíru), oleje ve spínačích a v kondenzátorech.

- *Syntetické kapaliny* – mají vynikající chemické vlastnosti, jsou nehořlavé, mají větší tepelnou odolnost. Používají se jako impregnační oleje pro kabely, do svitkových kondenzátorů.

### 3.1.1.3 Tuhá dielektrika

[10][11]

- *Organické* – používají se nejčastěji. Patří sem *termoplasty*, *reaktoplasty*.

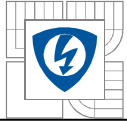
- *Termoplasty* jsou při vyšších teplotách tvárné, používají se jako dílce, součásti, těsnění, nebo také jako lepidla. Patří sem *PE*, *PP*, *PVC*, *PS* a jiné.

- *Reaktoplasty* jsou vytvrzené teplem, používají se jako zalévací hmoty, pojiva, elektroizolační laky a lepidla. Patří sem především pryskyřice fenolformaldehydové, melaminoformaldehydové, polyesterové a epoxidové.

- *Anorganické* – velká tepelná odolnost, odolnost proti stárnutí a radiaci. Patří sem slída, azbest, keramika, elektroizolační skla a jiné.

## 3.2 Vodiče

Materiály, z kterých se vyrábí vodiče, zahrnují velkou skupinu látek s elektronovou, res iontovou vodivostí. Mezi látky s elektronovou vodivostí patří především vodiče na bázi kovů, mezi látky s iontovou vodivostí patří vodiče zastoupené zejména roztoky a taveninami solí. Rezistivita těchto materiálů je od  $10^{-8}$   $\Omega$ m až k rezistivitě polovodičů. Vodiče mají o několik řádů vyšší koncentraci volných nosičů náboje než polovodiče. Vodiče s elektronovou vodivostí mají dobrou tepelnou vodivost, vodiče s iontovou vodivostí se při průchodu elektrického proudu změní, dojde k přesunu materiálu.[10]



### 3.2.1 Materiály kovových vodičů

[10][11][12] Materiály vodivé používané v elektrotechnice můžeme rozdělit na čisté kovy, slitiny kovů, kompozitní materiál

#### 3.2.1.1 Čisté kovy

- *Měď* - vynikající tepelná a elektrická vodivost, výborná tvárnost, odolnost proti korozi, dobrá stopovatelnost.
- *Stříbro* – má nejlepší elektrickou a tepelnou vodivost, je dobře tvárné, používá se především na kontakty malých proudů a na povrchové vrstvy.
- *Zlato* – odolné vůči chemikáliím, výborně tvárné, používá se pro výrobu tenkých drátů a jako povrchové vrstvy.
- *Hliník* – horší tepelná a elektrická vodivost než měď, na vzduchu rychle oxiduje, to zvyšuje přechodový odpor.

Tab. 3.1: Vlastnosti prvků – elektrická vodivost, tepelná vodivost, hustota

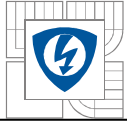
kov	$\rho$ $\cdot 10^{-8} \Omega/\text{m}$	$\alpha$ $\cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$	$\rho$ $\text{kg}/\text{m}^3$
Ag	1,58	4,1	10 490
Cu	1,72	8,93	8 960
Au	2,12	3,98	19 300
Al	2,63	4,26	2 700

#### 3.2.1.2 Slitiny kovů

- Nejznámější a nejpoužívanější *slitinou mědi* jsou mosaz, bronz. Mosaz je používána pro konstrukční, spojovací a instalační díly elektricky vodivé a také k výrobě pružin. Bronz se používá pro konstrukční účely a pro pružiny.

- *Slitiny hliníku* mají na rozdíl od čistého hliníku větší pevnost, lepší odolnost proti tečení. Slitiny hliníku se používají pro vinutí elektrických strojů, pro ohebné vodiče a jako vinutí transformátorů velkých výkonů. [10][11] [12]





### 3.3 Kontakty

[12] Materiál pro kontakty musí splňovat tyto požadavky:

- Výborná elektrická a tepelná vodivost
- Mechanická a chemická odolnost
- Odolnost proti opalu elektrickým obloukem
- Malý stykový odpor
- Odolnost proti svaření
- Podpora deionizačních pochodů
- Ekologicky nezávadné
- Snadné spojení k ostatním konstrukčním prvkům

Žádný prvek, který se používá pro kontakty nesplňuje všechny požadavky, proto musíme při výběru vhodného materiálu udělat kompromis.

#### 3.3.1 Materiál

Materiály pro kontakty můžeme rozčlenit do těchto skupin:

- Čisté kovy
- Slitiny kovů
- Materiály na bázi technického uhlíku
- Kompozitní kontaktové materiály

##### 3.3.1.1 Čisté kovy

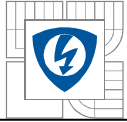
• *Stříbro* - mezi nevýhody patří nízká teplota měknutí, snadné svaření, při průchodu ss proudy dochází k přenosu materiálu, nízká odolnost vůči mechanickému poškození. Mezi výhody patří vcelku dobrá odolnost vůči korozi, dobrá obrobitelnost, vysoká elektrická a tepelná vodivost

• *Zlato* - mezi nevýhody patří snadné svaření, malá mechanická odolnost, malá odolnost vůči elektrickému oblouku. Mezi výhody patří velká elektrická a tepelná vodivost t a odolnost vůči chemikáliím

• *Wolfram* - mezi nevýhody patří jeho těžká zpracovatelnost, má menší vodivost než měď, časem dochází k oxidaci. Mezi výhody patří velká odolnost vůči opalu elektrickým obloukem, teplota tavení je asi 3400°C, teplota měknutí asi 1000°C, dobrá mechanická odolnost

##### 3.3.1.2 Slitiny kovů

Mají lepší mechanické a chemické vlastnosti než čisté kovy.

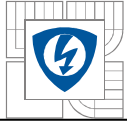


- Slitiny *mědi* – používají se především v kontaktech s pohyblivými kontaktními plochy
- Slitiny *stříbra* – nejpoužívanější slitiny. Nejvíce se používá slitina s mědí - vyšší odolnost vůči opalu, zlepšení mechanických vlastností, Dále se používá slitina s paladiem – vyšší odolnost vůči opalu, zlepšení mechanických a chemických vlastností, používá se na kluzné spínače, mikrokontakty, relé
- Slitiny na bázi *zlata* – přidání Pt, Pd, Ag, Ni, zlepšení mechanických vlastností, odolnost proti korozi, použití ve spínacích relé, kartáče v malých stejnosměrných motorcích
- Slitiny *paladia* – mají větší tvrdost a odolnost vůči síře než slitiny stříbra. Přísadami jsou Ag, Ni, W, Ru
- Slitiny *platina a iridia* – jsou mechanicky odolné, používají se pro přístroje v prašných prostředích.

### 3.3.1.3 Kompozitní kovy

Využití vhodných vlastností svých složek. Vznikají buď spékáním prášků jednotlivých materiálů, nebo napouštěním jednoho materiálu druhým. Kostra je tvořena materiálem odolným vůči opalu (nejčastěji wolframem, molybdenem nebo třeba uhlíkem), výplň je tvořena materiálem s velmi dobrou vodivostí (stříbro, měď). Mezi nejdůležitější kompozitní materiály patří:

- $AgNi$  – Ni tvoří 10-40%, dobrá odolnost vůči opalu, dobrá pohyblivost oblouku po kontaktech, používá se ve spínacích přístrojích s proudem do stovek ampérů
- $AgSnO_2$  – obsahuje 2-14%  $SnO_2$ , odolnost proti svaření, nízký a stálý stykový odpor, použití u relé, stykačů nn, spínačů spotřebičů, proudových chráničů, ..., párování s  $AgC$
- $AgZnO$  – obsahuje okolo 8%  $ZnO$  + malé množství dalších oxidů kovu, odolnost proti svaření obloukem, ekonomická alternativa  $AgSnO_2$  (menší životnost), použití u střídavých relé, motorových jističů, proudových chráničů, s menším jmenovitým proudem, ..., párování s  $AgC$
- ( $AgCdO$ ) - i přes výborné vlastnosti, kvůli toxicitě Cd zakázáno
- $AgC$  - obsahuje 2-5% C jedná se o materiál s jednou z nejvyšších odolností proti svaření (s obsahem C roste), menší odolnost proti opalu obloukem, podle směru orientace uhlíkových částí při tažení se dělí na kontakty s orientací paralelní ke kontaktní ploše (vyšší odolnost proti svaření) a orientací kolmou ke kontaktní ploše (vyšší odolnost proti opalu obloukem), při hoření oblouku se uhlík dostává na stěny zhašecí komory, což může vést ke snížení dielektrické pevnosti po uhasnutí oblouku, nejčastěji se páruje s  $AgNi$  nebo  $AgW$  kontakty, použití u jističů, proudových chráničů, motorových spouštěčů až do jmenovitých proudů 1000A
- $AgW$  – obsahuje 50 – 80% W, relativně velký stykový odpor, nestálý – s oxidací W roste (zejména po vypínání zkratů), použití zejména pro opalovací kontakty spínacích přístrojů pro velké vypínací schopnosti, někdy i hlavní kontakty pro větší jmenovité proudy a menší elektrickou životnost



- $AgWC$  – obsahuje 40-65% tvrdého WC, oproti AgW větší odolnost proti svaření, při vypínání velkých proudů vytváří karbid ochrannou atmosféru – nižší oxidace, ale obecně vyšší stykový odpor
- $AgWC$  - pro dosažení menšího oteplení se může přidávat ještě uhlík (př.  $AgWC16C2$ ), což ale vede k větší erozi vlivem elektrického oblouku. Použití obdobné jako u AgW
- $CuW$  – obsahuje 50-85% W, velká odolnost proti opalu obloukem, nevhodné pro trvalý proud, dominantní postavení u opalovacích kontaktů přístrojů na vysoké a velmi vysoké napětí (jako hlavní kontakt zde nejčastěji použit  $CuCrZr$ ) v uspořádání tulipánových kontaktů a roubíku

### 3.4 Konstrukční materiály

[10][11] Hlavním úkolem konstrukčních materiálů je zajištění mechanických vlastností. Zajištění mechanických nebo magnetických vlastností není jejich hlavní funkce.

#### 3.4.1 Materiály pro konstrukční materiály

Materiály můžeme rozdělit do několika skupin:

- Kovové konstrukční materiály
- Plasty
- Konstrukční keramika
- Kompozitní materiál

##### 3.4.1.1 Kovové konstrukční materiály

Na bázi *železa* – tvoří asi 95 % spotřeby kovů. Technologie jejich výroby je dobře zvládnutelná a jednoduchá. Největší vliv na vlastnosti slitin má obsah uhlíku a obsah různých příměsí – nikl, křemík, chrom, wolfram, mangan a jiné. Konstrukční materiály na bázi železa se dále dělí na uhlíkové oceli (obsah uhlíku do 2%), litiny (obsah uhlíku je 2-4% ).

Na bázi *neželezných kovů* – především na bázi mědi, hliníku, cínu, zinku a jiných.

Nejpoužívanější slitina na bázi hliníku je dural (pevný a lehký), na bázi mědi je to mosaz a bronz (použití jako pružiny)

##### 3.4.1.2 Plasty

- *Termoplasty* – působením tepla měknou, jsou tvárné. Ochlazením neztrácejí svou strukturu. Patří sem např. PE, PP, PVC, PS, PTFE (teflon)

- *Reaktoplasty* – působením teploty nebo zářením dochází k jejich vytvrzení, nelze je tedy po zahřátí tvarovat. Patří sem především pryskyřice na bázi fenolů a aldehydů, jako je polyesterová nebo epoxidová pryskyřice.



### 3.4.1.3 Konstrukční keramika

jedná se o polykrystalický nekovový materiál. Získává se z jemně zrnitých anorganických surovin jejich slisováním a vypálením.

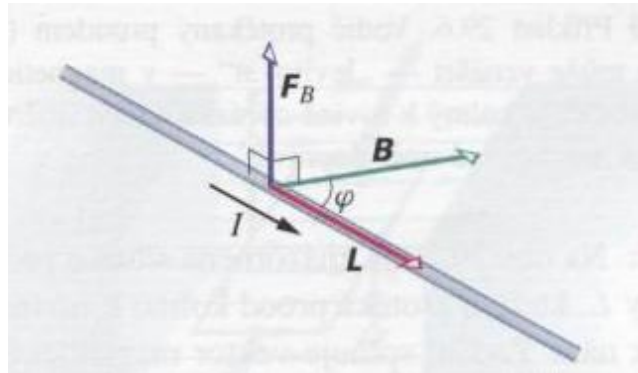
- *Oxidační keramika* – zahrnuje materiály získané z jednoduchých kovových materiálů anebo ze složitých sloučenin. Nejvýznamnější je korundová keramika (vysoká pevnost v ohybu, tvrdost, chemická odolnost, velká teplotní roztažnost) a moderní zirkoničitá keramika

- *Neoxidační keramika* – tato keramika má vysokou tvrdost, odolává vysokým teplotám a abrazi. Má vysokou teplotní vodivost ale špatnou elektrickou vodivost. Používá se jako těsnící prvky, sedla ventilů anebo ložiska.

### 3.4.1.4 Kompozitní materiály

Jedná se o minimálně dvousložkové heterogenní materiály. Jedna ze složek plní úlohu matrice (fixace a ochrana), ostatní složky vyvázejí ztužující a zpevňující materiály. Nejčastějším materiálem pro matrici je kov, keramika nebo polymer. Další složky jsou vlákna nebo jinak tvarované částice. Vlákna nebo jinak tvarované částice mají špatnou mechanickou odolnost, pro jsou chráněny matricí. Jako vlákno se používá také kevlar – výsledný kompozit má velkou mez pevnosti, až 1,4 GPa při hustotě 1 330 kg·m<sup>-3</sup>.

## 4 SÍLY V JISTIČI



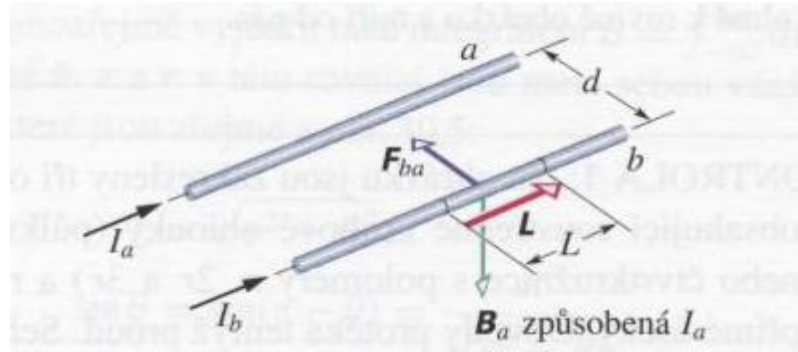
Obr. 4.1: Síla vznikající průchodem el. proudu [6]

Prochází-li proudovou dráhou elektrického zařízení proud, vzniká síla, která způsobuje mechanické namáhání. Mechanické namáhání může dosáhnout zvláště velkých hodnot při zkratech, kdy procházejí zařízením poměrně velké proudy. K ještě většímu mechanickému namáhání proudové dráhy, nebo její části, může dojít při působení stejné síly tehdy, dostane-li se proudová dráha nebo její část do rezonance s elektrodynamickou silou. V některých případech se snažíme síly vzniklé v elektrických přístrojích potlačit jako nežádoucí, někdy je zase právě naopak konstrukčními úpravami zvětšujeme. Příčinou vzniku síly v elektrických zařízeních je existence magnetických polí, která na sebe působí. Obecně platí, že na element  $d\mathbf{l}$  proudového vlákna s proudem  $\mathbf{i}$ , které se nachází v magnetickém poli indukce  $\mathbf{B}$ , působí síla (obr. 4.1) [1]

V elektrických přístrojích dochází při průchodu proudu ke vzniku magnetických polí, která jsou příčinou vzniku elektrodynamických sil v těchto případech:

- a) při více proudových drahách;
- b) při zakřivení proudové dráhy;
- c) u proudové dráhy nacházející se v blízkosti feromagnetického rozhraní;
- d) při deformaci proudového pole v proudové dráze vyvolané změnou jejího průřezu;
- e) při změně indukčnosti obvodu vyvolané činností elektrického přístroje;
- f) při průtoku proudu proudovou dráhou.

## 4.1 Síly ve více proudových drahách



Obr. 4.2: Síla mezi dvěma vodiči [6]

Nejdříve musíme nahradit proudové dráhy proudovými vlákny. Poté síla

$$F = i \int l dl \times B$$

působící na element vodiče přejde do tvaru:

$$dF = i_2 dl_2 \times B_1$$

Kde  $B_1$  je vektor indukce vyvolané proudem  $i_1$ , který protéká vodičem délky  $l_1$ . Pokud budeme uvažovat nekonečně dlouhý vodič, bude síla podle Biotova-Savartova zákona

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dl_1 \times r}{r^3}$$

Dosazením této rovnice do rovnice

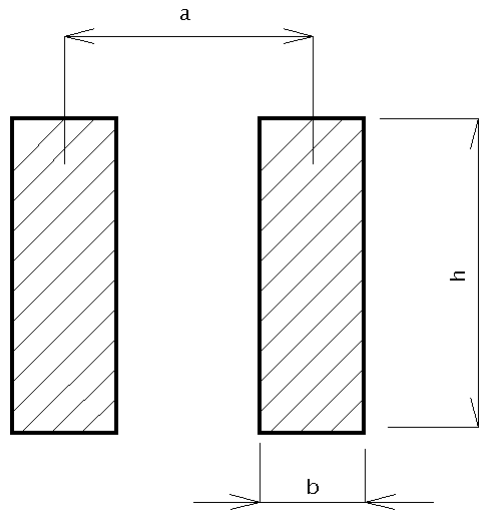
$$dF = i_2 dl_2 \times B_1$$

A při uvažování, že jsou vodiče přímé, dostaneme vztah pro sílu ve tvaru

$$F = \frac{2l}{a} i_1 i_2 \cdot 10^{-7} [1]$$

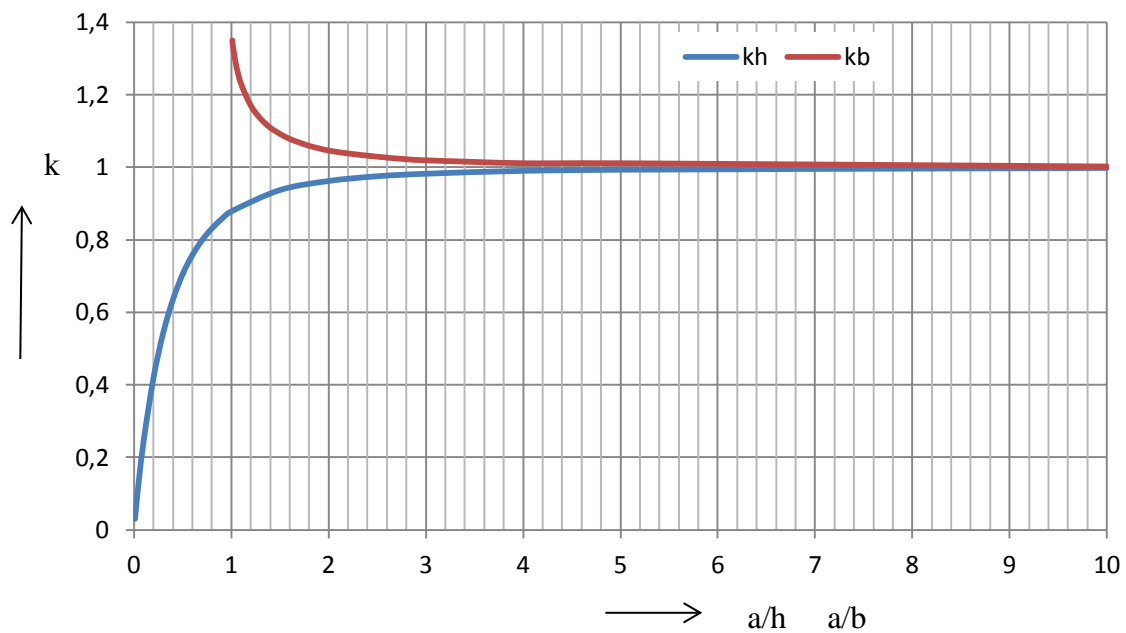
Tento vztah platí pro vodiče nahrazené proudovými vlákny. V praxi však musíme uvažovat vliv tvaru vodičů. Pokud se jedná o dva rovnoběžné vodiče obdélníkového tvaru se stranami  $b$  a  $d$ , musíme sílu  $F$  vynásobit *činitelem tvaru průřezu vodiče*  $k_p$ . [1]

$$k_p = k_h \cdot k_b$$



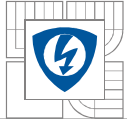
Obr. 4.3: Uspořádání vodičů

Tento činitel se odečte z grafu



Graf 4.1: Opravné činitele  $k$  pro vodiče

Nebo z Tab. 4.1, kde je uvedeno pouze několik poměrů  $\frac{a}{h}$  resp.  $\frac{a}{b}$



Tab. 4.1: Hodnoty činitelů  $k_h$  a  $k_b$  [7]

a/h	$k_h$	a/h	$k_h$	a/b	$k_b$	a/b	$k_b$
0,01	0,03	0,8	0,831	1,01	1,35	1,8	1,059
0,02	0,059	0,9	0,857	1,02	1,328	1,9	1,052
0,05	0,137	1	0,878	1,05	1,28	2	1,046
0,1	0,248	1,5	0,937	1,1	1,23	2,2	1,038
0,2	0,419	2	0,962	1,2	1,17	2,5	1,029
0,3	0,543	2,5	0,975	1,3	1,134	2,8	1,022
0,4	0,635	3	0,982	1,4	1,109	3	1,019
0,5	0,705	4	0,99	1,5	1,092	4	1,011
0,6	0,758	5	0,993	1,6	1,078	5	1,011
0,7	0,799	10	0,998	1,7	1,068	10	1,002

Činitelé tvaru průřezu je možno vypočítat ze vztahu [7]

$$k_p = 1 - \frac{0,12}{\frac{a-b}{h+b} + \frac{b}{h}} \quad \text{při } \frac{b}{h} \leq 1$$

- platí pro vodiče na výšku

$$k_p = 1 + \frac{0,12}{4 \left( \frac{a-b}{h+b} \right) + \frac{h}{b}} \quad \text{při } \frac{b}{h} > 1$$

- platí pro vodiče na plocho

## 4.2 Síly střídavého proudu

Předchozí síly byly uvažovány při průchodu stejnosměrného proudu. V praxi se však setkáme s průběhy sil, které vyvolal střídavý proud. Pokud do rovnice

$$F = \frac{2l}{a} i_1 i_2 \cdot 10^{-7}$$

Dosadíme za proudy  $i_1$  a  $i_2$  střídavé harmonické proudy, posunutě vůči sobě u úhel  $\phi$ , jejichž okamžité hodnoty jsou

$$i_1 = I_1 \sin \omega t$$



$$i_2 = I_2 \sin(\omega t - \varphi)$$

a maximální hodnoty

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin \omega t$$

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

Dostaneme výslednou sílu

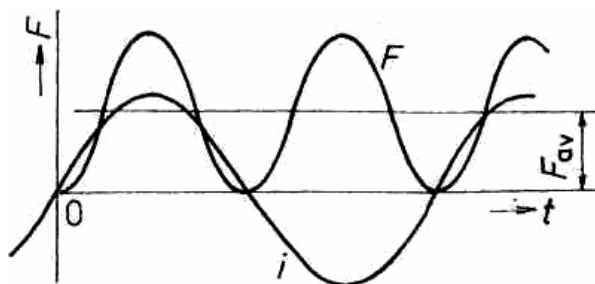
$$F = 4I_1 I_2 \frac{l_1}{a} \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) \cdot 10^{-7}$$

A po úpravě

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

Výsledná síla je pak tvořena dvěma silami. Jedna je časově nezávislá (odpovídá  $\cos \varphi$ ), druhá je časově závislá a její frekvence je  $2\omega$ .

Průběh sil je na Obr.4.4



Obr. 4.4: Průběh sil při harmonickém proudu [1]

Výše zobrazené průběhy platí pro harmonické proudy. Pokud uvažujeme zkratový proud o průběhu

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

$I_\infty$  - ustálená hodnota proudu v obvodu

$\tau$  - časová konstanta tlumení přechodné složky

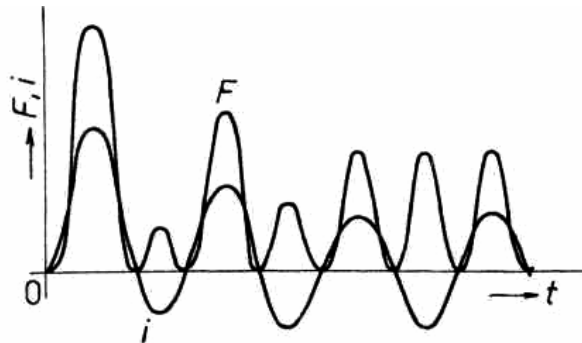
za předpokladu, že oběma vodiči teče stejný proud, je působící síla

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

Po úpravě

$$F = 4I^2 \frac{l_1}{a} \left[ e^{-2t/\tau} - 2e^{-t/\tau} \cos \omega t + \frac{1}{2}(1 + \cos 2\omega t) \right] \cdot 10^{-7}$$

Průběh síly je na Obr.4.5

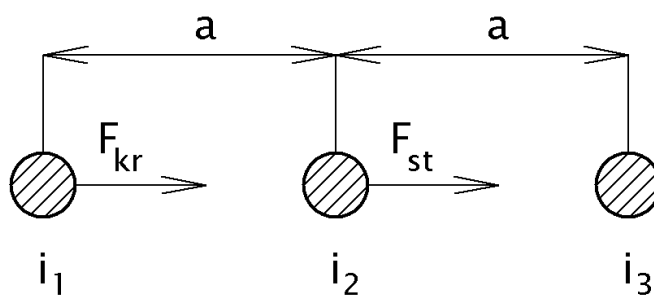


Obr. 4.5: Průběh síly pro průchodu zkratového proudu [1]

[1]

### 4.3 Síly v trojfázové soustavě

Při průchodu proudů v trojfázové soustavě záleží na uspořádání vodičů. Nejčastější uspořádání je podle Obr.4.6



Obr. 4.6: Uspořádání vodičů a směr sil ve třífázové soustavě

Pokud proudy mají tyto hodnoty:

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin \omega t$$

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

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

Pak síly působící na krajní a střední vodič mají tyto hodnoty:

$$F_{kr} = 4 \left[ I_1 I_2 \frac{l}{a} \sin \omega t \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + I_1 I_3 \frac{l}{2a} \sin \omega t \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \right] \cdot 10^{-7}$$

$$F_{st} = 4 \left[ I_1 I_2 \frac{l}{a} \sin \omega t \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + I_2 I_3 \frac{l}{a} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \right] \cdot 10^{-7}$$

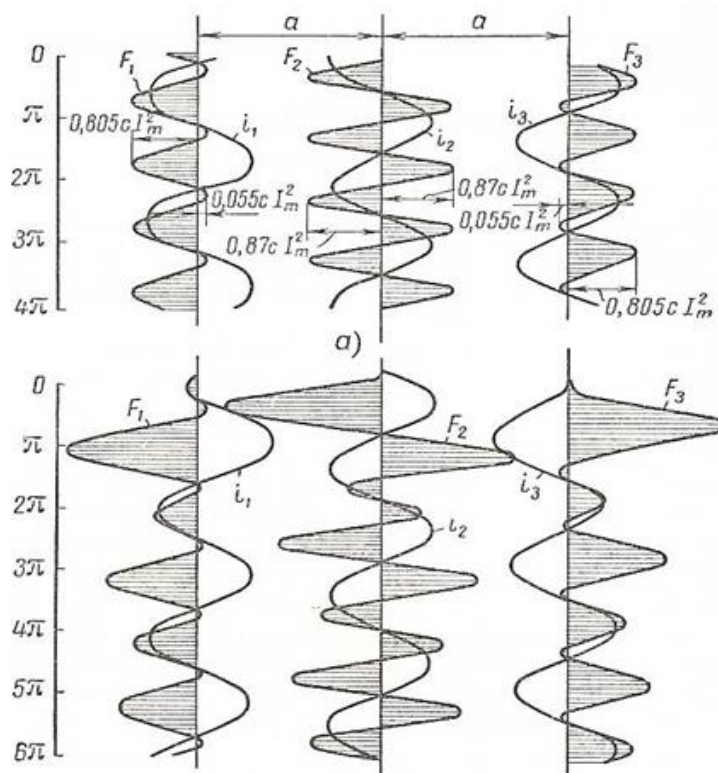
Pokud se jedná o proudy v symetrické trojfázové soustavě, kde jsou amplitudy proudu stejné ( $I_1 = I_2 = I_3 = I$ ), dostaneme po úpravě výše uvedených rovnic:

$$F_{kr} = 2 \frac{l}{a} I^2 \left( \frac{3}{4} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \sin 2\omega t - \frac{3}{4} \right) \cdot 10^{-7}$$

$$F_{st} = 2 \frac{l}{a} I^2 \left( \frac{3}{4} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \sin 2\omega t \right) \cdot 10^{-7}$$

[1]

Grafický průběh sil je na Obr. 4.7

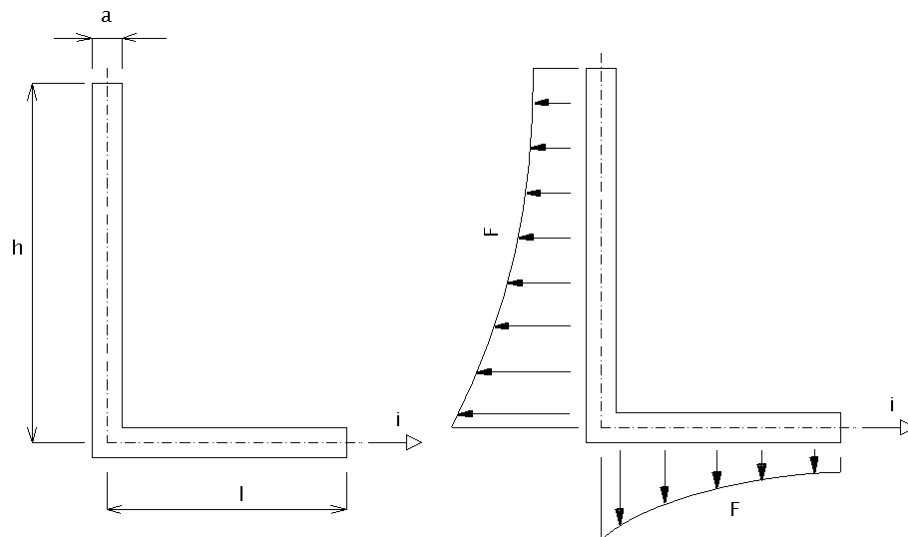


Obr. 4.7: Průběh sil v trojfázové soustavě při průchodu harmonických a zkratových (dole) proudů [8]

## 4.4 Síly v zakřivené proudové dráze

### 4.4.1 Jednoduchý pravoúhlý záhyb

Při výpočtech sil v zakřivené proudové dráze se síly počítají tak, že se celá proudovodná dráha rozdělí na několik úseků konečné délky.



Obr. 4.8: Proudovodná pravoúhlá dráha, směry a velikosti sil

Indukce ve vzdálenosti  $x$  od osy vodiče je pak

$$B_x = \frac{\mu_0 i}{4\pi x} (\cos\beta_2 - \cos\beta_1)$$

A síla působící na element vodiče je

$$F = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \int_r^l (\cos\beta_2 - \cos\beta_1) \frac{dx}{x}$$

Z Obr vyplývá

$$\cos\beta_1 = 0$$

$$\cos\beta_2 = \frac{h}{\sqrt{h^2+x^2}}$$

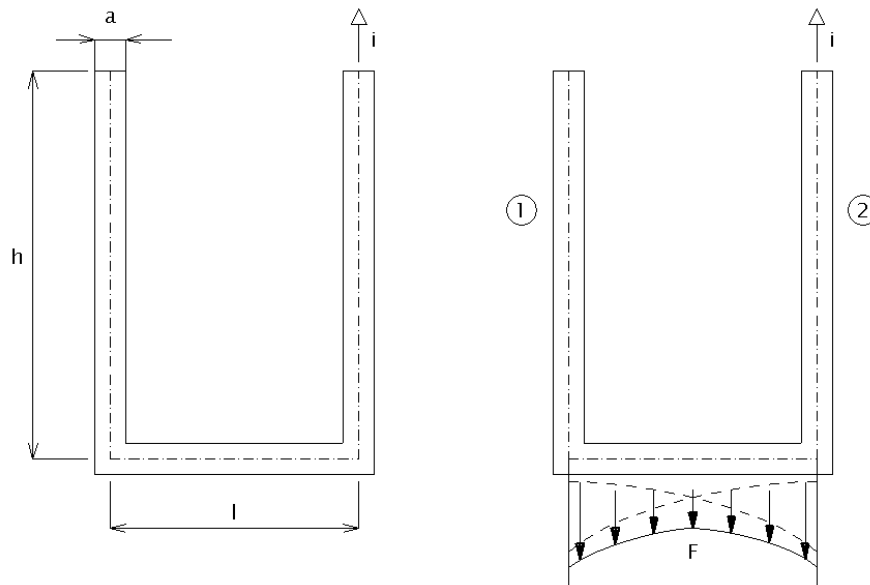
Dosazením a úpravou dostaneme výsledný vzťah pro sílu ve tvaru

$$F = i^2 \ln \frac{2l (h + \sqrt{h^2 + (a/2)^2})}{a (h + \sqrt{h^2 + l^2})} \cdot 10^{-7}$$

Síla je zobrazena na Obr. 4.8  
[7]

#### 4.4.2 Dvojitý pravoúhlý záhyb

Tento typ záhybu se velmi často vyskytuje ve spínacích přístrojích nízkého i vysokého napětí.



Obr. 4.9: Složená pravoúhlá proudovodná dráha, směry a velikosti sil

Jak vyplývá z Obr.4.9, bude síla  $F$  superpozicí dvou sil, a to silou která působí od ramena 1 a silou která působí od ramena 2.

Pokud bude procházet proud o průběhu a velikosti

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t$$

Bude mít působící síla velikost podle

$$F = I^2 (1 - \cos 2\omega t) \ln \frac{2l (h + \sqrt{h^2 + (a/2)^2})}{a (h + \sqrt{h^2 + l^2})} \cdot 10^{-7}$$

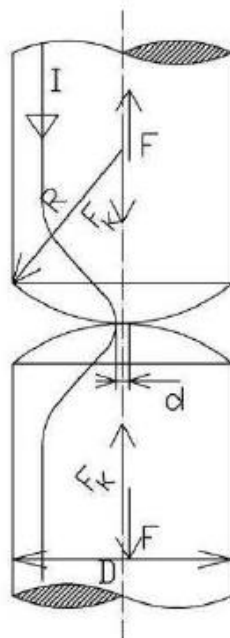
A její maximální hodnota bude

$$F_{max} = 2I^2 \ln \frac{2l (h + \sqrt{h^2 + (a/2)^2})}{a (h + \sqrt{h^2 + l^2})} \cdot 10^{-7}$$

[1]

## 4.5 Síly v kontaktní úžině

Každá změna průřezu vodiče je příčinou vzniku sil.



Obr. 4.10: Síly vznikající při změně průřezu [9]

Při dosednutí kontaktů jako na Obr. 4.10 na ně působí přítlačná síla pružiny  $F_p$ . Tato síla určuje kvalitu styku. Skutečný styk není realizován v celé ploše kontaktu, ale je omezen pouze na několika menších plochách, jak je to zobrazeno na Obr. 4.10. Tyto plochy jsou náhodně rozmístěny v oblasti styku a při každém sepnutí se jejich počet mění, hlavním faktorem určujícím jejich množství je tvrdost materiálu. Z tohoto důvodu je velmi obtížné vypočítat sílu  $F_{ku}$ , kterou na sebe kontakty působí. Musí se využívat empirické vztahy.

$$F_{ku} = I^2 \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-7}$$

Pokud nastane situace, že přítlačná síla  $F_p < F_{ku}$ , dojde k oddálení kontaktů. Mezi kontakty začne hořet elektrický oblouk, který generuje velké množství tepla. Tím dojde k natavení materiálu kontaktů. Při jejich opětovném styku tak může dojít k jejich svaření. Jestliže je síla vypínacího mechanismu natolik velké, že dokáže kontakty od sebe opět odtrhnout, dojde k jejich mechanické degradaci, což snižuje životnost celého přístroje. Ve skutečnosti odpudivá síla

dosahuje maxima právě při nejvyšším poruchovém proudu, tím také maximálně omezí přítlačnou sílu a vzroste stykový odpor, a i když se kontakty nerozpojí, jak je popsáno výše, nastane nepříznivý stav. [9] Ten bude mít za následek největší tepelné namáhání podle

$$P = R_s \cdot I^2$$

Kde  $R_s$  je stykový odpor kontaktů.

Na Obr.4.10 uvažujeme stykovou plošku  $d$  podle

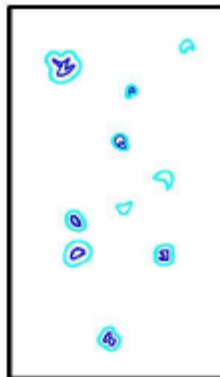
$$d = 2,22 \cdot \sqrt{\frac{F_p \cdot R}{E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_p}{\pi \cdot \xi \cdot H_B}}$$

Kde  $E$  je modul pružnosti v tahu

$\xi$  je činitel zohledňující vliv pružné deformace

$H_B$  je tvrdost materiálu podle Brinnela

Na kontaktech vzniká velké množství mikroskopických ploch, jako na Obr.4.11



Obr. 4.11: Skutečný kontakt [9]

jejichž celková plocha v  $\text{mm}^2$  se vypočítá podle

$$s = \frac{F_p}{\xi \cdot H_B}$$

## 5 KOMPAKTNÍ JISTIČ MODEION BC160 FIRMY OEZ

Má práce se zabývá silami v kontaktním ústrojí jističe Modeion BC160, která je na Obr. 3.1



Obr. 5.1: Jistič Modeion BC160 firmy OEZ

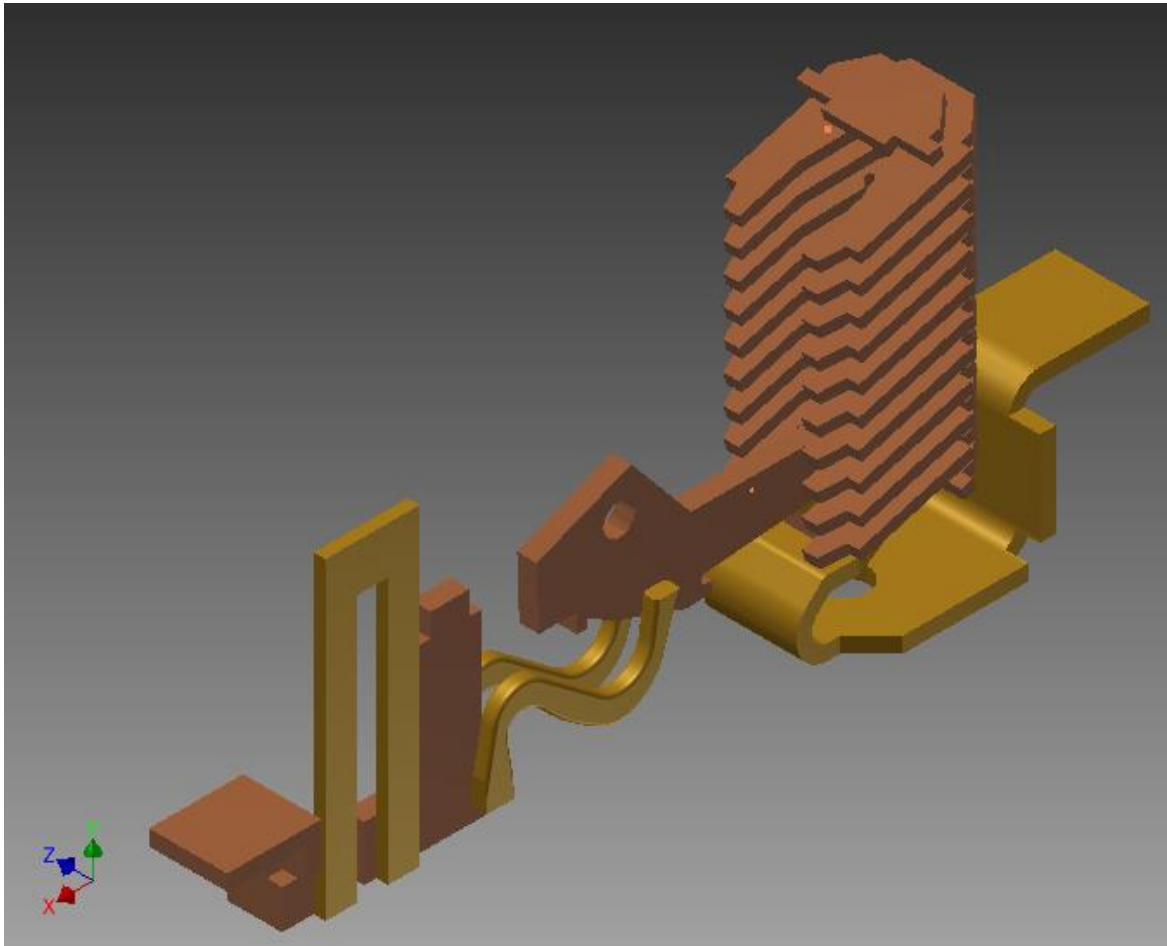
Jeho parametry jsou v Tab. 5.1

Tab. 5.1: parametry jističe BC160 Fy OEZ

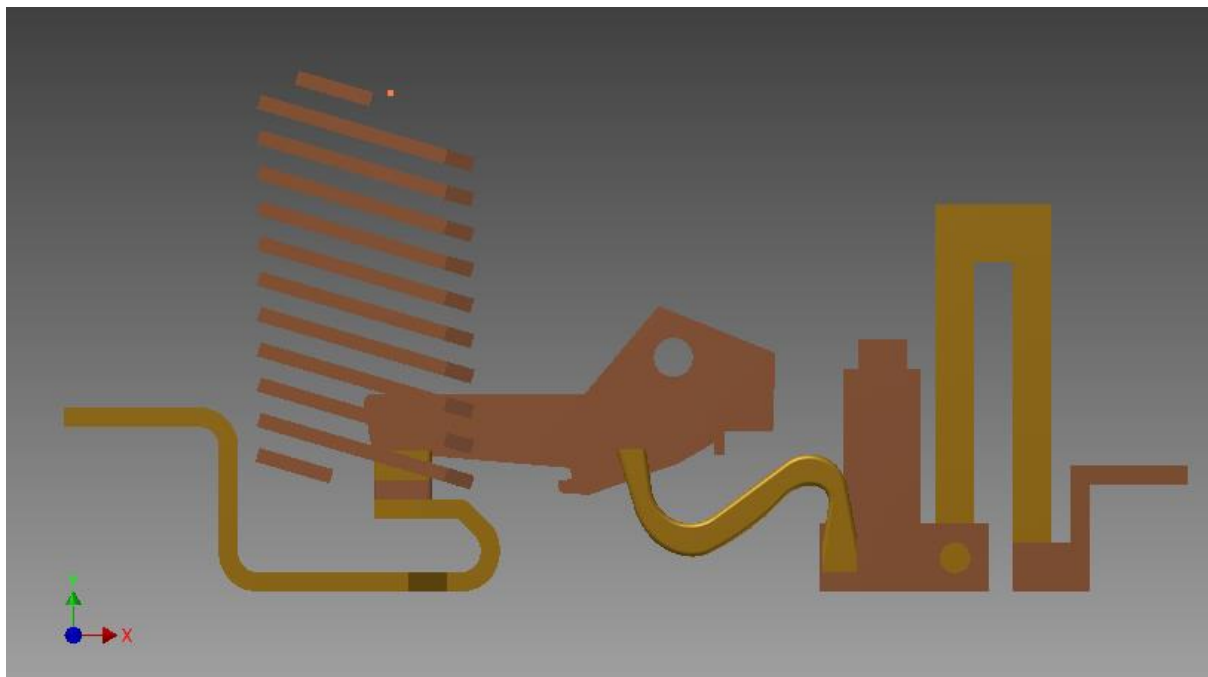
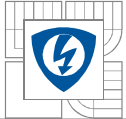
Jmenovitý proud	<b>16 A-160 A</b>
Jmenovité pracovní napětí	<b>max. 690 V a.c.</b>
Jmenovitý kmitočet	<b>50-60 Hz</b>
Kategorie užití (režim spínání) / 690 V a.c.	<b>AC-3</b>
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost / 230 V	<b>40 kA</b>
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost / 400 V	<b>25 kA</b>
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost / 500 V	<b>12 kA</b>
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost / 690 V	<b>6 kA</b>
Jmenovitá zkratová zapínací schopnost / 415 V a.c.	<b>52 kA</b>







Obr. 5.3: Zjednodušený model jističe BC160 fy O EZ

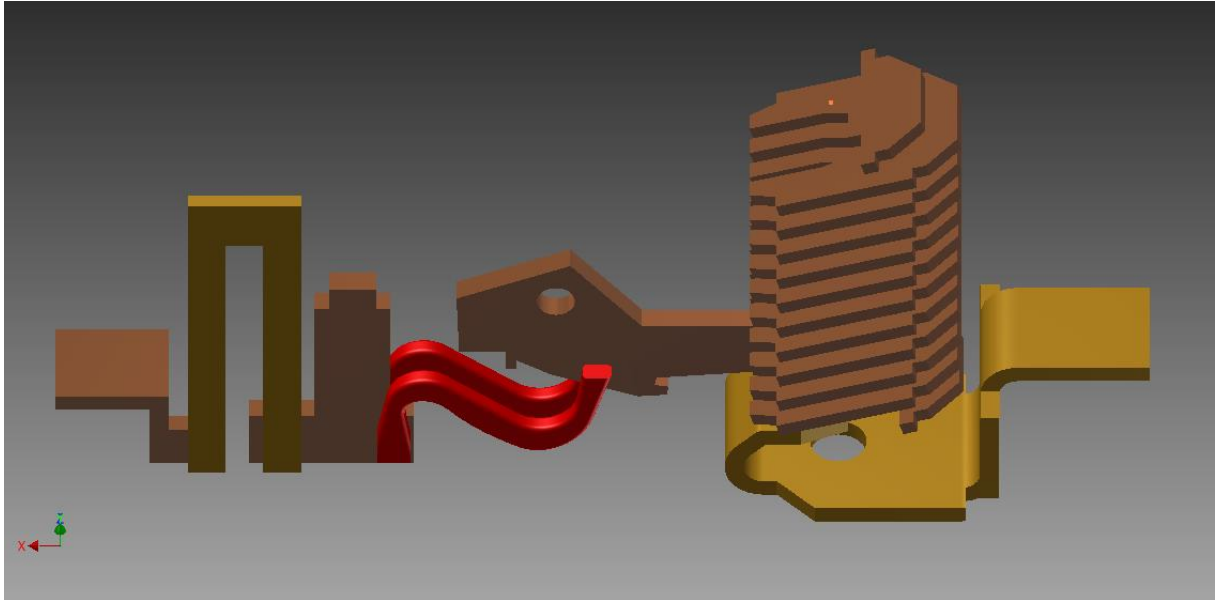


Obr. 5.4: Zjednodušený model jističe BC160 fy OEZ

Zjednodušení je nejvíce patrné v těchto případech:

(na obrázcích je změněná část vyznačena červeně)

- náhrada propojení pohyblivé části s pevnou částí pomocí plného vodiče, Obr. 5.5, originál je propojen spleteným vodičem (Flexopass) jako na Obr. 5.6

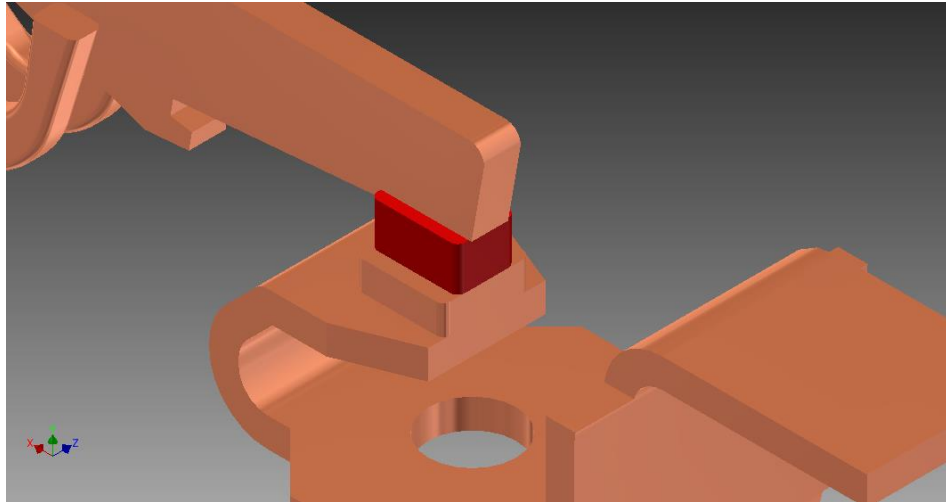


Obr. 5.5: náhrada spleteného Cu vodiče plným vodičem



Obr. 5.6: Flexopass

- plochý styk kontaktů, Obr. 5.6, detail na Obr. 5.7 (ve skutečnosti se jedná o styk přímkový nebo bodový)



Obr. 5.6: Náhrada kontaktu s přímkovým nebo bodovým stykem za plošný styk



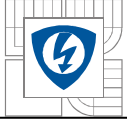
Obr. 5.7: Detail plošného styku

- nezaoblení hran
- rovná připojovací svorka – originál má třmenovou připojovací svorku

Na Obr. 5.7 je vidět, že kontakt (červená barva) má obdélníkový tvar – dokonalý styk. Ve skutečnosti je však tento styk přímkový nebo bodový. Viz. Kapitola 4.5

Na výpočet má největší vliv zjednodušení kontaktu. Proud tudíž prochází celou plochou kontaktu a proto podle vzorce

$$F_{ku} = I^2 \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-7}$$



je odpuzivá síla působící na kontakt nulová – nedošlo k zúžení prodovodné dráhy. Neuvažuji při tom zúžení v rámci pohyblivého nebo pevného kontaktu, pouze mezi pohyblivým a pevným kontaktem

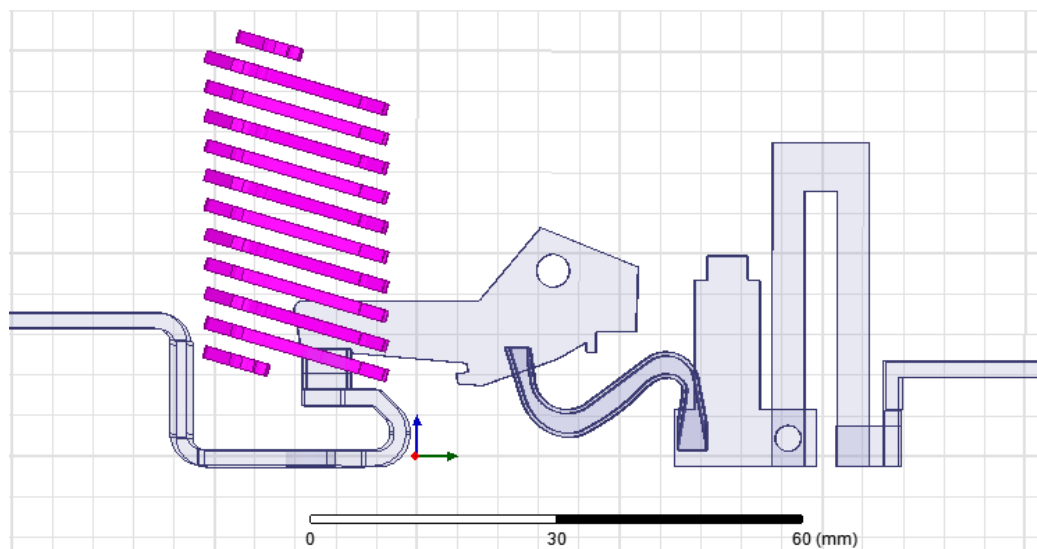
## 6 VÝPOČET SIL V PROGRAMU MAXWELL

Po vytvoření zjednodušeného modelu jak jednopólového tak i trojpólového modelu jsem provedl výpočet sil v programu Maxwell. Pro oba modely jsem počítal síly a moment, který působí na pohyblivý kontakt při průchodu proudů o velikostech 5kA, 10 kA 15 kA, 20 kA a 25 kA. Nejprve jsem vypočítal síly při průchodu stejnosměrného proudu. Ukázka výsledných sil pro proud 20 kA je v tabulce v kapitole 7. Veškeré výsledky jsou kvůli jejich velkému množství v příloze této práce. Poté jsem provedl výpočet sil a momentů při průchodu střídavých proudů a nakonec při průchodu střídavých proudů s exponenciálně klesající složkou – simulace zkratu.

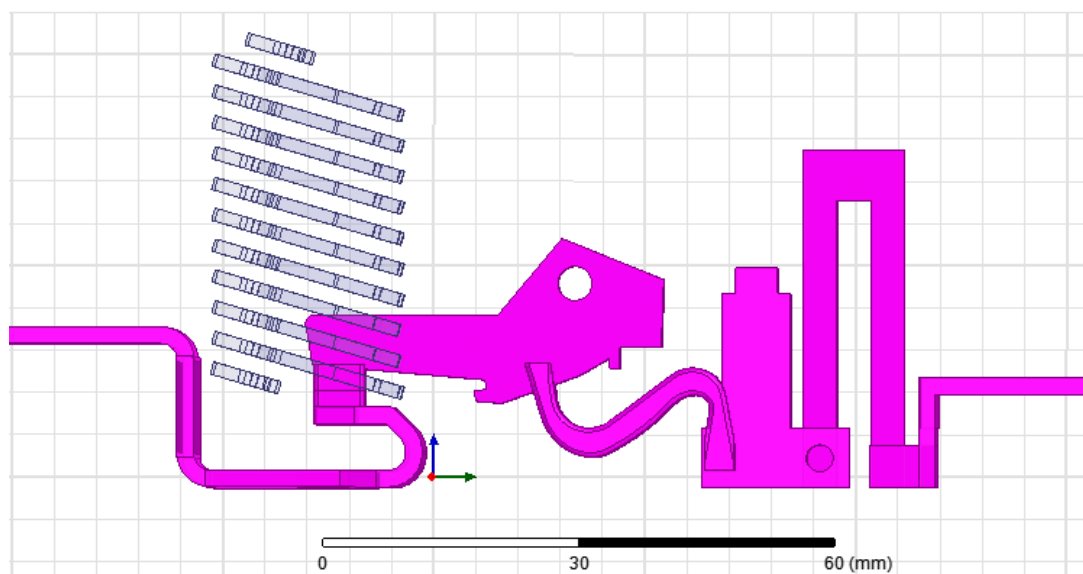
### 6.1 Přiřazení materiálů

Pro lepší orientaci je zde zobrazen pouze jednopólový model.

Nejprve jsem přiřadil jednotlivým komponentům materiály Viz Obr.6.1 a 6.2



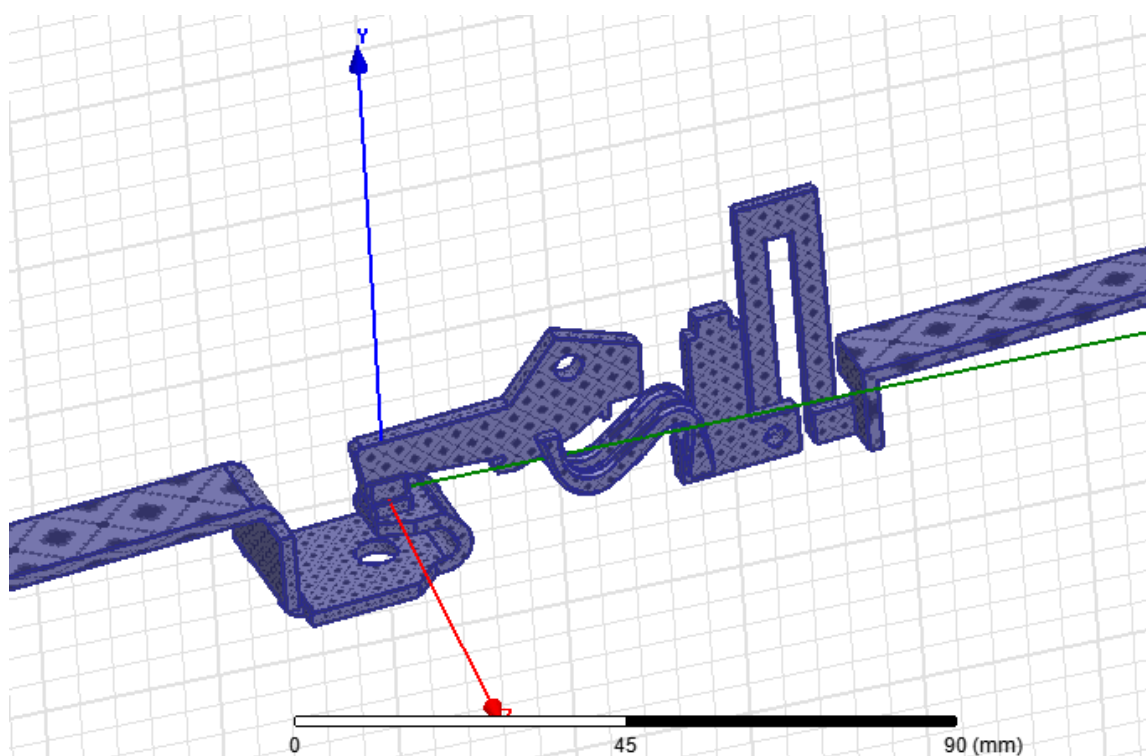
Obr.6.1: Přiřazení materiálu pro zhášecí komoru – ocel



Obr.6.2: Přiřazení materiálu pro proudovodnou dráhu – měď

Celá proudovodná dráha je tvořena mědí, zhášecí komora je tvořena ocelí (v Maxwell steel\_1010). Okolní prostředí je vzduch.

Na Obr. 6.3 je zobrazena proudovodná dráha

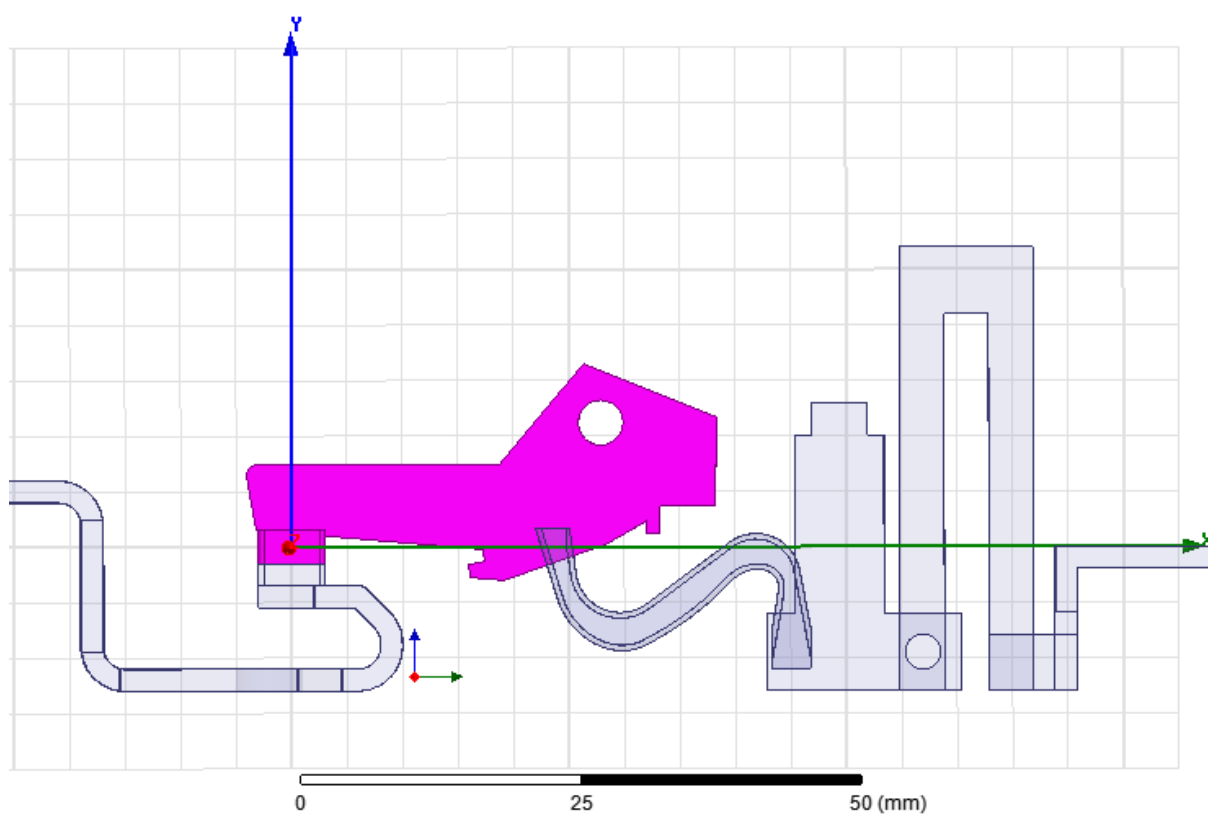


Obr. 6.3 Proudovodná dráha

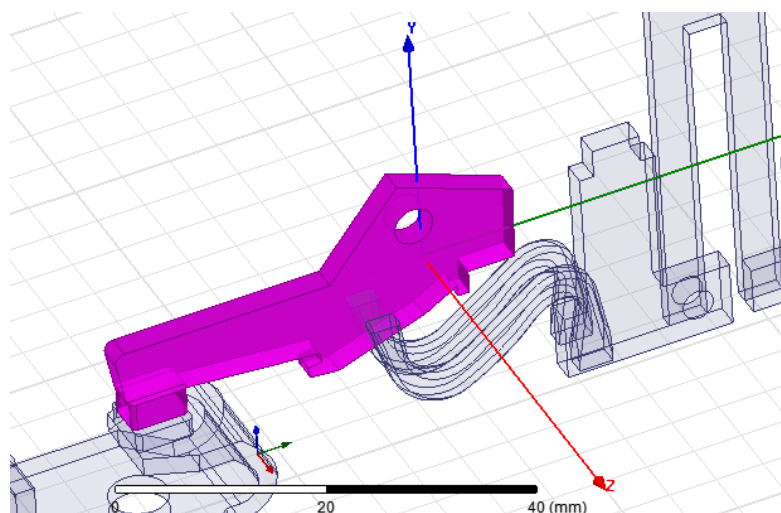


## 6.2 Přiřazení komponent pro výpočet

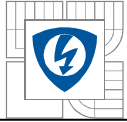
Po přiřazení materiálu jsem vybral prvky na kterých chci provést výpočet, viz. Obr. 6.4 a Obr. 6.5



Obr. 6.4: Prvky, na kterých budou prováděny výpočty síly



Obr. 6.5: vytvoření nového souřadného systému pro výpočet momentu



Pro lepší přehlednost jsem odstranil zhášecí komoru.

## 6.3 Nastavení proudu

Dále jsem nastavil proud, který prochází celou proudovodnou dráhou, Obr. 6.3. Přívodní svorky jsou prodlouženy, aby nedocházelo k ovlivnění výpočtů. Vstup i výstup proudu je na koncích svorek.

### 6.3.1 Nastavení stejnosměrného proudu

Pro analýzu pomocí stejnosměrného proudu se používá magnetostatická analýza. Nejprve jsem vybral plochu, kterou má vcházet, resp. vycházet proud. Poté v Project manager – Excitation - Assign – Current jsem zadal hodnotu proudu. Při zadávání proudu, který vychází z modelu jsem pro změnu směru proudu použil Swap Directin.

### 6.3.2 Nastavení střídavého proudu

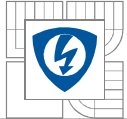
Pro analýzu pomocí střídavého proudu se používá tranzientní analýza. Nejprve musíme zkopírovat projek pro výpočet magnetostatické síly. Poté změním typ řešení na tranzientní analýzu. Protože jsme tranzientní typ vytvořili kopií již hotového magnetostatického typu, máme již nastavené materiály prvků, síly a momenty které chceme počítat. Musíme však nastavit střídavý proud.

V Project manager – Excitation - pomocí Add Winding přidáme vinutí. Nastavíme parametry vinutí, jako je jméno vinutí (pro lepší orientaci nazveme L1) a poté nastavíme velikost proudu procházejícího vinutím, např.  $10000 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time})$  – nastavení efektivní hodnoty proudu. Pro druhé a třetí vinutí připočítáme fázový posuv mezi jednotlivými proudy. Do vinutí L1, L2 a L3 musíme přiřadit příslušné proudy. To provedeme v Project manager – Excitation výberem příslušného proudu (Current). Jednotlivé proudy přiřadíme pravým tlačítkem a zvolením Add to Winding a následným výběrem vinutí.

### 6.3.3 Nastavení exponenciálně klesajícího proudu

Tato analýza se používá, jako simulace zkratu. Zkrat má exponenciálně klesající průběh. Nastavení proudu se provádí podobně jako nastavení proudu střídavého, musí se ovšem započítat exponenciální složka. V našem případě je takový průběh proudu zapsán např. takto:

$$15000 \cdot \sqrt{2} \cdot (\sin(2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot \text{TIME} + (2/3) \cdot 3.14) - \sin((2/3) \cdot 3.14) \cdot \exp(-\text{TIME}/0.01))$$



## 6.4 Nastavení parametrů analýzy

### 6.4.1 Nastavení analýzy při průchodu stejnosměrného proudu

V Project manager – Analysis – Add Solution Setup nastavíme parametry analýzy.

V kartě General:

Maximum Number of Passes	12
Percent Error	1
Vybráno Afrel last pass	

V kartě Convergence:

Refinement Per Pass	30%
Minimum Number of Passes	5
Minimum Converged Passes	3

V kartě Solver:

Nonlinear Residual	0,001
Vybráno Enable Iterative Solve	
Relative Residual	1e-006
Vybráno Nonlinear B-H curve	
Vybráno Nonlinear B-H curve	

### 6.4.2 Nastavení analýzy při průchodu střídavého proudu

v Project manager – Analysis – Add Solution Setup nastavíme parametry analýzy.

V kartě General:

Stop time	0.02 s
Time step	0.001 s
Vybráno Afrel last pass	

V kartě Save Fields

Type	Linear Step
Start	0 s



Stop 0.02 s

Step size 0.001 s

Pomocí tlačítka Add to List zvolíme časy, ve kterých se má provádět výpočet

V kartě Advanced:

Nonlinear B-H curve

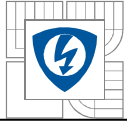
Zvolíme Import mesh – zvolíme síť, která se vytvořila při výpočtu magnetostatické analýzy.

V kartě Solver:

Nonlinear Residual 0,01

### 6.4.3 Nastavení analýzy při průchodu exponenciálně klesajícího proudu

Při této analýze ponecháme nastavení výpočtů stejné jako při průchodu sinusového proudu.



## 7 VÝSLEDKY

### 7.1 Magnetostatická analýza

#### 7.1.1 Výsledky pro jednopólový model

V Tabulka 7.1 jsou hodnoty pro magnetostatickou analýzu pro proudy 5 kA, 10 kA, 15 kA, 20 kA a 25 kA. Hodnoty sil  $F_x$  a  $F_y$  jsou přepočteny z momentu  $M$  a to podle vztahu:

$$F = \frac{M}{l}$$

Kde  $F$  je celková síla působící na kontakt ve směru osy  $x$ - $y$

$M$  je vypočtený moment

$l$  je délka ramene, na který působí moment, v našem případě je délka 25,5 mm

Výsledná síla  $F$  se rozloží na síly působící ve směru osy  $x$  na  $F_x$  a působící ve směru osy  $y$  na  $F_y$ :

$$F_x = \sin \alpha \cdot F$$

$$F_y = \cos \alpha \cdot F$$

Síla v kontaktní úžině se vypočítá ze vzorce

$$F_u = I^2 \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-7}$$

Kde  $D$  se vypočte z geometrických rozměrů kontaktu

$$D = \sqrt{a \cdot b}$$

Po dosazení

$$D = \sqrt{0,006 \cdot 0,003} = 4,243 \cdot 10^{-3} m$$

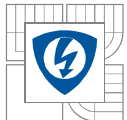
$d$  se vypočte ze vzorce

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_p}{\pi \cdot H_B}}$$

Kde  $F_p$  je síla která působí na kontakt

$H_B$  je tvrdost podle Brinella

Po dosazení



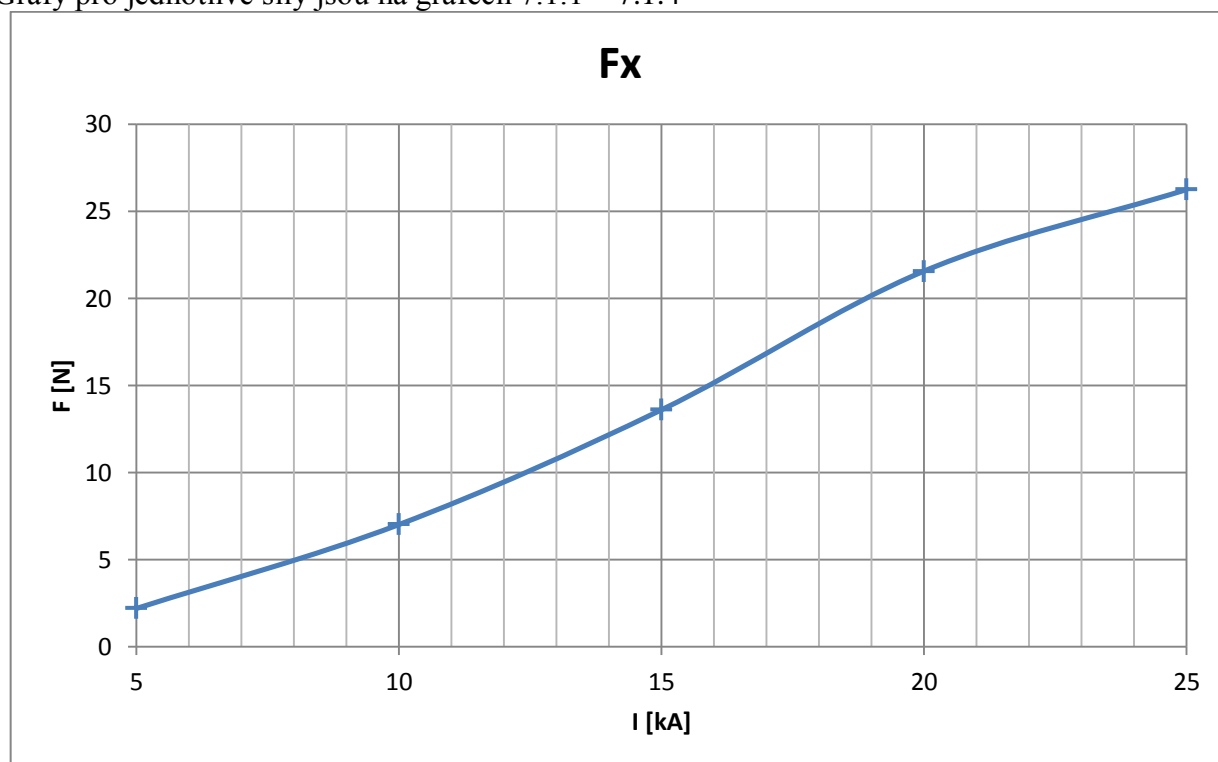
$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,5}{\pi \cdot 410}} = 0,142$$

Výsledné síly pro jednopólový model jsou v Tab. 7.1.1

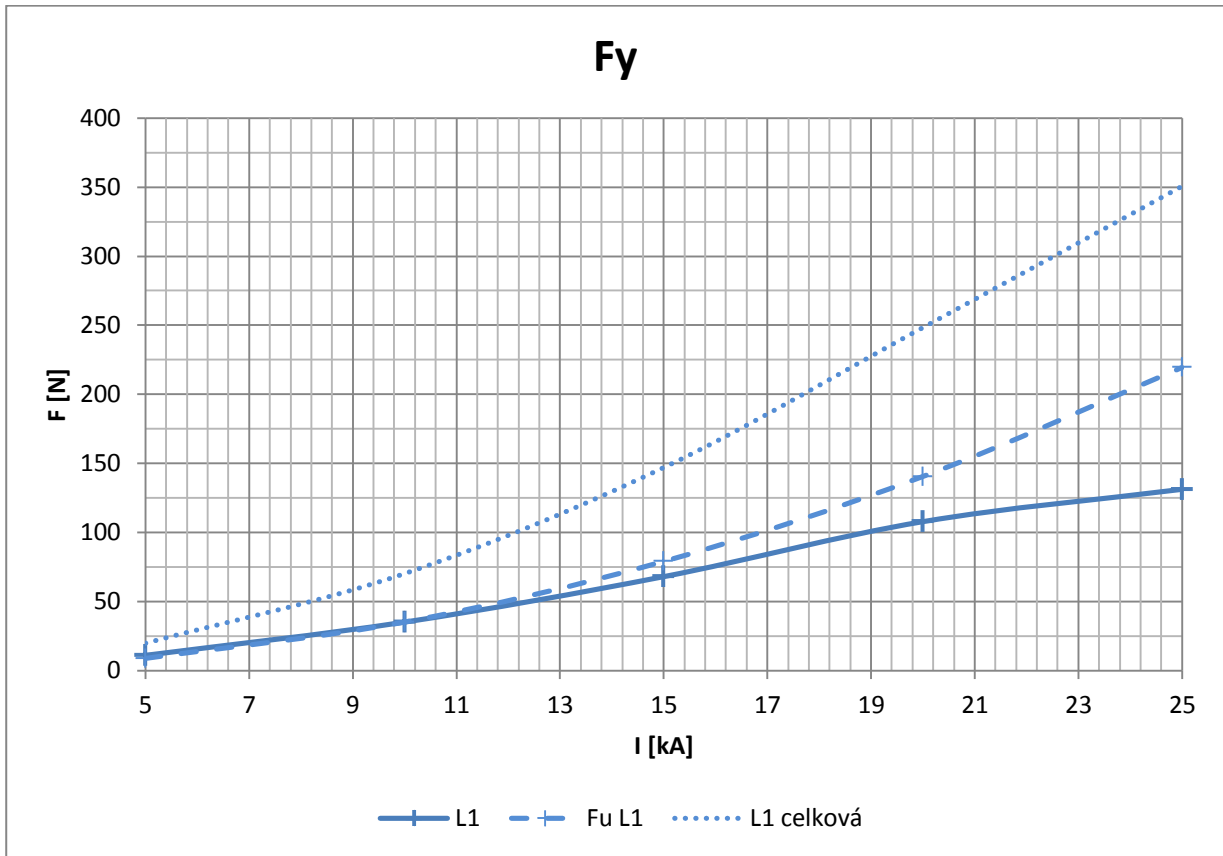
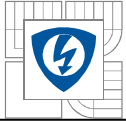
Tab. 7.1.1: Výsledky magnetostatické analýzy pro jednopólový model

<b>I 5kA</b>				
	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	M [Nm]
L1	2,196514	10,9825	-0,00315	-0,2856
<b>I 10kA</b>				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	7,01177	35,05863	0,016157	-0,9117
<b>I 15kA</b>				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	13,5967	67,98307	0,08796	-1,7679
<b>I 20kA</b>				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	21,55829	107,7908	0,083373	-2,8031
<b>I 25kA</b>				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	26,23896	131,194	0,17773	-3,4117

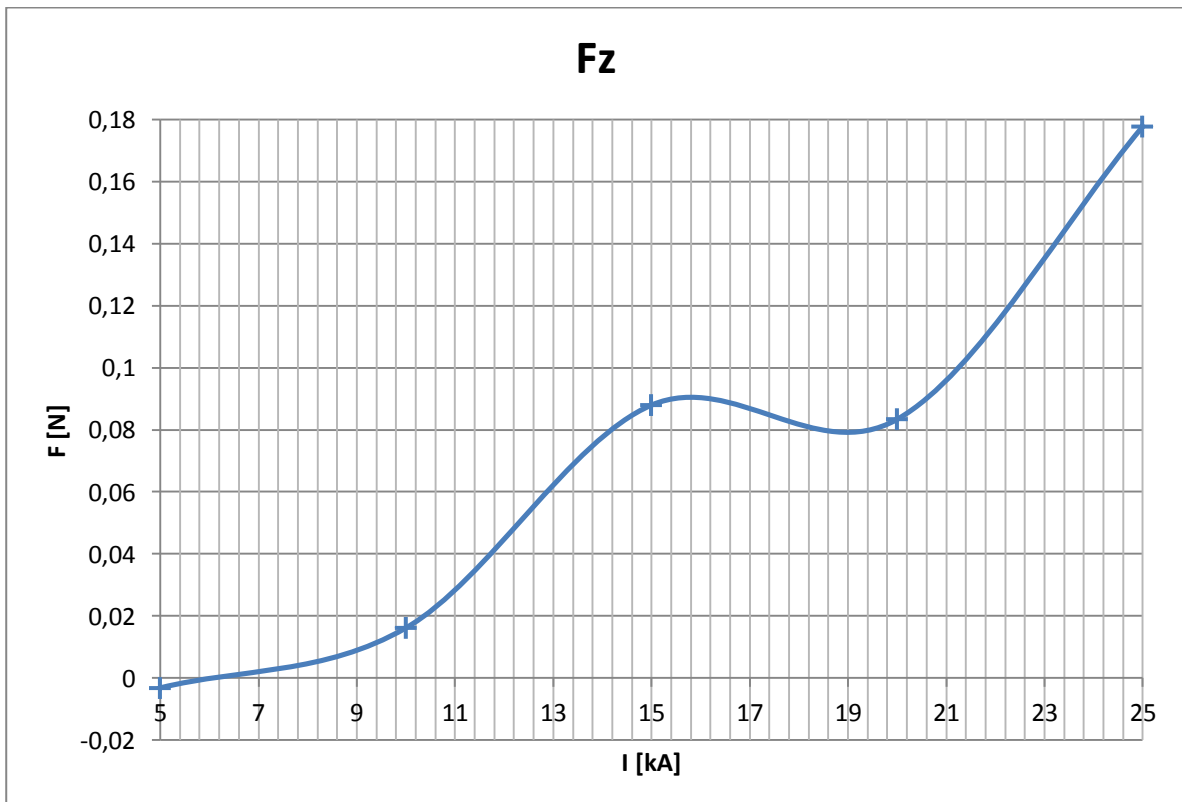
Grafy pro jednotlivé síly jsou na grafech 7.1.1 – 7.1.4



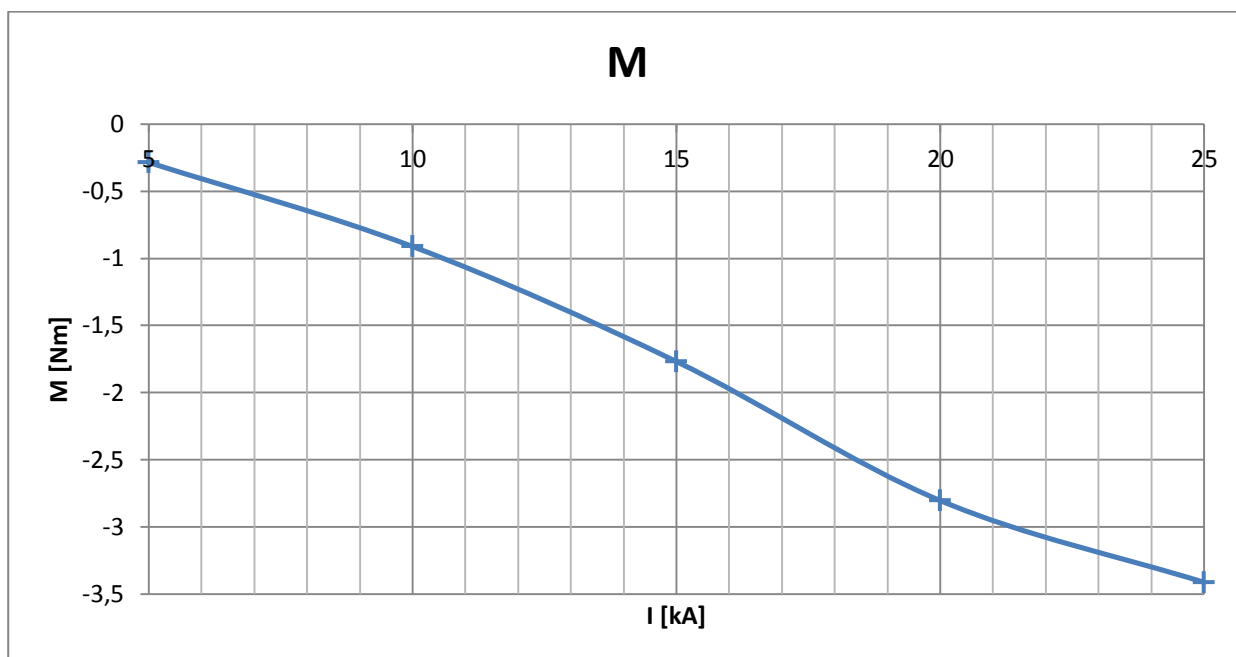
Graf 7.1.1: průběh síly Fx



Graf 7.1.2: průběhy sil F<sub>y</sub>



Graf 7.1.3: průběhy sil F<sub>z</sub>



Graf 7.1.4: průběhy momentu působící na kontakt

## 7.1.2 Výsledky pro třípólový model

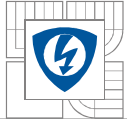
Hodnoty sil  $F_x$  a  $F_y$  jsou jako v předchozím případě přepočteny z momentu působícího na rameno kontaktu.

Výsledné síly pro třípólový model jsou v Tab. 7.1.2

Tab. 7.1.2: Výsledky magnetostatické analýzy pro třípólový model

I 5kA				
	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	M [Nm]
L1	2,00801	10,03999	6,4382	-0,26109
L2	1,90203	9,510092	-0,0069	-0,24731
L3	2,007933	10,03961	-6,3875	-0,26108
I 10kA				
	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	M [Nm]
L1	6,077559	30,38761	26,472	-0,79023
L2	5,604878	28,02422	0,04737	-0,72877
L3	6,081405	30,40684	-26,392	-0,79073
I 15kA				
	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	M [Nm]
L1	11,40249	57,0121	59,984	-1,4826
L2	10,31808	51,59007	0,2483	-1,3416
L3	11,3948	56,97365	-59,883	-1,4816





<b>I</b>				
<b>20kA</b>				
	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	M [Nm]
L1	18,78573	93,92807	106,81	-2,4426
L2	16,82609	84,12996	0,039063	-2,1878
L3	18,76266	93,81271	-106,45	-2,4396
<b>I</b>				
<b>25kA</b>				
	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	M [Nm]
L1	21,08761	105,4374	168,69	-2,7419
L2	18,74651	93,73195	0,35969	-2,4375
L3	21,07223	105,3605	-168,18	-2,7399

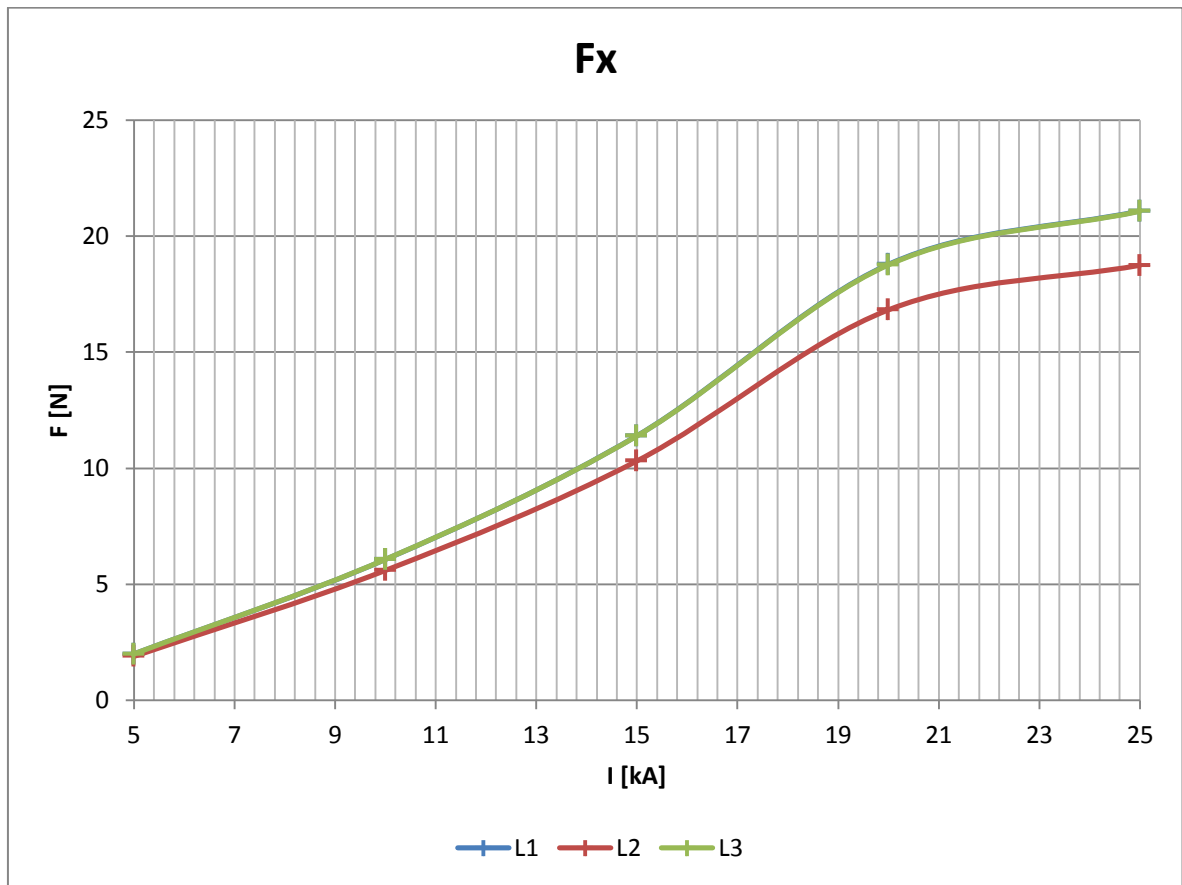
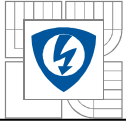
Celková síla  $F_y$  (L1 celková, L2 celková, L3 celková) se skládá ze síly vypočtené z momentu (L1, L2, L3) a síly v kontaktní úžině ( $F_u$ ). Hodnoty jsou v tabulce 7.1.3

Tab. 7.1.3: Výsledné hodnoty pro sílu ve směru osy y

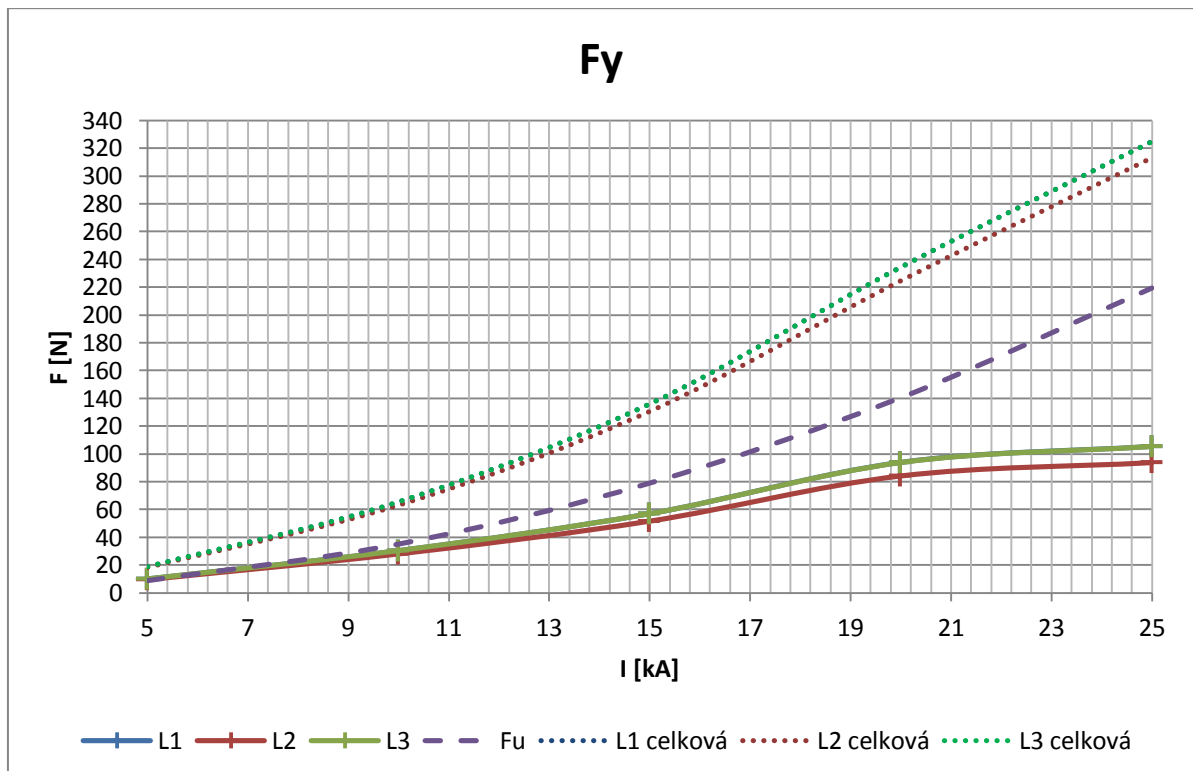
I [kA]	5	10	15	20	25
	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]
L1	10,03999	30,38761	57,0121	93,92807	105,4374
L2	9,510092	28,02422	51,59007	84,12996	93,73195
L3	10,03961	30,40684	56,97365	93,81271	105,3605
F <sub>u</sub>	8,78	35,11	79	140,5	219,4
L1 celková	18,81999	65,49761	136,0121	234,4281	324,8374
L2 celková	18,29009	63,13422	130,5901	224,63	313,132
L3 celková	18,81961	65,51684	135,9736	234,3127	324,7605

Grafy pro jednotlivé síly jsou na grafech 7.1.5 – 7.1.8

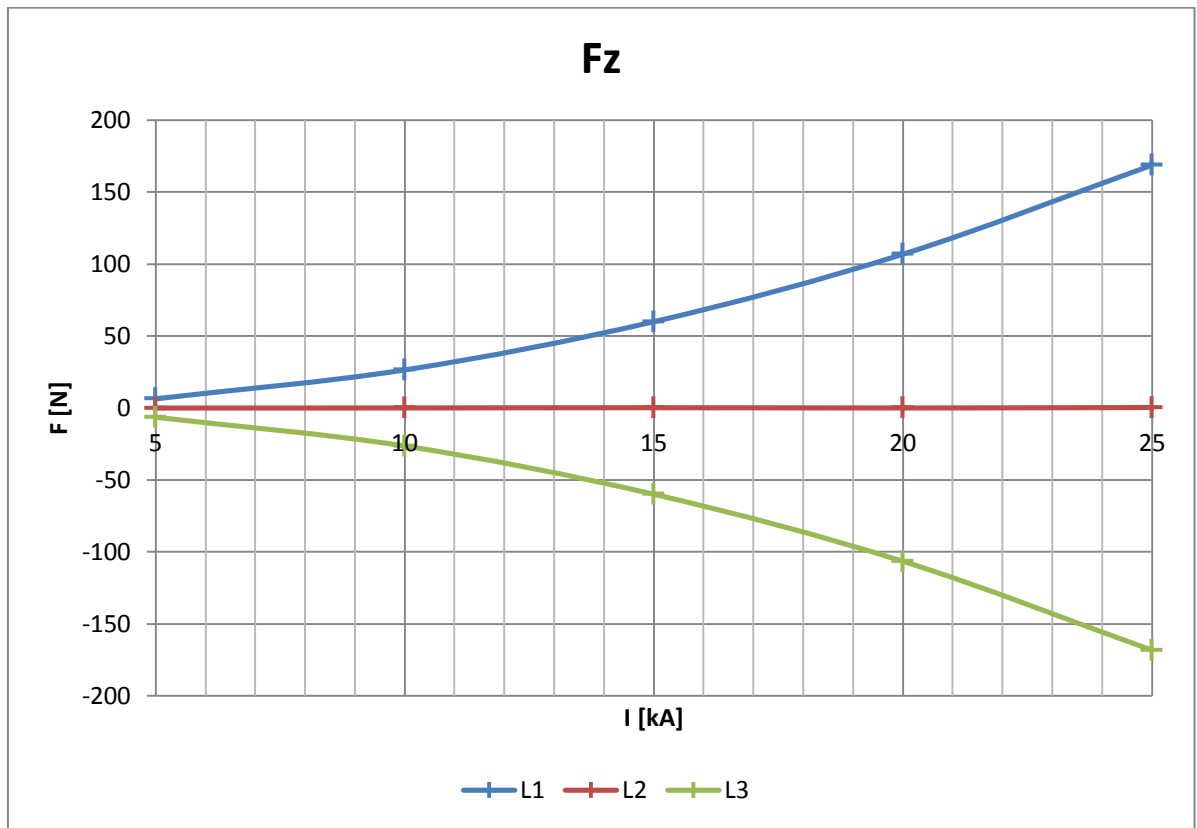
Na grafech pro sílu  $F_x$ ,  $F_y$  a moment  $M$  mají hodnoty pro L1 a L3 téměř stejné hodnoty, z toho důvodu na grafech splývají.



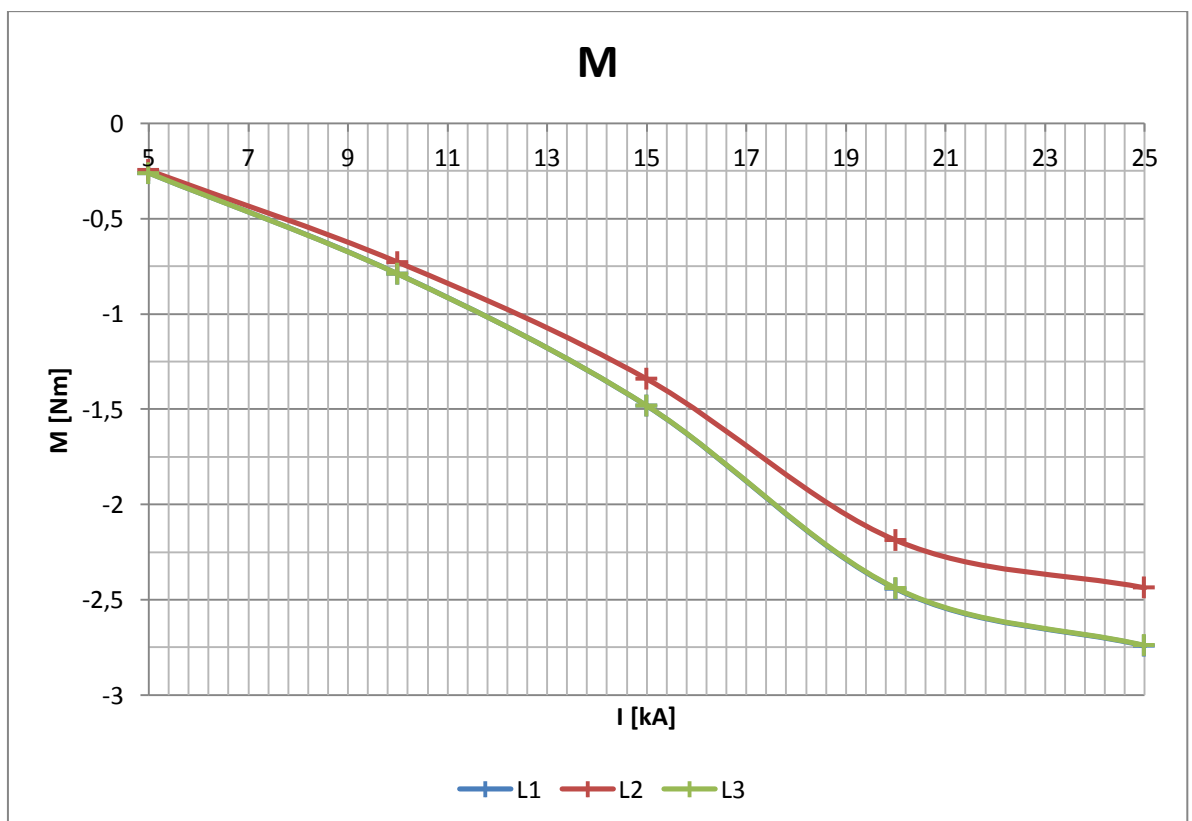
Graf 7.1.5: průběhy sil F<sub>x</sub>



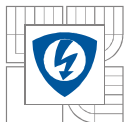
Graf 7.1.6: průběhy sil F<sub>y</sub>



Graf 7.1.7: průběhy sil Fz



Graf 7.1.8: průběhy momentů působících na kontakty



## 7.2 Tranzientní analýza

### 7.2.1 Jednopolový model

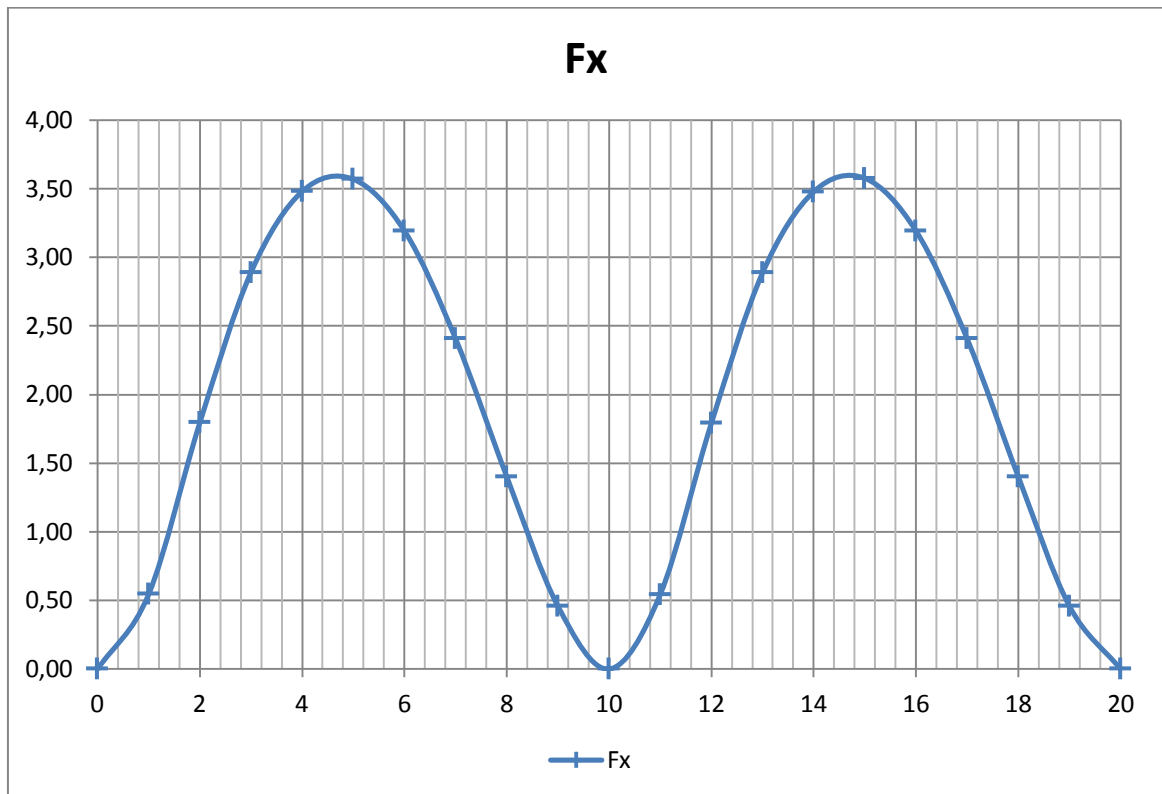
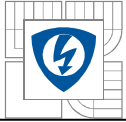
Hodnoty pro tranzientní analýzu pro střídavý proud 5 kA je v Tab. 7.2.1.

Síla  $F_u$  v kontaktní úžině se vypočítá stejně jako při magnetostatické analýze.  $F_y$  celková je součtem sil  $F_y$  a  $F_u$ .

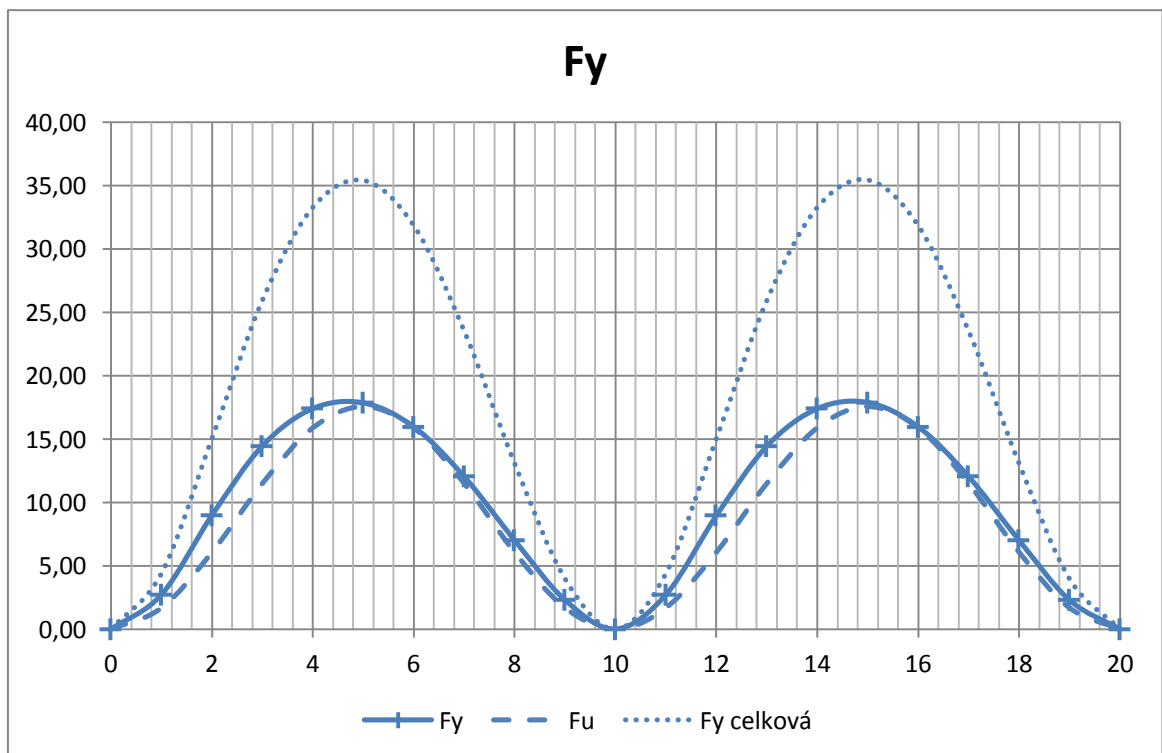
Tab. 7.2.1: Hodnoty pro proud 5 kA

$I$	5,00	kA				
$t$	$F_x$	$F_y$	$F_u$	$F_y$ celková	$F_z$	$M$
ms	N	N	N	N	N	Nm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
1	0,55	2,73	1,68	4,40	-0,30	-0,071
2	1,80	8,98	6,07	15,05	-1,03	-0,2335
3	2,89	14,45	11,49	25,94	-1,88	-0,3759
4	3,48	17,40	15,88	33,28	-2,54	-0,4525
5	3,57	17,84	17,56	35,40	-2,83	-0,464
6	3,19	15,96	15,88	31,84	-2,58	-0,4151
7	2,41	12,03	11,49	23,52	-1,88	-0,3129
8	1,40	7,01	6,07	13,07	-1,00	-0,1822
9	0,46	2,29	1,68	3,97	-0,28	-0,0595
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
11	0,54	2,72	1,68	4,40	-0,30	-0,0707
12	1,79	8,96	6,07	15,02	-1,03	-0,233
13	2,89	14,43	11,49	25,92	-1,87	-0,3753
14	3,48	17,39	15,88	33,27	-2,54	-0,4522
15	3,58	17,88	17,56	35,43	-2,83	-0,4649
16	3,19	15,96	15,88	31,84	-2,58	-0,415
17	2,41	12,03	11,49	23,52	-1,88	-0,3129
18	1,40	7,01	6,07	13,07	-1,00	-0,1822
19	0,46	2,29	1,68	3,97	-0,28	-0,0595
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0

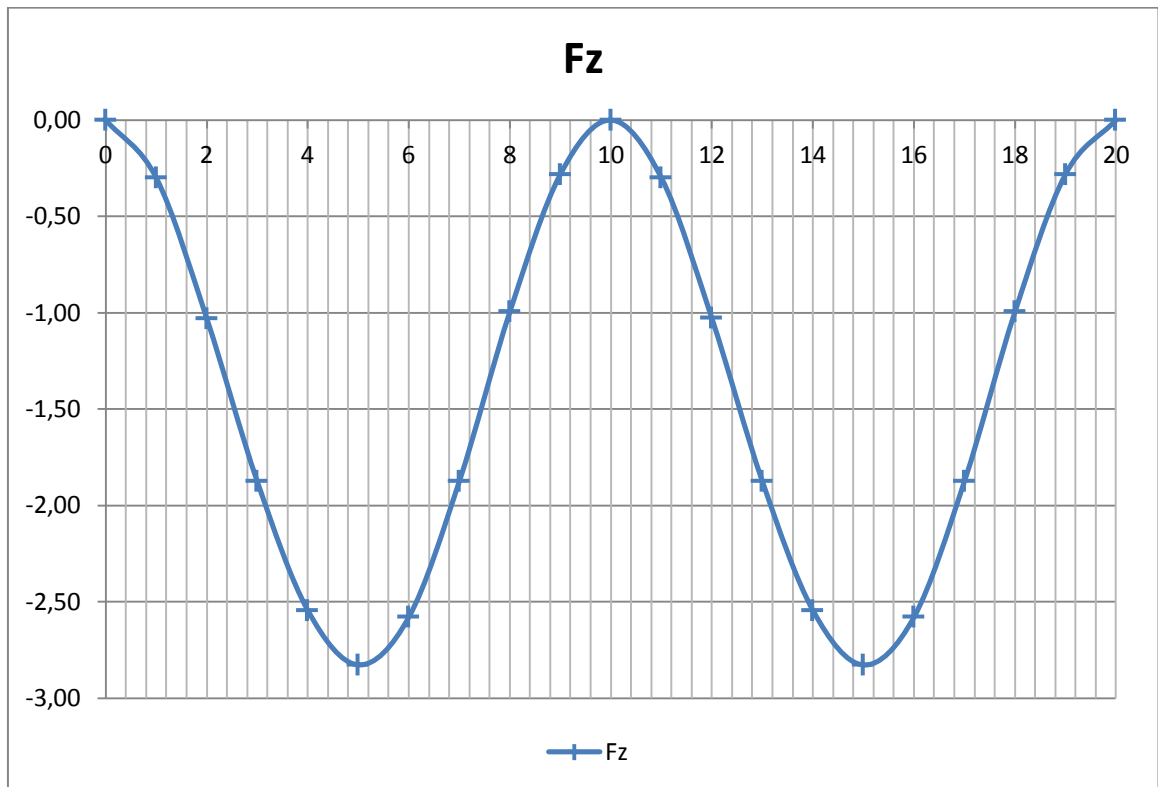
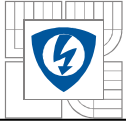
Průběhy jednotlivých sil jsou na grafech 7.2.1 – 7.2.4



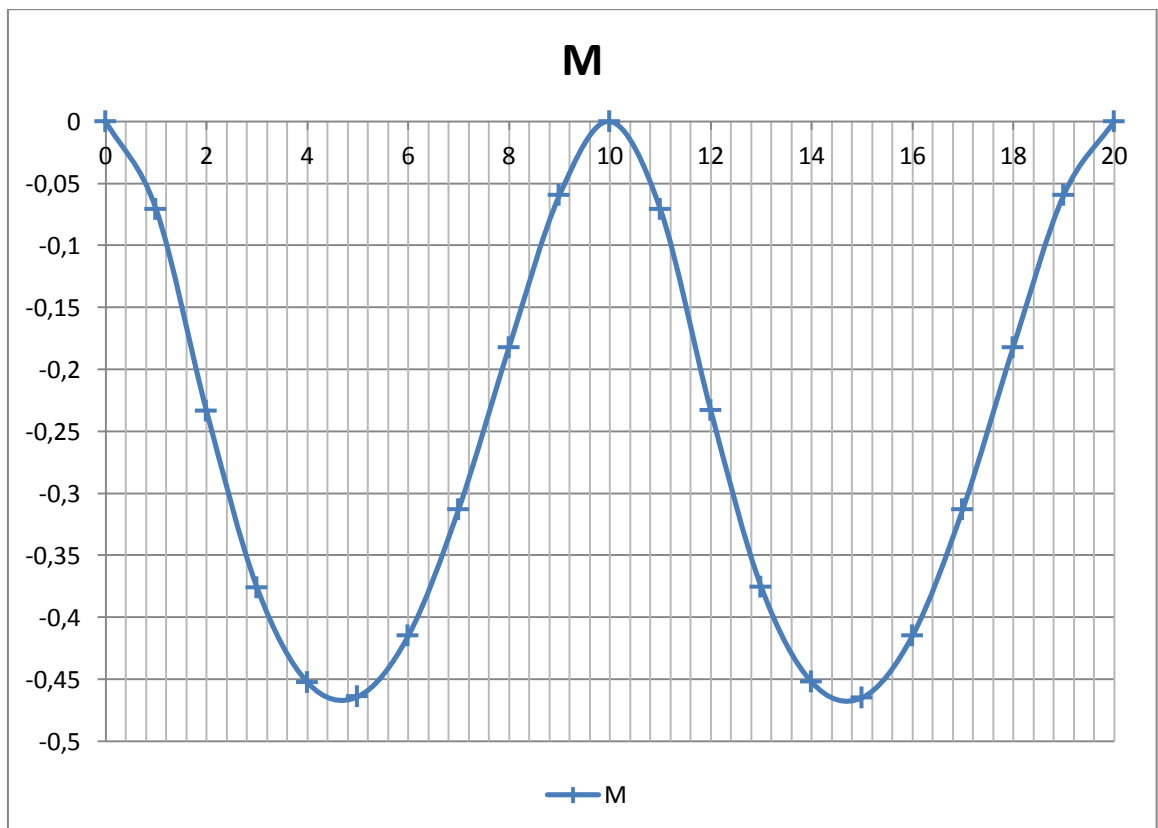
Graf 7.2.1: Průběh síly Fx



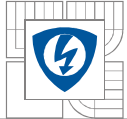
Graf 7.2.2: Průběhy sil Fy



Graf 7.2.3: Průběh síly Fz



Graf 7.2.4: Průběh momentu

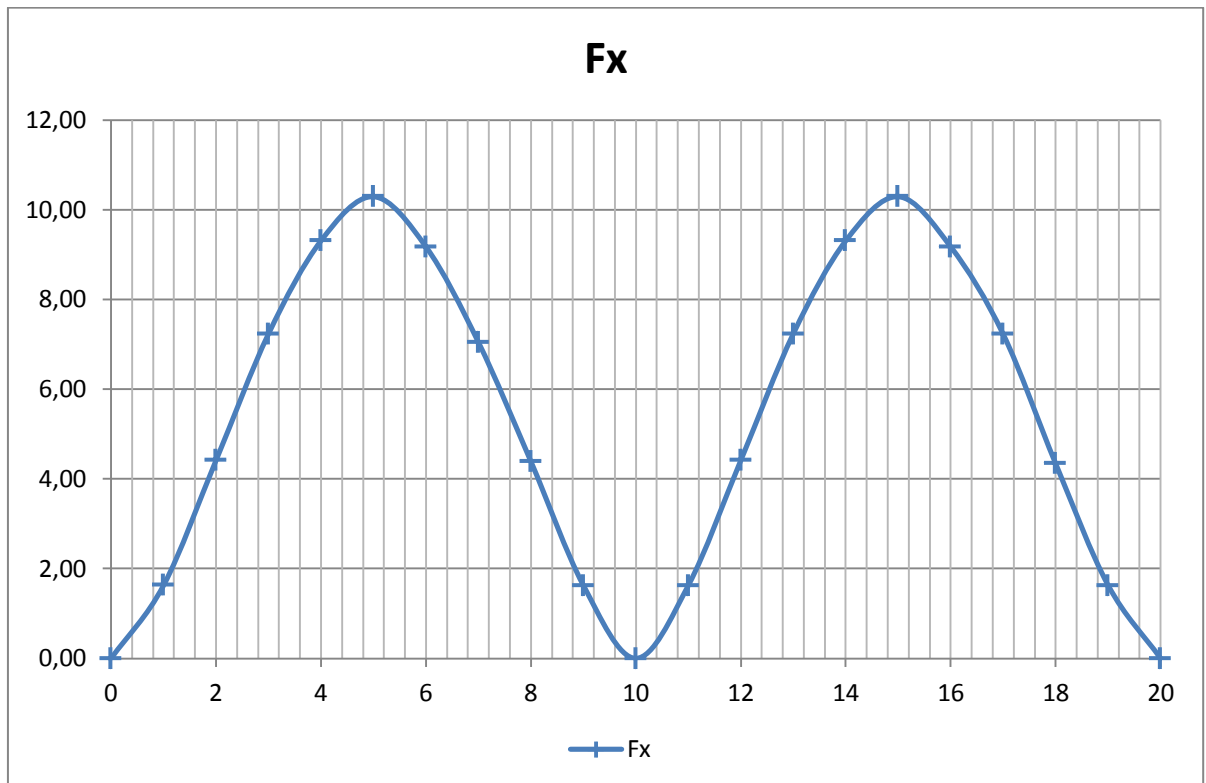
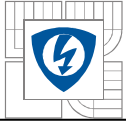


Hodnoty pro tranzientní analýzu pro střídavý proud 10 kA je v Tab. 7.2.2

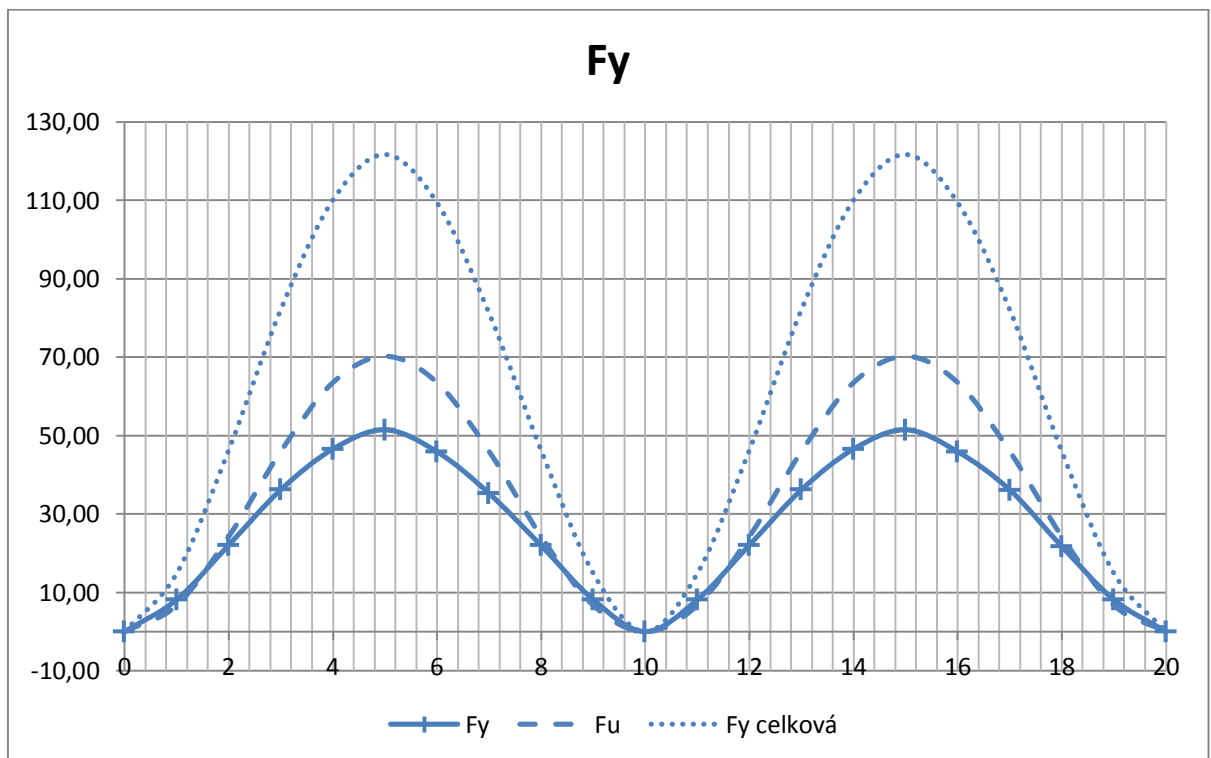
Tab. 7.2.2: Hodnoty pro proud 10 kA

I	10,00	kA				
t	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>u</sub>	F <sub>y</sub> celková	F <sub>z</sub>	M
ms	N	N	N	N	N	Nm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
1	1,63	8,14	6,71	14,85	-1,09	-0,2118
2	4,42	22,07	24,26	46,34	-3,97	-0,5741
3	7,24	36,18	45,96	82,14	-7,54	-0,9409
4	9,31	46,55	63,52	110,07	-10,45	-1,2105
5	10,29	51,46	70,22	121,68	-11,56	-1,3382
6	9,18	45,88	63,52	109,40	-10,46	-1,1931
7	7,05	35,24	45,96	81,20	-7,56	-0,9163
8	4,39	21,95	24,26	46,21	-3,97	-0,5707
9	1,63	8,14	6,71	14,84	-1,10	-0,2117
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
11	1,63	8,14	6,71	14,85	-1,10	-0,2117
12	4,41	22,07	24,26	46,34	-3,97	-0,5741
13	7,24	36,18	45,96	82,14	-7,54	-0,9409
14	9,31	46,55	63,52	110,07	-10,45	-1,2105
15	10,29	51,46	70,22	121,68	-11,56	-1,3382
16	9,18	45,88	63,52	109,40	-10,46	-1,1931
17	7,23	36,13	45,96	82,09	-7,55	-0,9396
18	4,34	21,71	24,26	45,97	-3,97	-0,5645
19	1,63	8,14	6,71	14,85	-1,10	-0,2117
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0

Průběhy sil a momentů pro proud 10 kA jsou na grafech 7.2.5 – 7.2.8

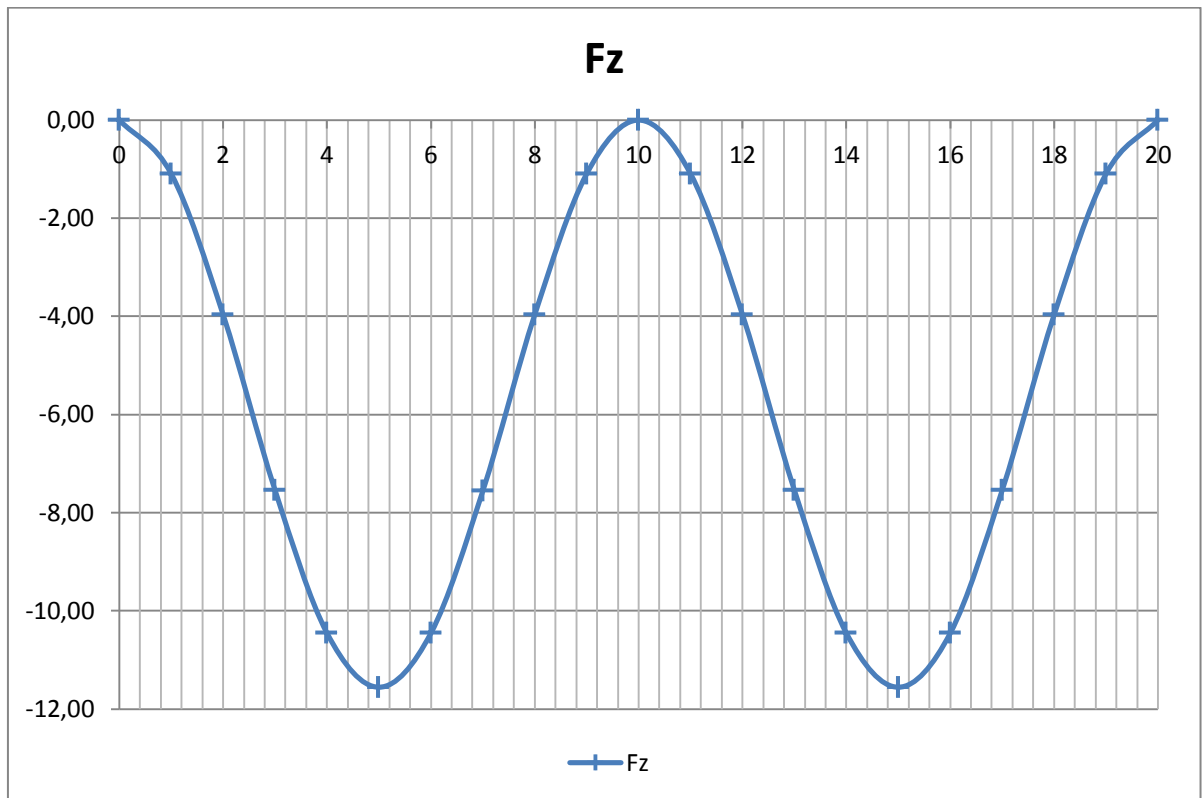
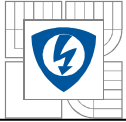


Graf 7.2.5: Průběh síly F<sub>x</sub>

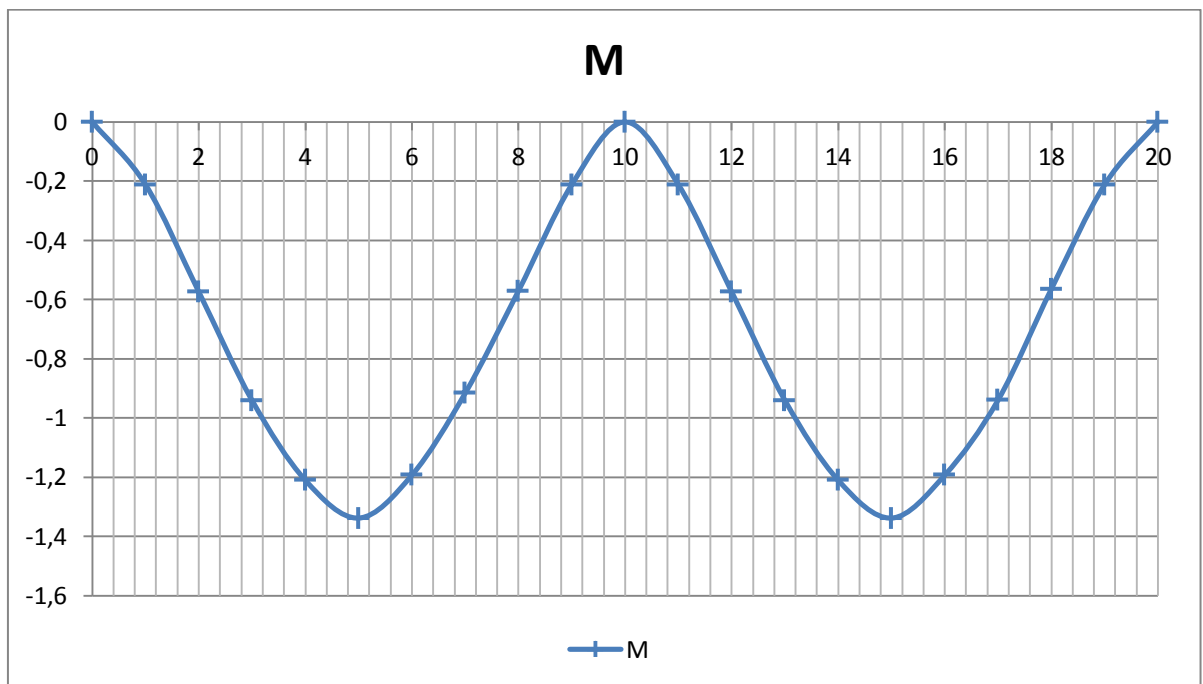


Graf 7.2.6: Průběh sil F<sub>y</sub>

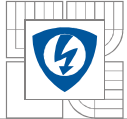




Graf 7.2.7: Průběh síly Fz



Graf 7.2.8: Průběh momentu

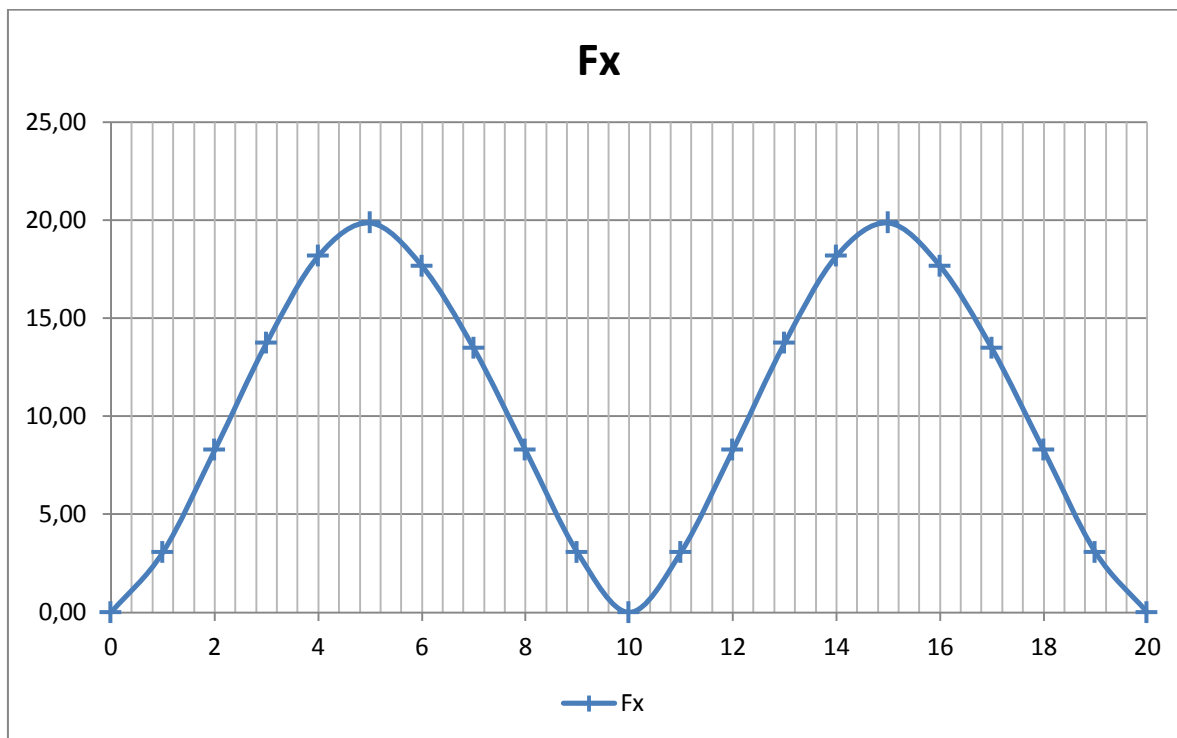
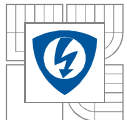


Hodnoty pro tranzientní analýzu pro střídavý proud 15 kA je v Tab. 7.2.3

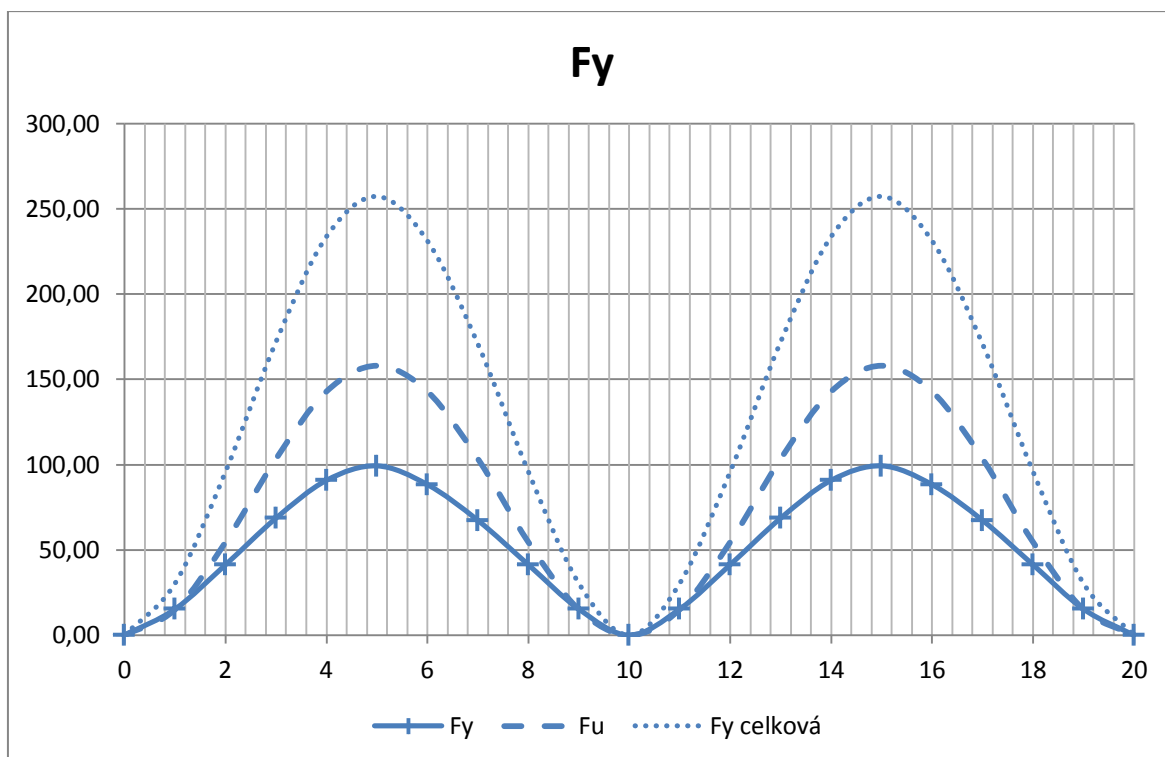
Tab. 7.2.3: Hodnoty pro proud 15 kA

I	15,00	kA				
t	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>u</sub>	F <sub>y</sub> celková	F <sub>z</sub>	M
ms	N	N	N	N	N	Nm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
1	3,07	15,33	15,09	30,41	-2,46	-0,39853
2	8,27	41,33	54,59	95,92	-8,97	-1,0749
3	13,73	68,64	103,41	172,05	-17,08	-1,7849
4	18,16	90,82	142,91	233,73	-23,63	-2,3617
5	19,85	99,27	158,00	257,27	-26,14	-2,5815
6	17,66	88,31	142,91	231,23	-23,66	-2,2966
7	13,46	67,32	103,41	170,74	-17,10	-1,7507
8	8,26	41,32	54,59	95,91	-8,97	-1,0746
9	3,06	15,31	15,09	30,40	-2,46	-0,3982
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
11	3,06	15,32	15,09	30,41	-2,46	-0,3985
12	8,27	41,33	54,59	95,92	-8,97	-1,0748
13	13,73	68,64	103,41	172,05	-17,08	-1,7849
14	18,16	90,82	142,91	233,73	-23,63	-2,3617
15	19,85	99,27	158,00	257,27	-26,14	-2,5815
16	17,66	88,31	142,91	231,23	-23,66	-2,2966
17	13,46	67,32	103,41	170,74	-17,10	-1,7507
18	8,26	41,32	54,59	95,91	-8,97	-1,0745
19	3,06	15,31	15,09	30,40	-2,46	-0,3982
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0

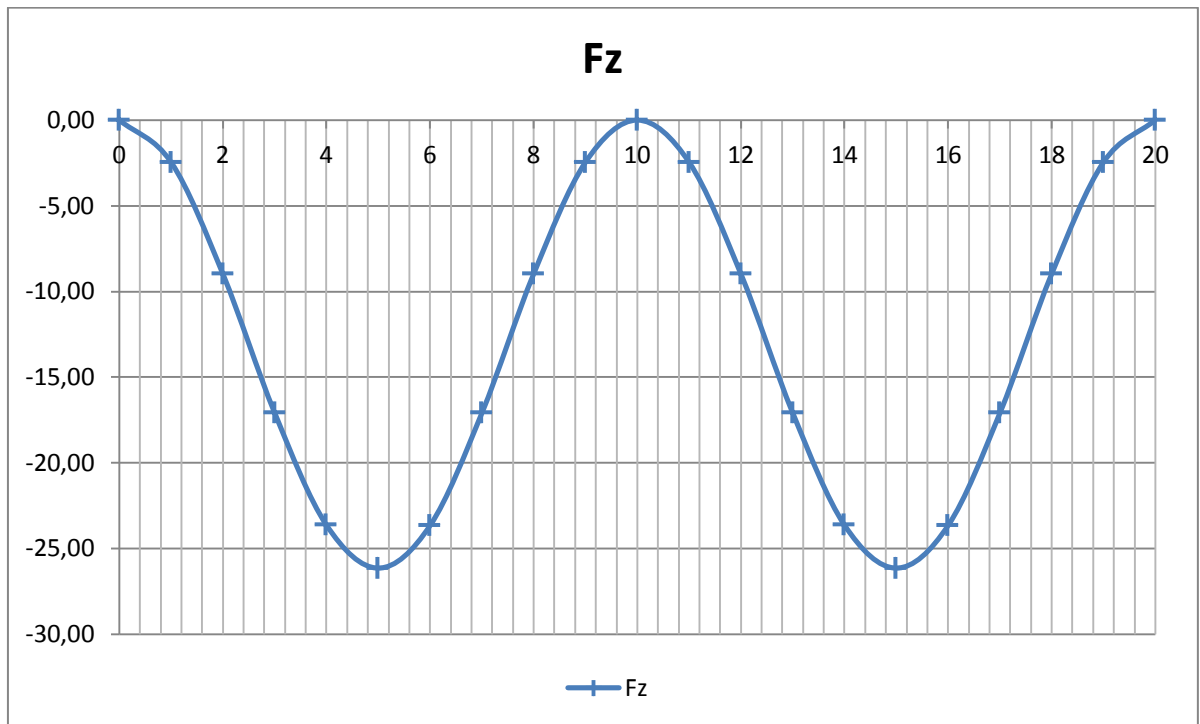
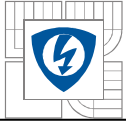
Průběhy sil a momentů jsou na grafech 7.2.9 – 7.2.12



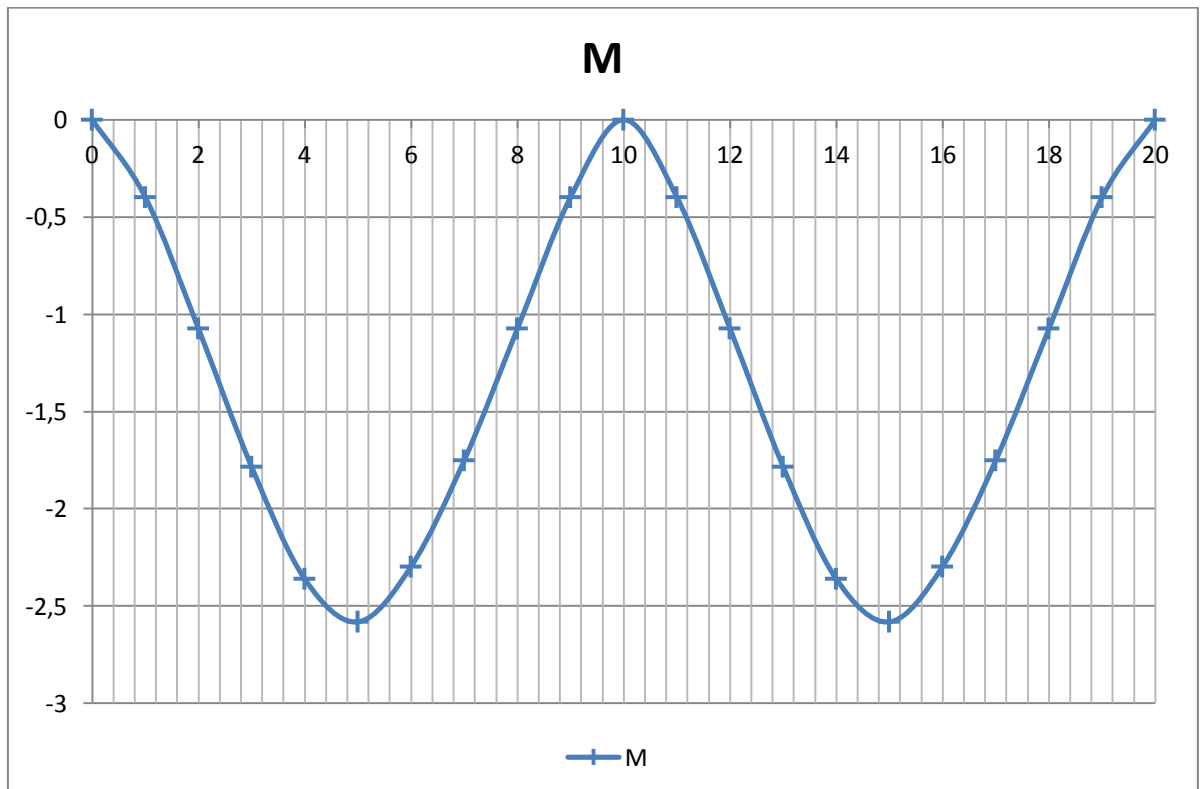
Graf 7.2.9: Průběh síly F<sub>x</sub>



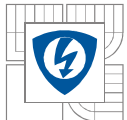
Graf 7.2.10: Průběhy síl F<sub>y</sub>



Graf 7.2.11: Průběh síly Fz



Graf 7.2.12: Průběh momentu

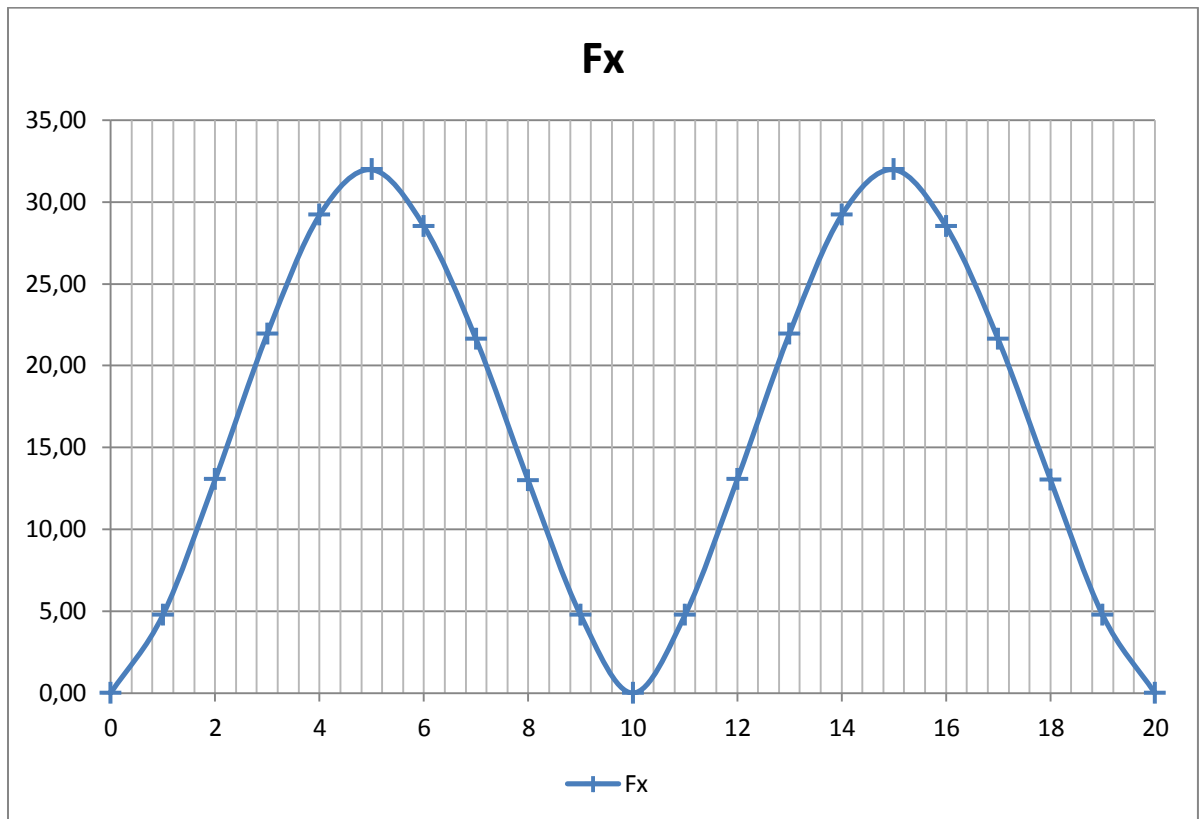
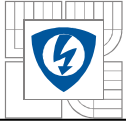


Hodnoty pro tranzientní analýzu pro střídavý proud 20 kA je v Tab. 7.2.4

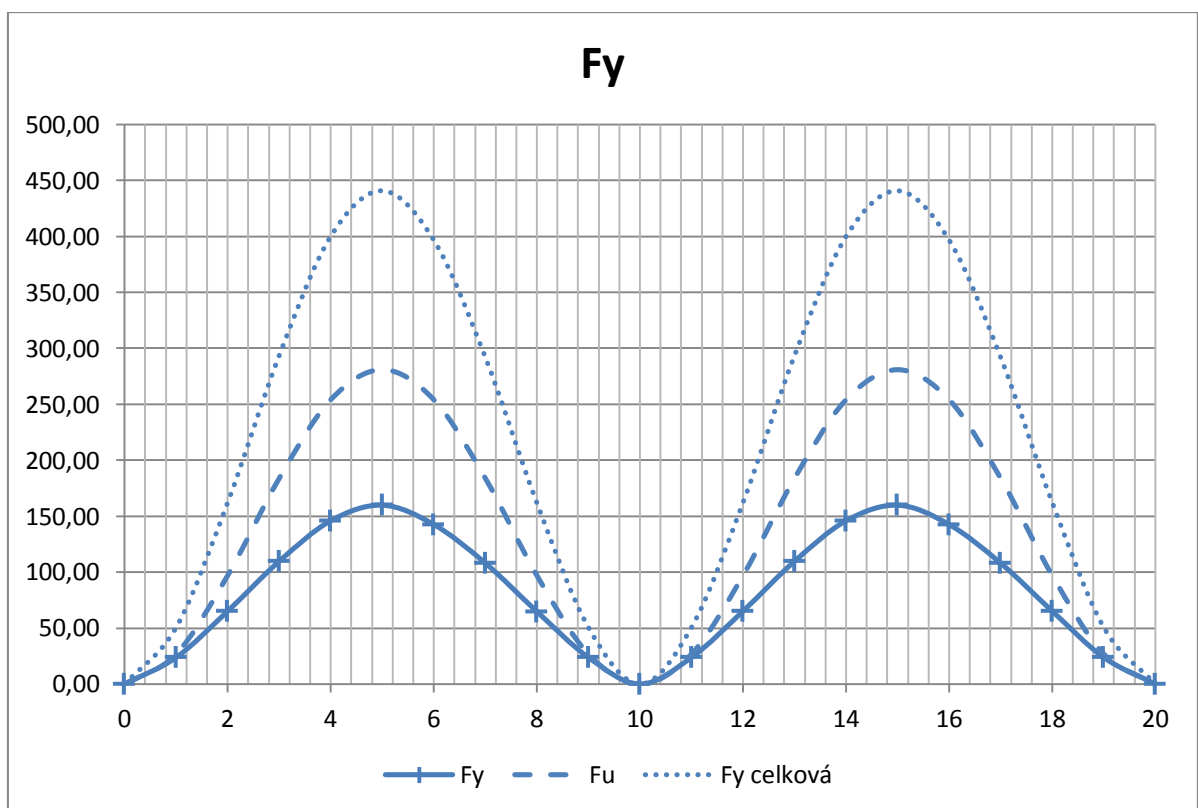
Tab. 7.2.4: Hodnoty pro proud 20 kA

I	20,00	kA				
t	Fx	Fy	Fu	Fy celková	Fz	M
ms	N	N	N	N	N	Nm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
1	4,77	23,84	26,82	50,66	-4,25	-0,61992
2	13,04	65,18	97,05	162,23	-15,41	-1,695
3	21,95	109,74	183,85	293,58	-29,41	-2,8537
4	29,19	145,93	254,07	400,00	-40,75	-3,7949
5	31,97	159,84	280,89	440,74	-45,00	-4,1567
6	28,51	142,55	254,07	396,62	-40,62	-3,7071
7	21,60	108,02	183,85	291,87	-29,35	-2,8091
8	12,97	64,83	97,05	161,87	-15,48	-1,6858
9	4,77	23,83	26,82	50,66	-4,27	-0,61978
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
11	4,77	23,84	26,82	50,66	-4,11	-0,6199
12	13,04	65,18	97,05	162,23	-15,20	-1,695
13	21,95	109,74	183,85	293,58	-29,17	-2,8537
14	29,19	145,93	254,07	400,00	-40,57	-3,7949
15	31,97	159,84	280,89	440,74	-44,95	-4,1567
16	28,51	142,55	254,07	396,62	-40,61	-3,7071
17	21,60	108,02	183,85	291,87	-29,35	-2,8091
18	13,03	65,17	97,05	162,21	-15,48	-1,6947
19	4,77	23,83	26,82	50,65	-4,28	-0,6197
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0

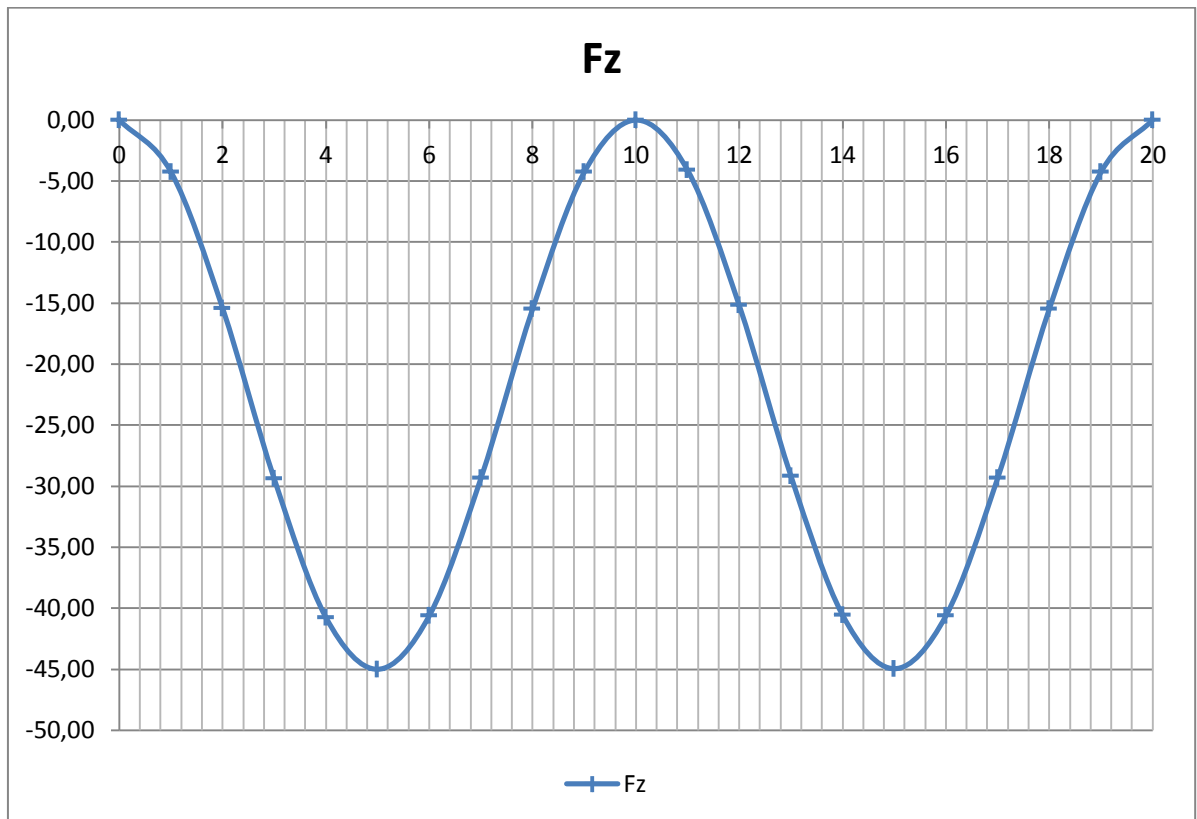
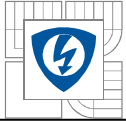
Průběhy sil a momentů jsou na grafech 7.2.13 – 7.2.16



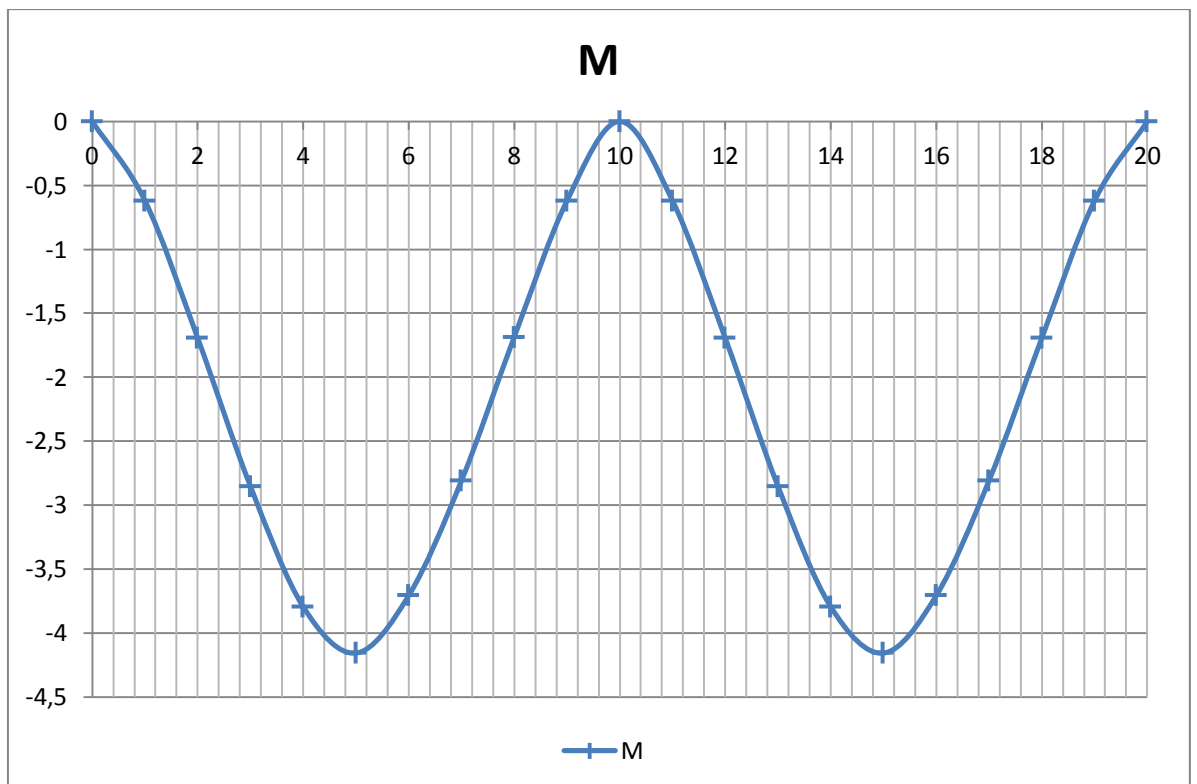
Graf 7.2.13: Průběh síly F<sub>x</sub>



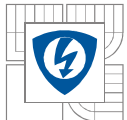
Graf 7.2.14: Průběhy sil F<sub>y</sub>



Graf 7.2.15: Průběh síly Fz



Graf 7.2.16: Průběh momentu



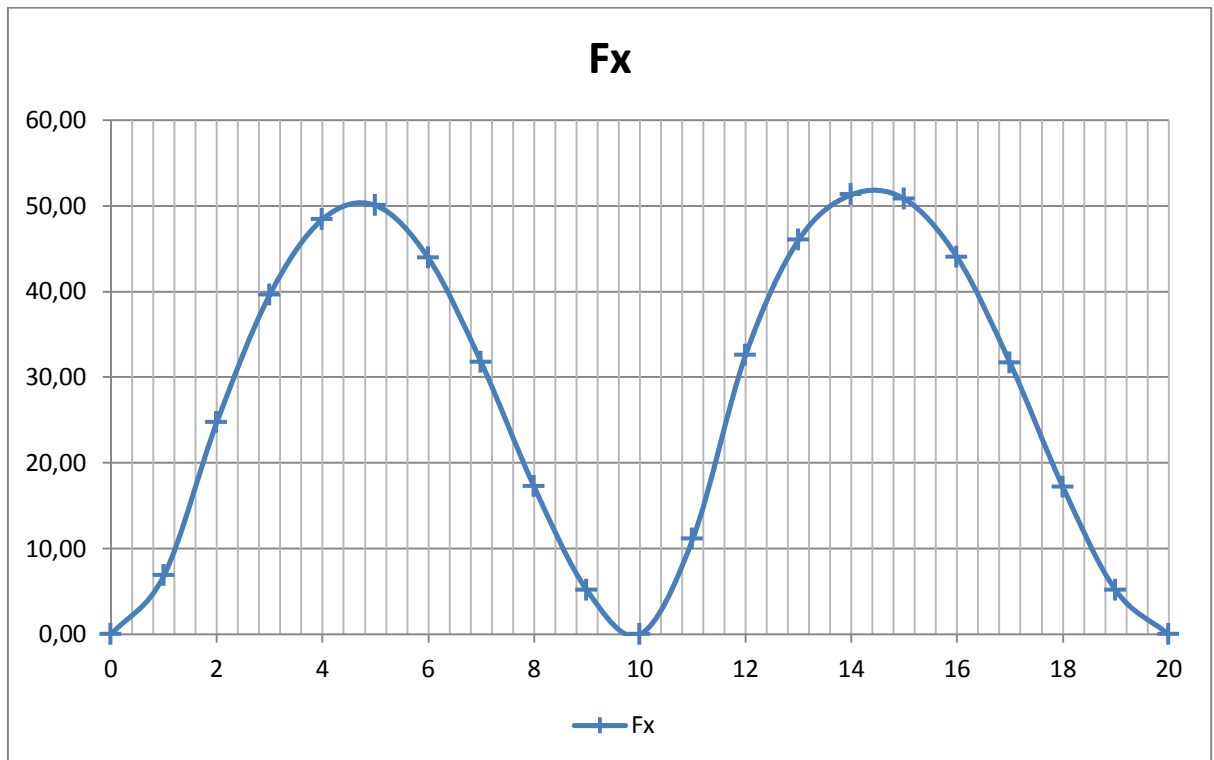
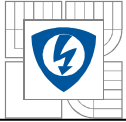
Hodnoty pro tranzientní analýzu pro střídavý proud 25 kA je v Tab. 7.2.5

Tab. 7.2.5: Hodnoty pro proud 25 kA

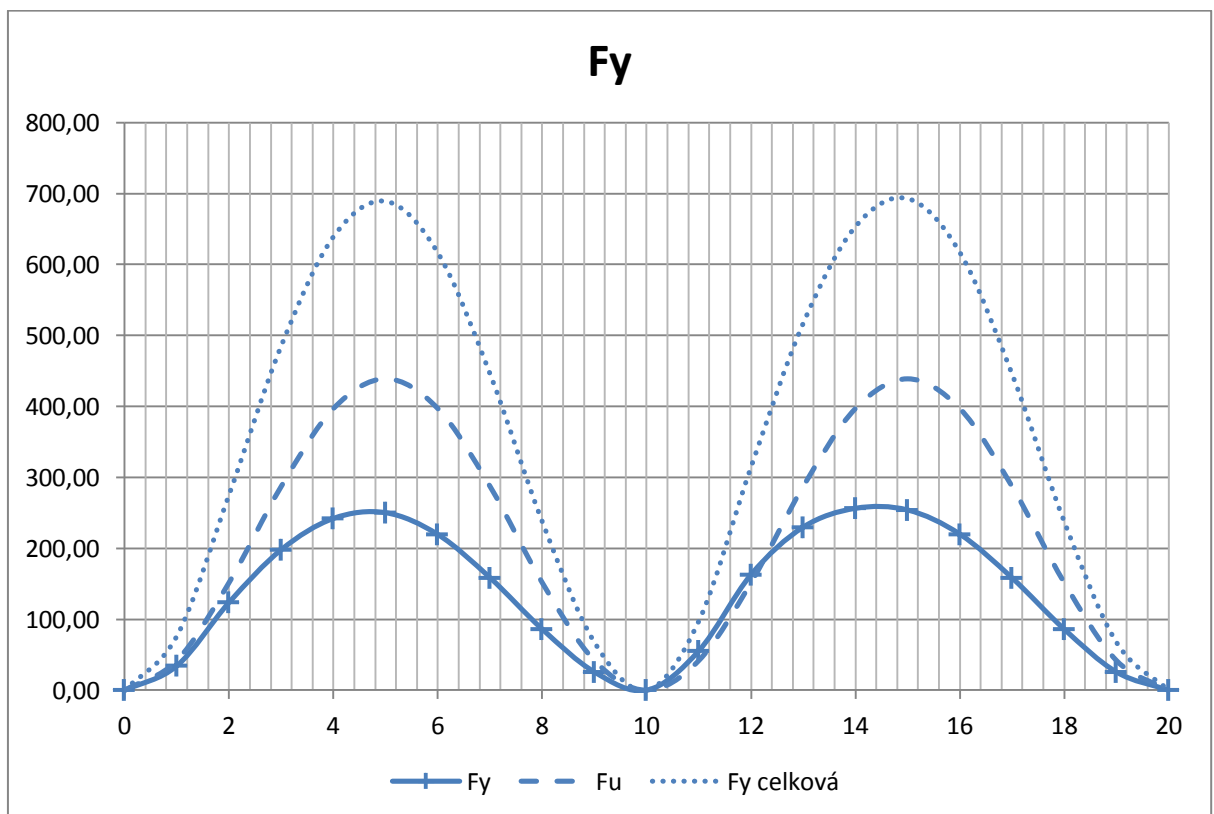
I	25,00 kA					
t	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>u</sub>	F <sub>y</sub> celková	F <sub>z</sub>	M
ms	N	N	N	N	N	Nm
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
1	6,87	34,37	41,91	76,28	-6,68	-0,89377
2	24,74	123,70	151,64	275,34	-24,17	-3,2169
3	39,61	198,07	287,26	485,33	-45,98	-5,1507
4	48,43	242,14	396,99	639,13	-63,54	-6,2969
5	50,04	250,22	438,90	689,11	-70,13	-6,5069
6	43,91	219,55	396,99	616,54	-63,37	-5,7095
7	31,72	158,58	287,26	445,85	-45,85	-4,124
8	17,23	86,16	151,64	237,79	-24,20	-2,2405
9	5,14	25,72	41,91	67,63	-6,68	-0,66879
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
11	11,12	55,62	41,91	97,53	-6,44	-1,4465
12	32,59	162,96	151,64	314,60	-23,85	-4,2379
13	45,98	229,92	287,26	517,18	-45,69	-5,979
14	51,29	256,43	396,99	653,42	-63,50	-6,6685
15	50,82	254,07	438,90	692,97	-70,20	-6,6072
16	44,00	220,01	396,99	617,00	-63,41	-5,7214
17	31,68	158,41	287,26	445,67	-45,86	-4,1194
18	17,21	86,03	151,64	237,66	-24,20	-2,2372
19	5,14	25,69	41,91	67,60	-6,68	-0,6681
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0

Průběhy sil a momentů jsou na grafech 7.2.17 – 7.2.20

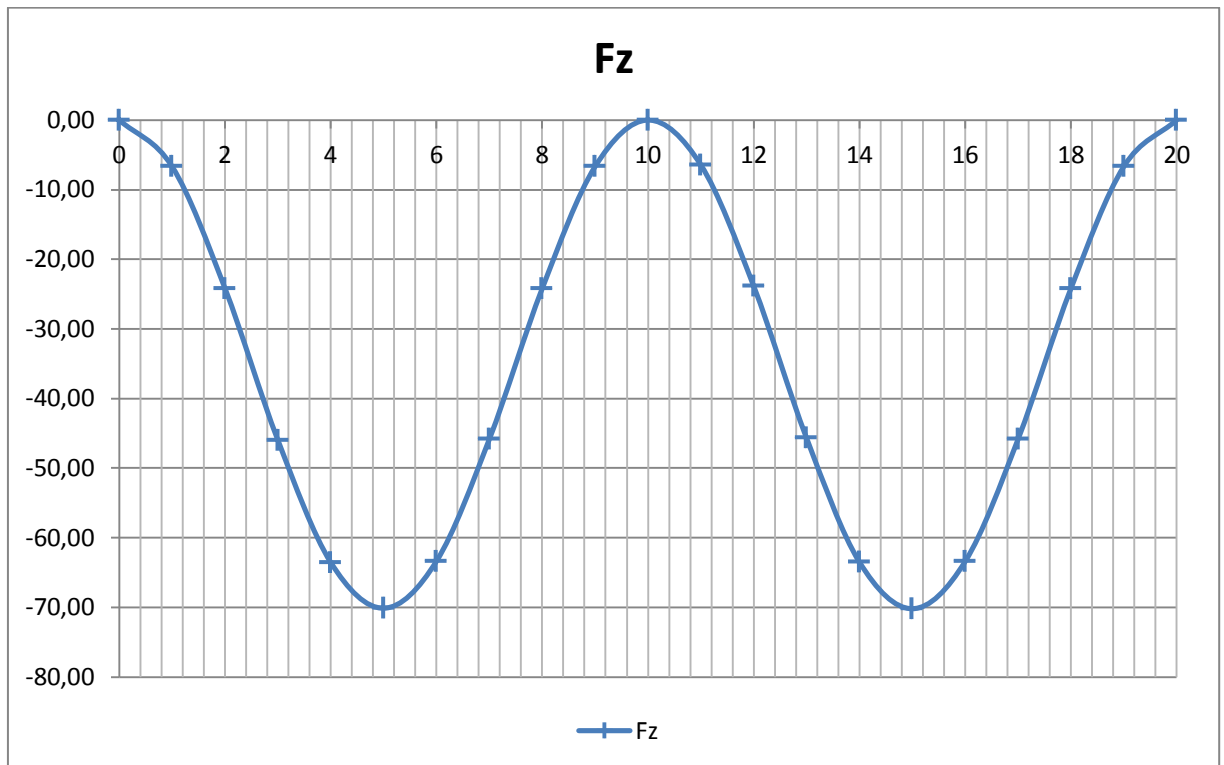
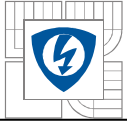




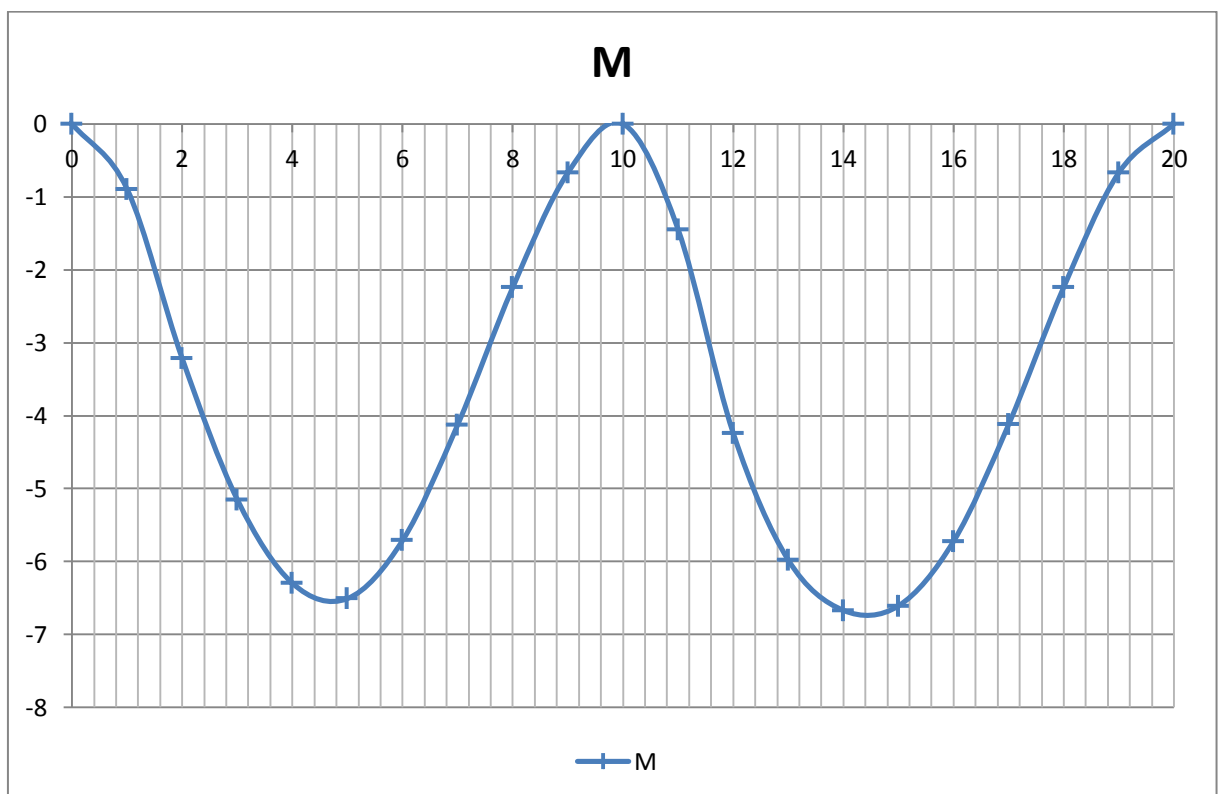
Graf 7.2.17: Průběh síly F<sub>x</sub>



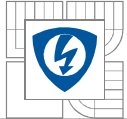
Graf 7.2.18: Průběhy sil F<sub>y</sub>



Graf 7.2.19: Průběh síly  $F_z$



Graf 7.2.20: Průběh momentu

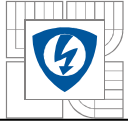


## 7.2.2 Třípólový model

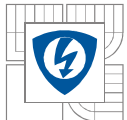
Z důvodu velkého množství dat je v této práci uvedena pouze tabulka hodnot pro střídavý proud 15 kA. Hodnoty pro ostatní proudy jsou v příloze této práce.

Tab. 7.2.6: Hodnoty sil pro proud 15 kA

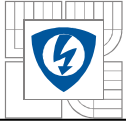
t [ms] 0				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	17,131	85,657	-83,99	-2,228
L2	17,582	87,91	41,504	-2,286
L3	0,0046	0,0229	0,109	-6E-04
t [ms] 1				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	20,565	102,83	-95,57	-2,674
L2	11,238	56,189	57,663	-1,461
L3	2,7457	13,729	-4,085	-0,357
t [ms] 2				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	20,728	103,64	-88,26	-2,695
L2	4,8106	24,053	46,738	-0,625
L3	8,1193	40,596	5,0169	-1,056
t [ms] 3				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	17,524	87,618	-64,37	-2,279
L2	0,4782	2,3911	12,914	-0,062
L3	13,772	68,86	24,732	-1,791
t [ms] 4				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	11,841	59,204	-34,67	-1,54
L2	1,4512	7,2559	-27,85	-0,189
L3	18,767	93,836	47,633	-2,44
t [ms] 5				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	5,8664	29,332	-9,268	-0,763
L2	6,9147	34,573	-67,89	-0,899
L3	20,9	104,5	65,093	-2,718



t [ms] 6				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	1,2885	6,4422	2,2561	-0,168
L2	13,456	67,279	-85,37	-1,75
L3	19,559	97,797	69,502	-2,543
t [ms] 7				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	0,5391	2,6954	-3,882	-0,07
L2	19,309	96,543	-75,48	-2,511
L3	15,209	76,043	59,623	-1,978
t [ms] 8				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	5,3598	26,799	-27,62	-0,697
L2	22,529	112,64	-40,98	-2,929
L3	9,3421	46,71	39,375	-1,215
t [ms] 9				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	11,742	58,712	-58,37	-1,527
L2	21,977	109,88	3,6887	-2,858
L3	3,3814	16,907	16,473	-0,44
t [ms] 10				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	17,269	86,345	-84,21	-2,245
L2	17,553	87,764	41,481	-2,282
L3	0,0044	0,0222	0,1088	-6E-04
t [ms] 11				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	20,669	103,35	-95,62	-2,688
L2	11,103	55,516	57,58	-1,444
L3	3,2396	16,198	-3,843	-0,421
t [ms] 12				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	20,72	103,6	-88,27	-2,694
L2	4,9289	24,644	46,999	-0,641
L3	7,8332	39,166	5,4051	-1,019

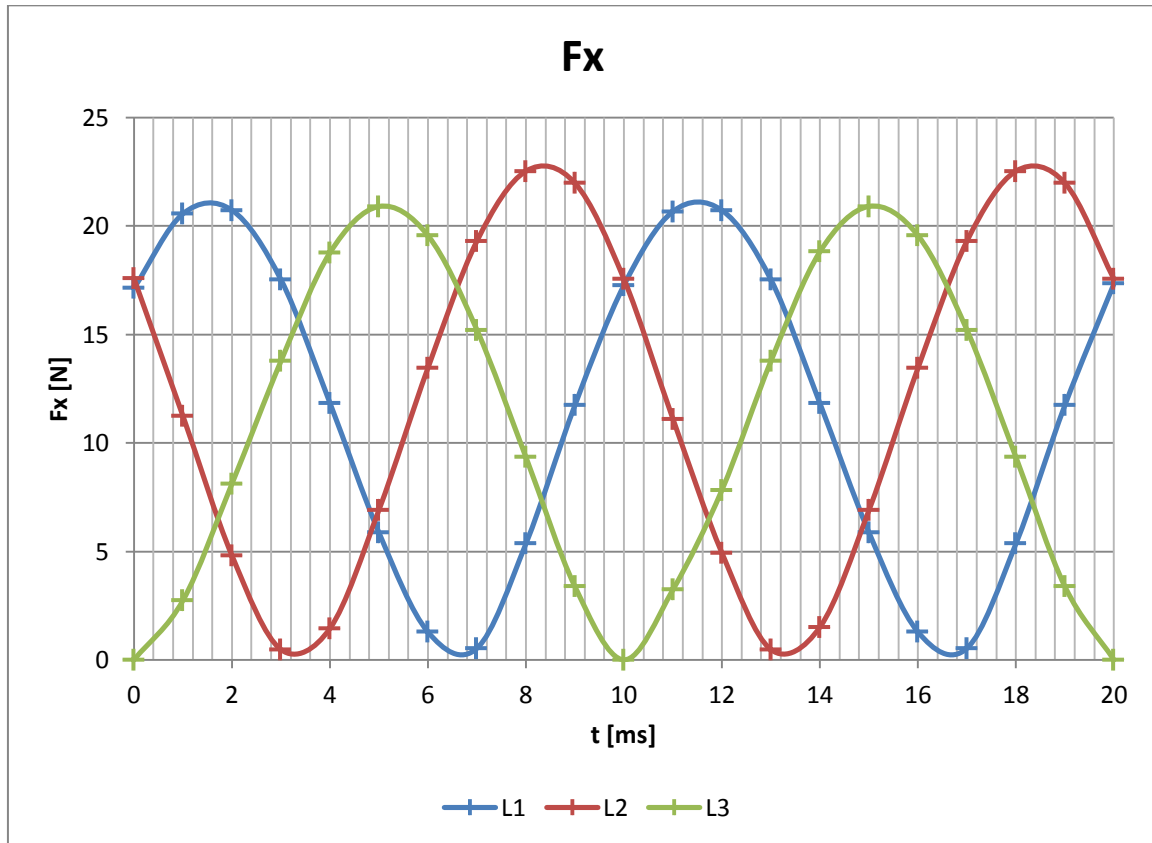


t [ms] 13				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	17,524	87,622	-64,37	-2,279
L2	0,4785	2,3924	12,914	-0,062
L3	13,771	68,856	24,729	-1,791
t [ms] 14				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	11,822	59,112	-34,61	-1,537
L2	1,5135	7,5674	-27,56	-0,197
L3	18,814	94,07	47,471	-2,446
t [ms] 15				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	5,8757	29,378	-9,24	-0,764
L2	6,8954	34,477	-67,63	-0,897
L3	20,905	104,52	65,049	-2,718
t [ms] 16				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	1,2895	6,4476	2,2584	-0,168
L2	13,447	67,233	-85,35	-1,748
L3	19,561	97,804	69,491	-2,543
t [ms] 17				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	0,5391	2,6954	-3,882	-0,07
L2	19,306	96,531	-75,48	-2,51
L3	15,209	76,043	59,621	-1,978
t [ms] 18				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	5,3599	26,799	-27,62	-0,697
L2	22,529	112,64	-40,98	-2,929
L3	9,3421	46,71	39,375	-1,215
t [ms] 19				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	11,745	58,723	-58,37	-1,527
L2	21,977	109,88	3,6887	-2,858
L3	3,3808	16,904	16,472	-0,44
t [ms] 20				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	17,34	86,699	-84,21	-2,255
L2	17,554	87,768	41,482	-2,282

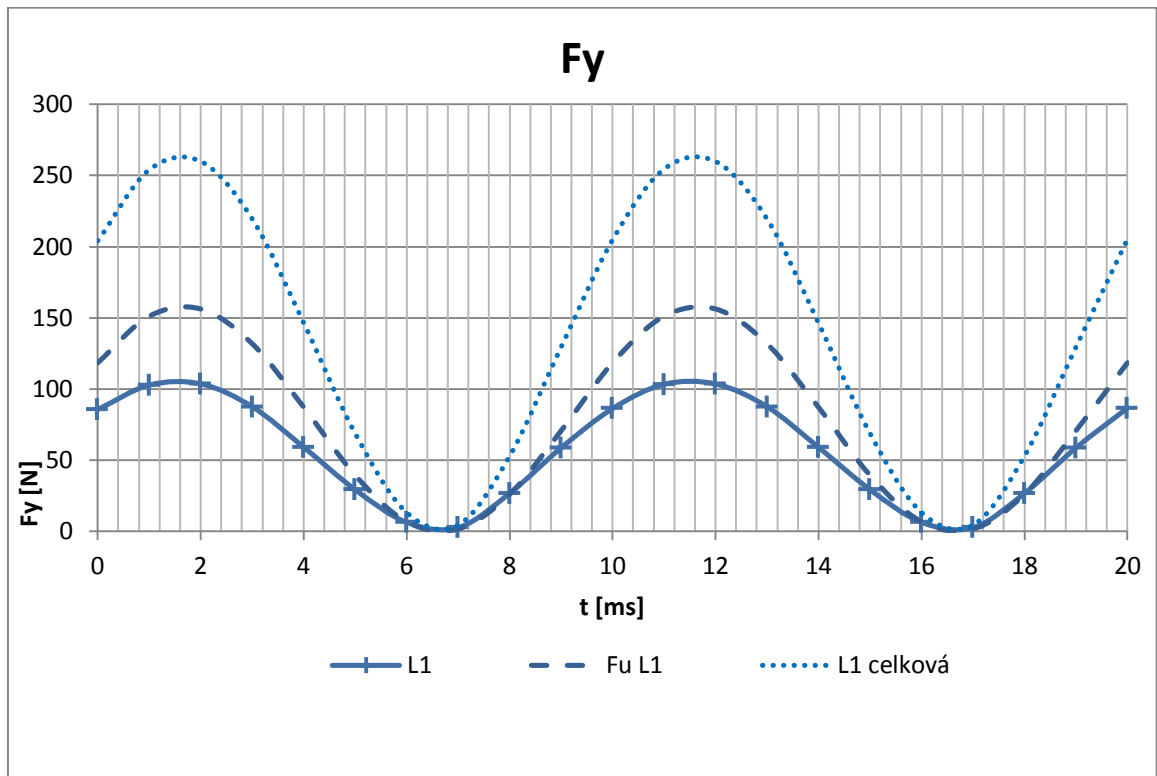


L3	0,0044	0,0222	0,1088	-6E-04
----	--------	--------	--------	--------

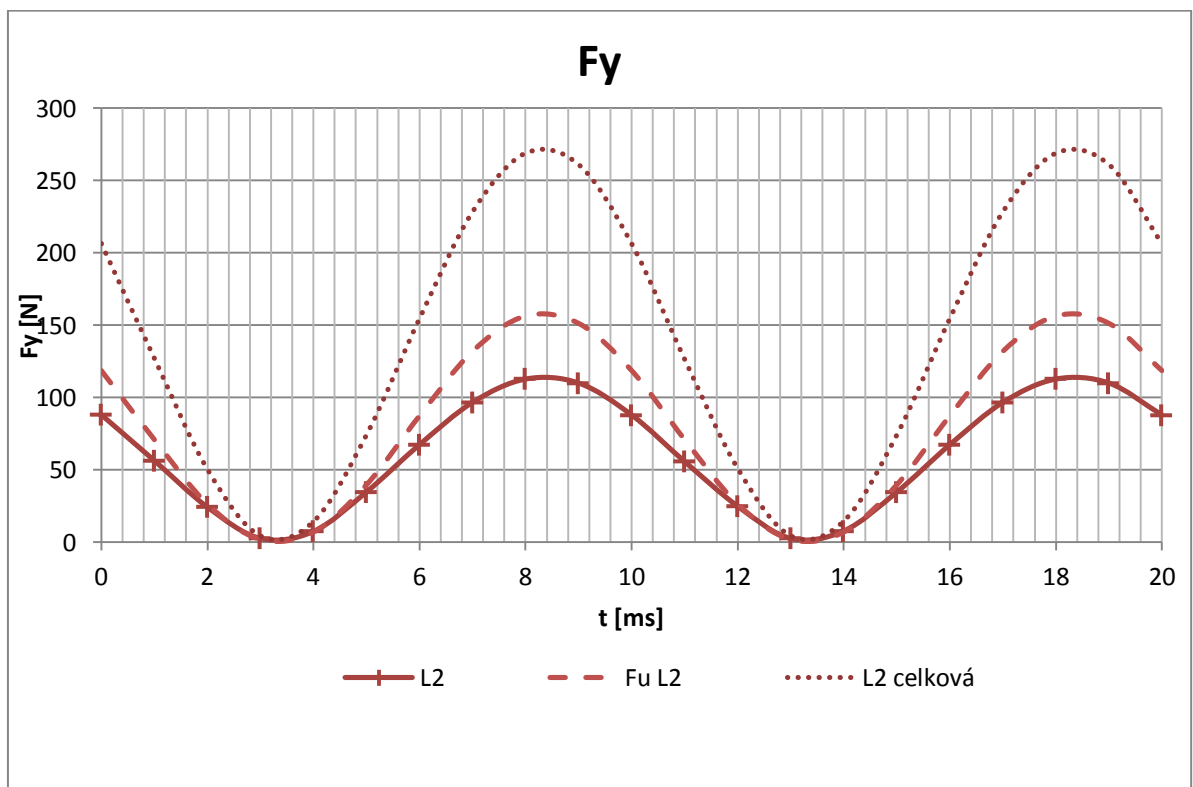
Průběhy proudů a momentů pro proud 15 kA jsou na grafech 7.2.21 až 7.2.27



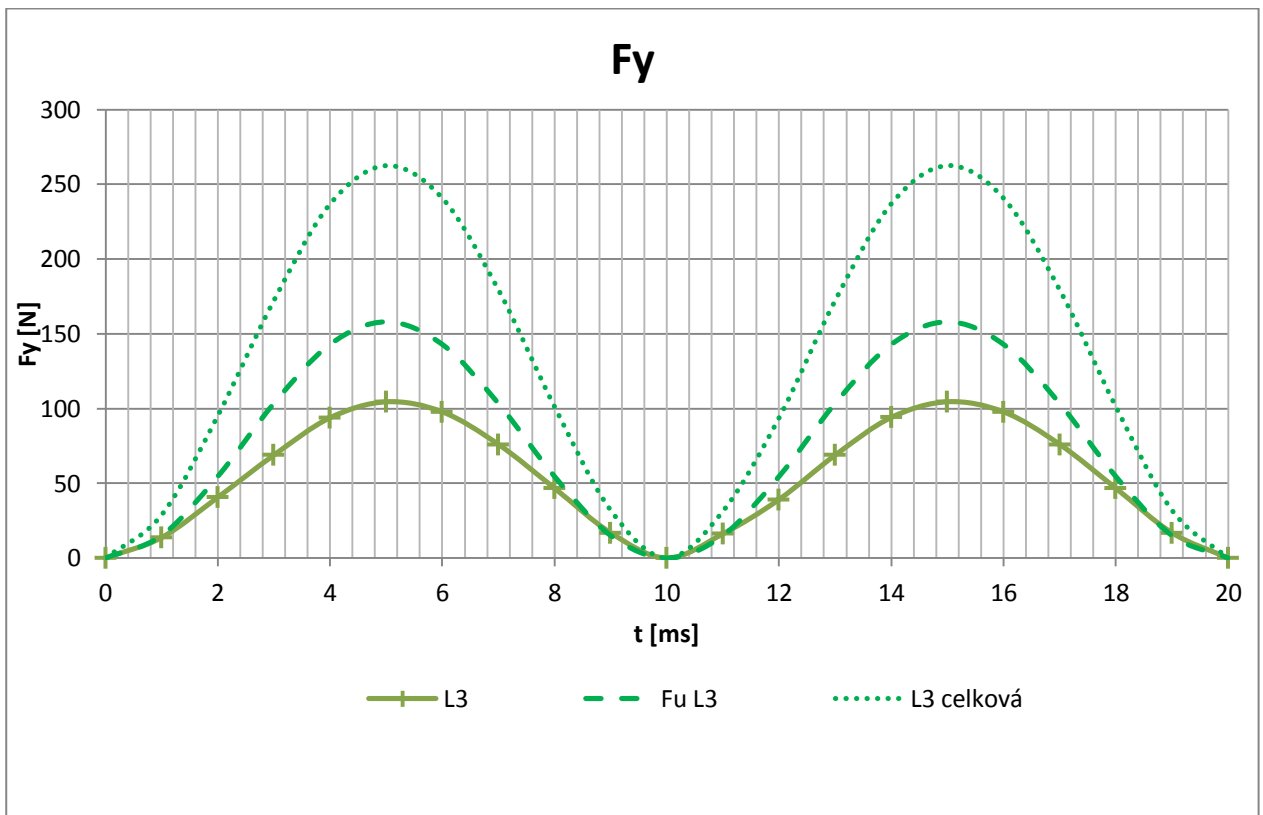
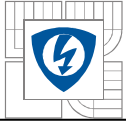
Graf 7.2.21 Průběhy sil  $F_x$



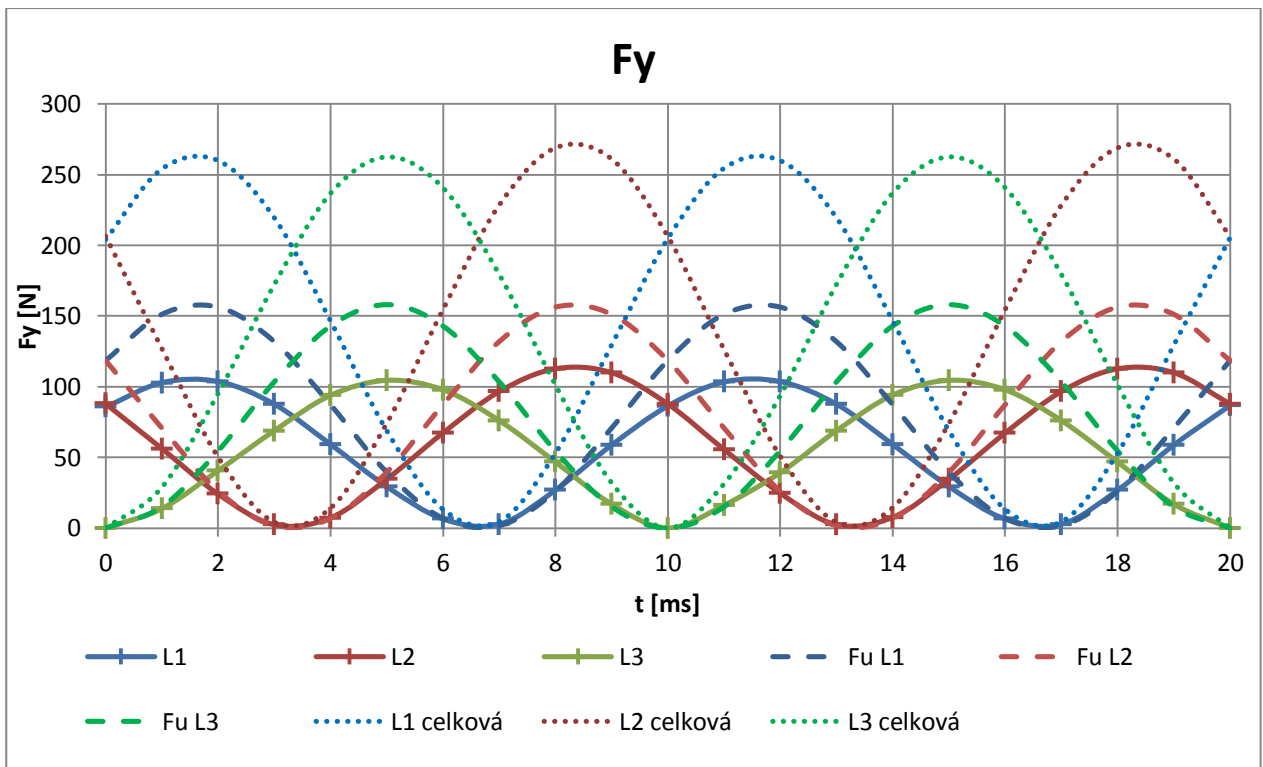
Graf.7.2.22 Průběhy sil  $F_y$  pro L1



Graf.7.2.23 Průběhy sil  $F_y$  pro L2

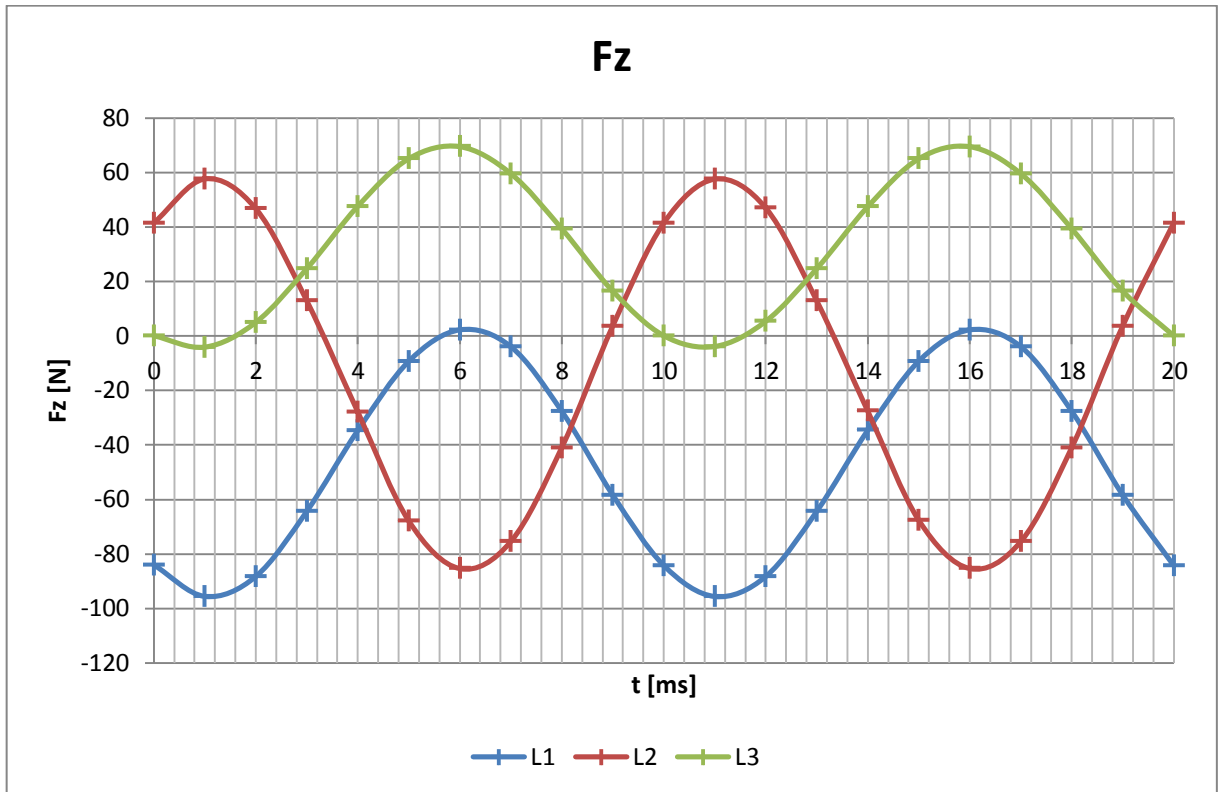


Graf.7.2.24 Průběhy sil  $F_y$  pro L3

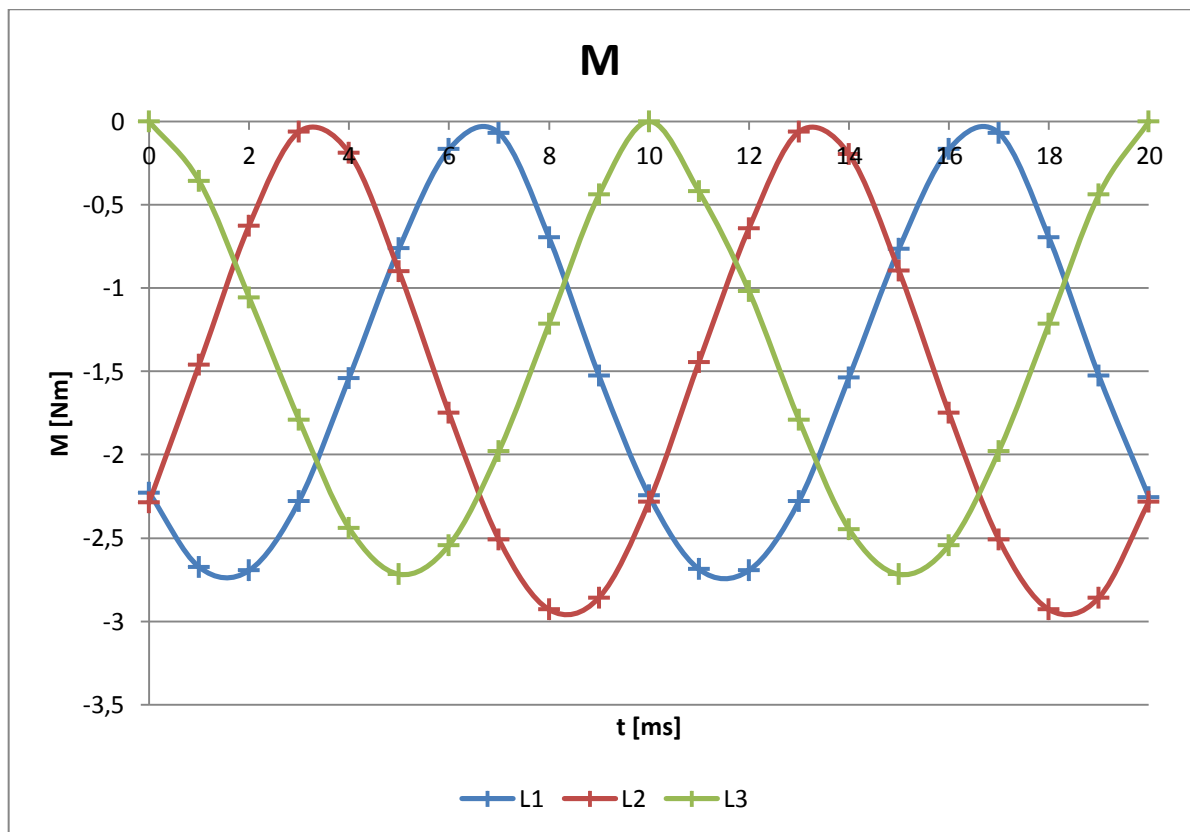


Graf.7.2.25 Průběhy sil  $F_y$



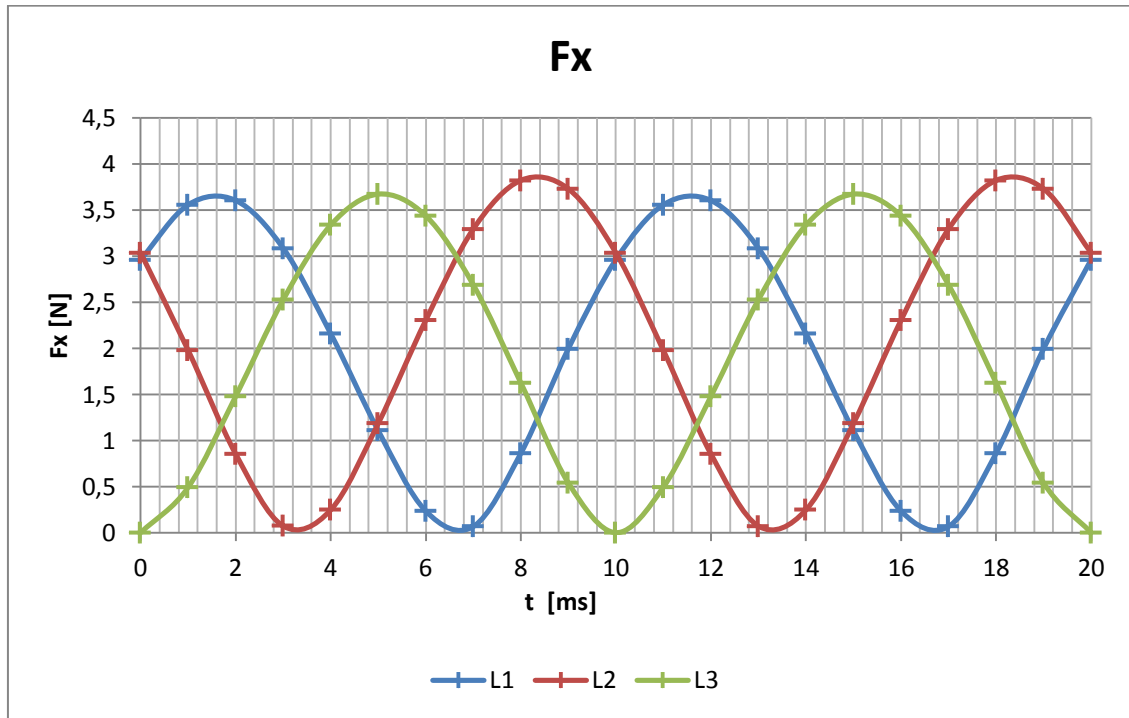


Graf.7.2.26 Průběhy sil Fz

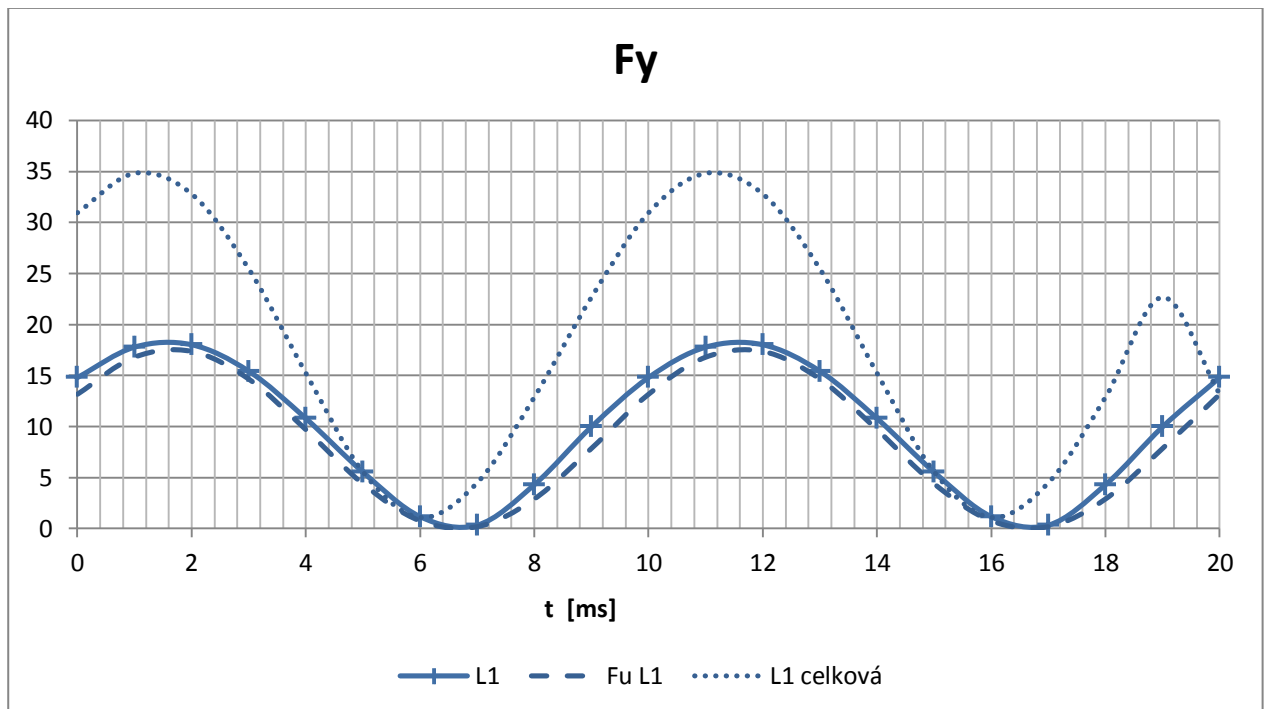


Graf.7.2.27 Průběhy momentů

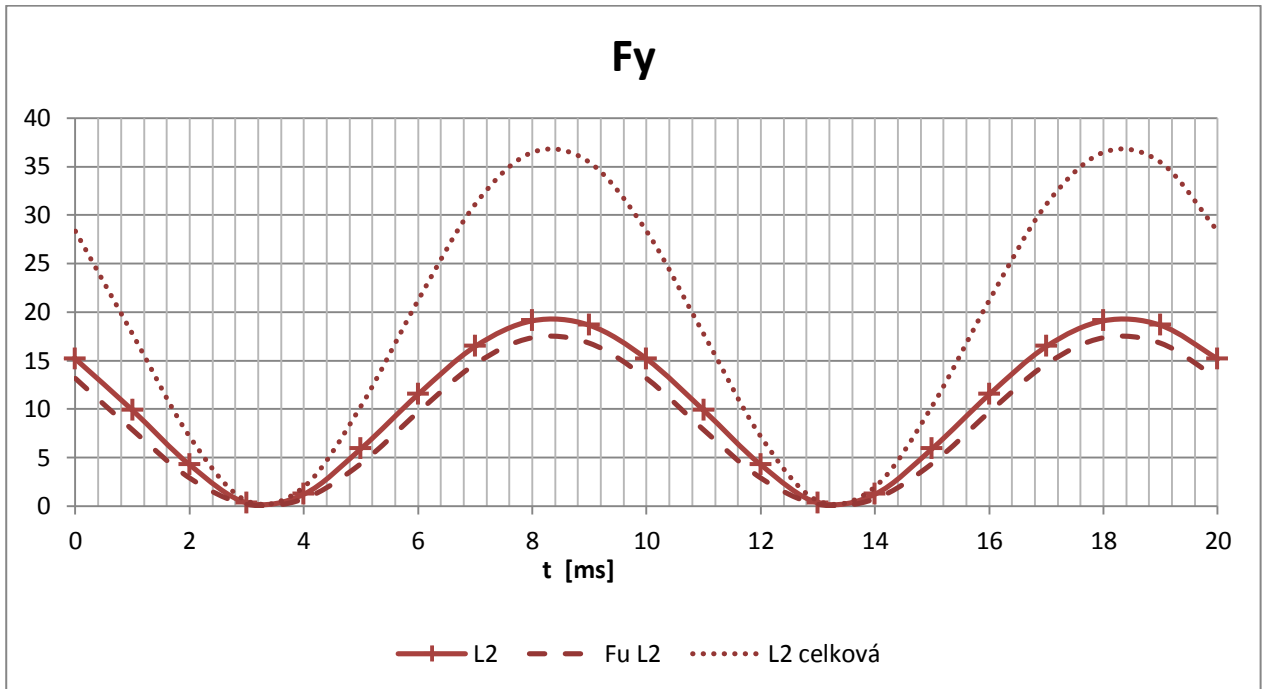
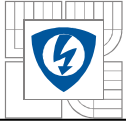
Na následujících grafech jsou průběhy sil a momentů pro proudy 5 kA



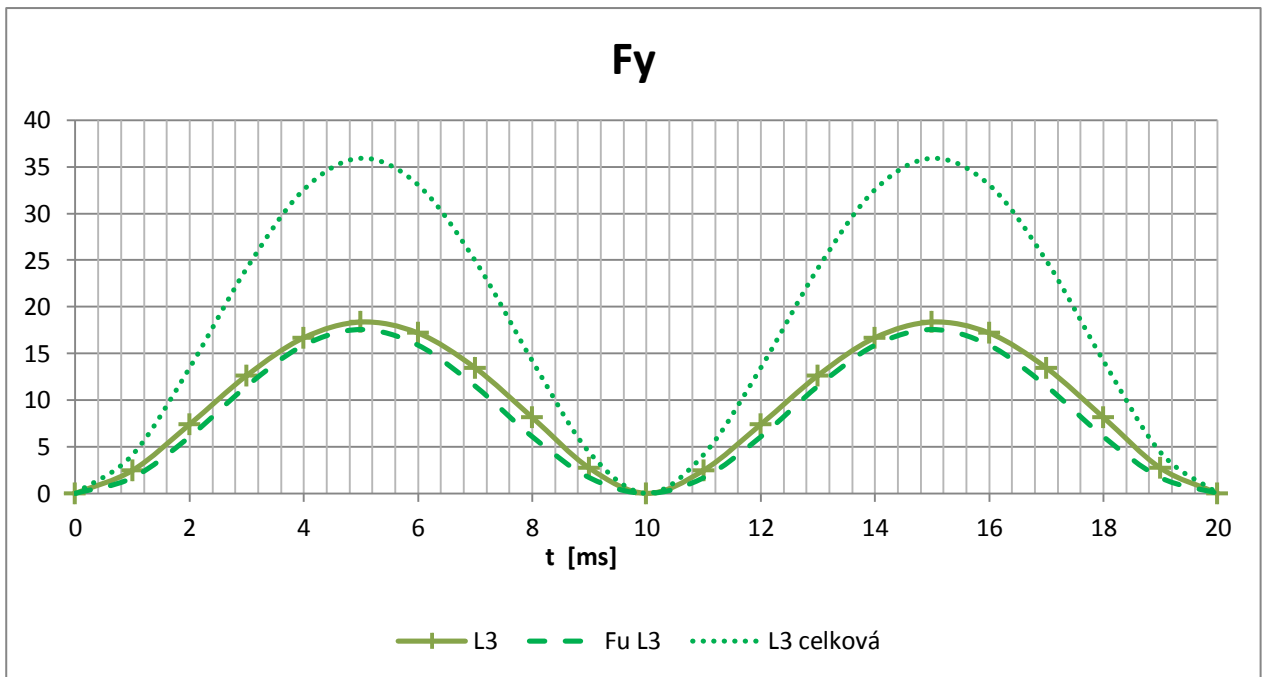
Graf.7.2.28 Průběhy sil  $F_x$



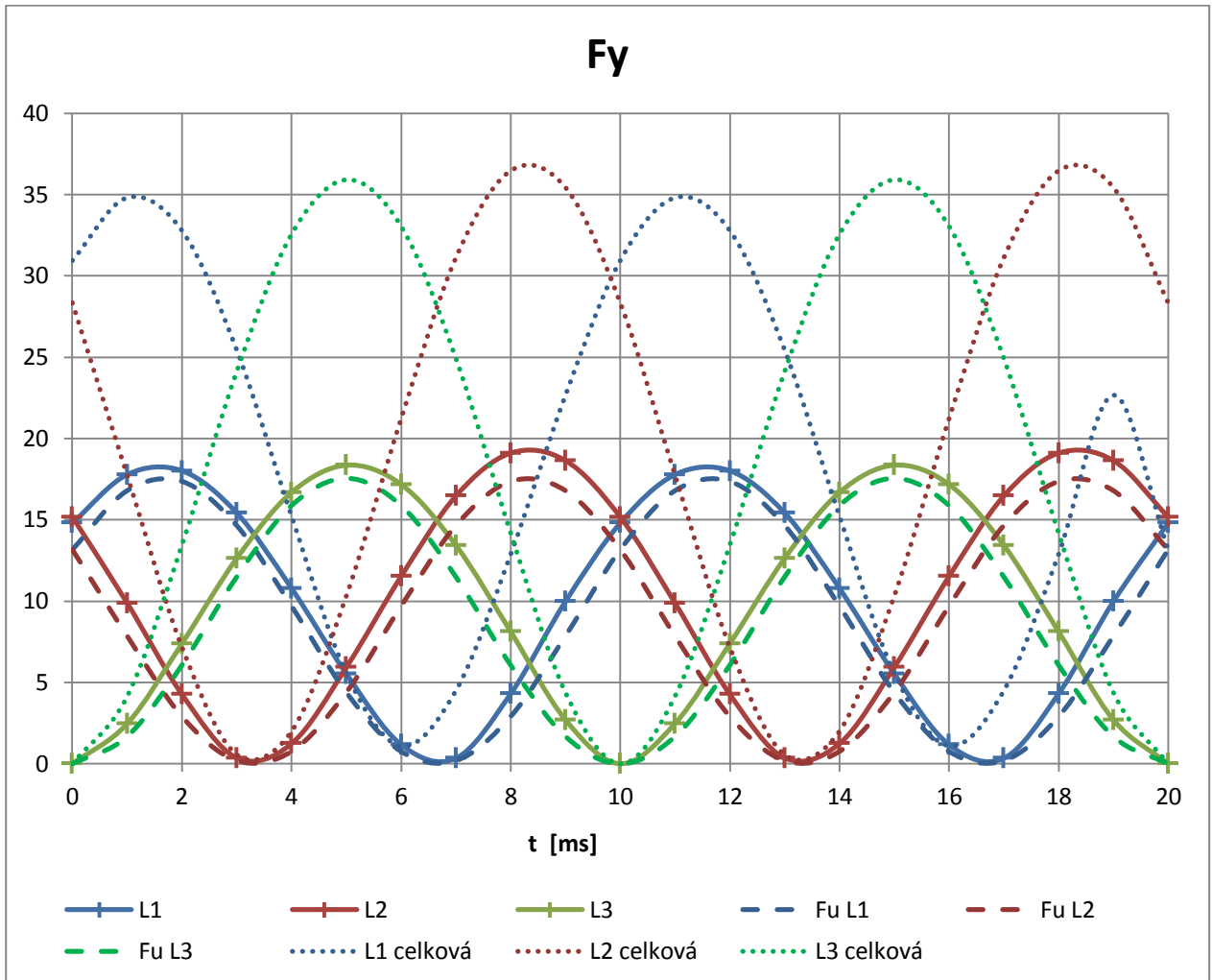
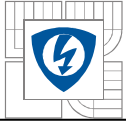
Graf.7.2.29 Průběhy sil  $F_y$  pro L1



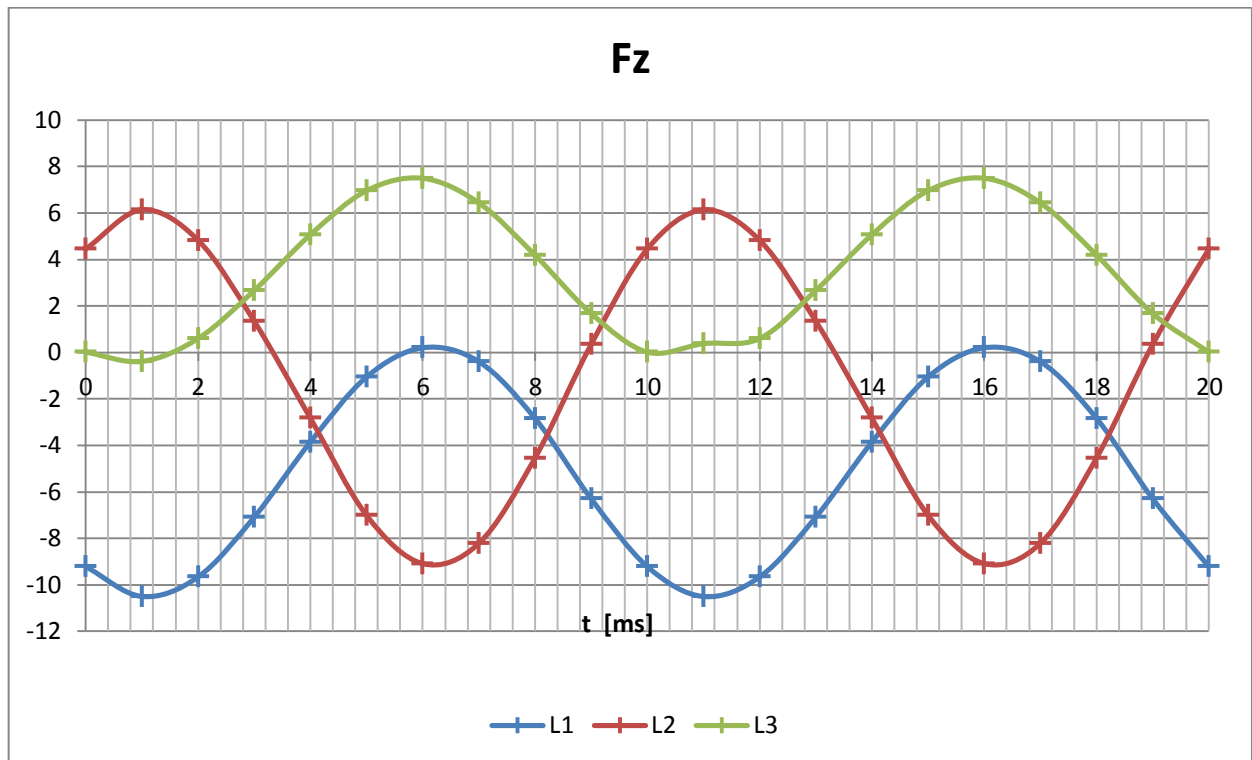
Graf.7.2.30 Průběhy sil Fy pro L2



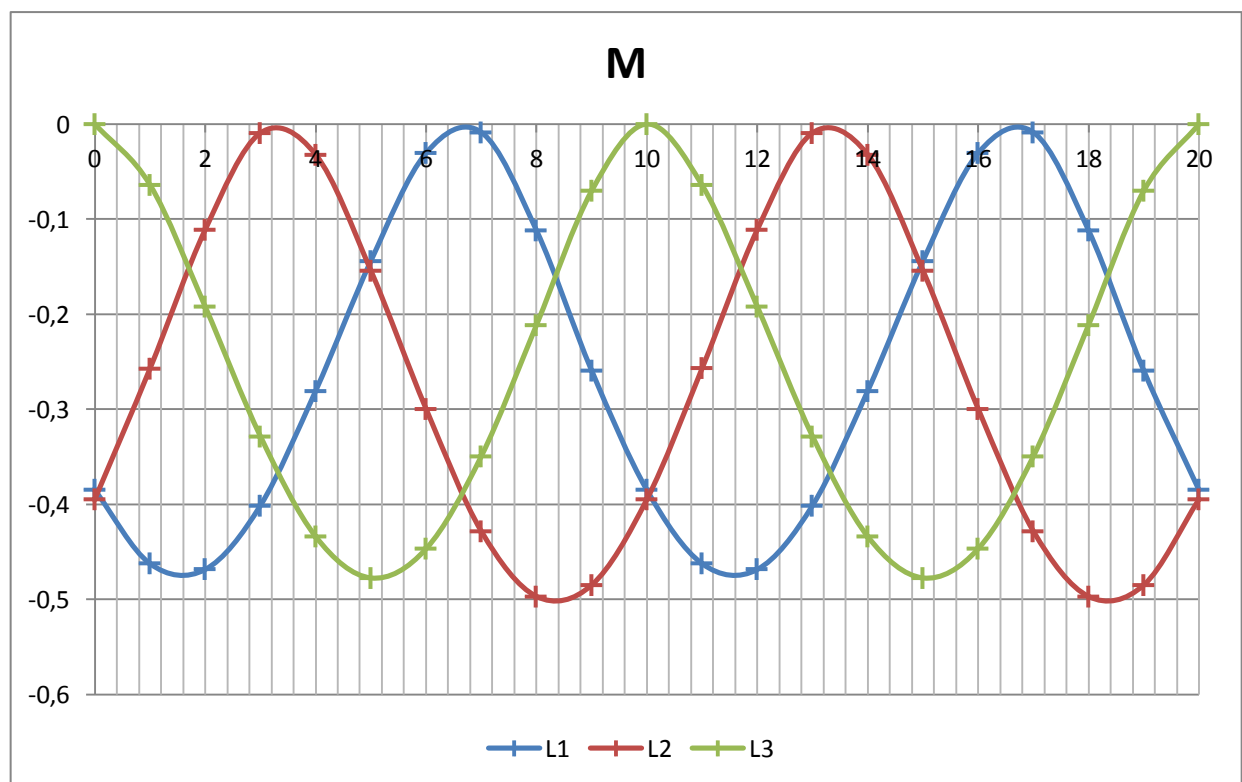
Graf.7.2.31 Průběhy sil Fy pro L3



Graf.7.2.32 Průběhy sil  $F_y$

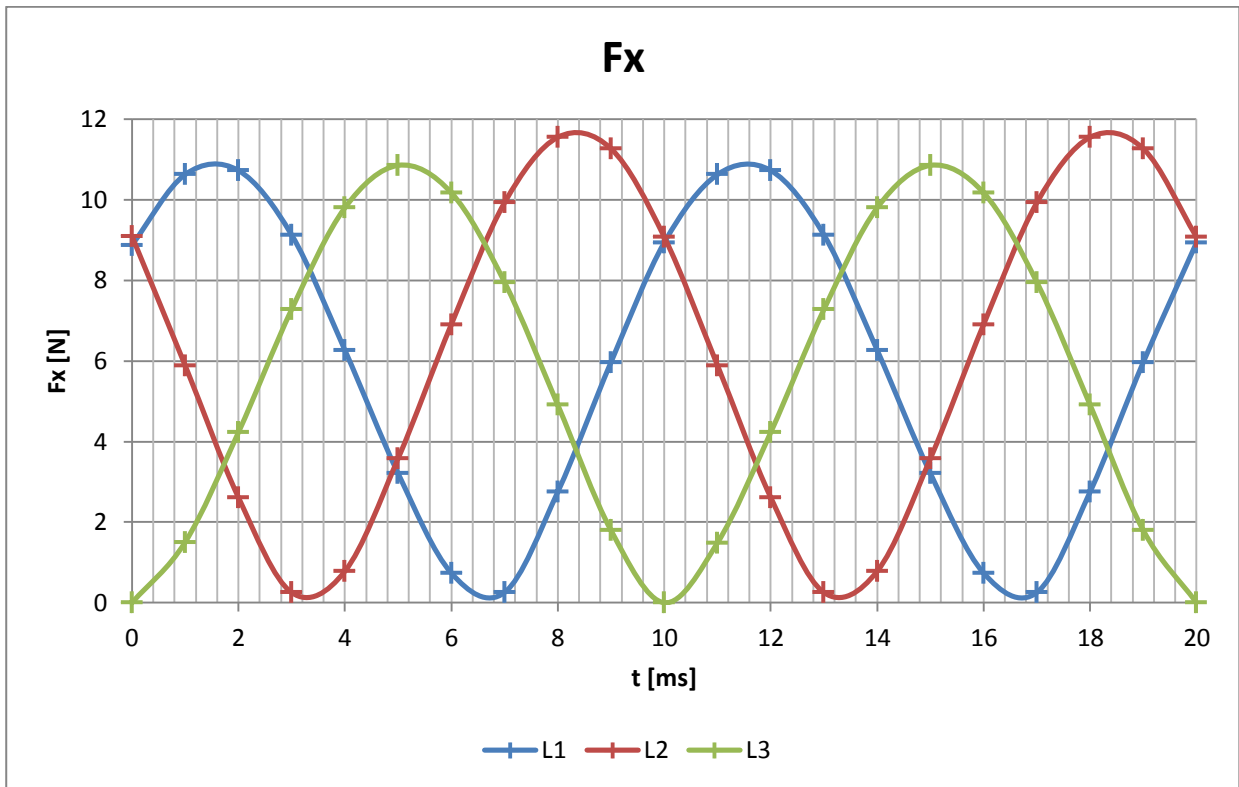


Graf.7.2.33 Průběhy sil Fz

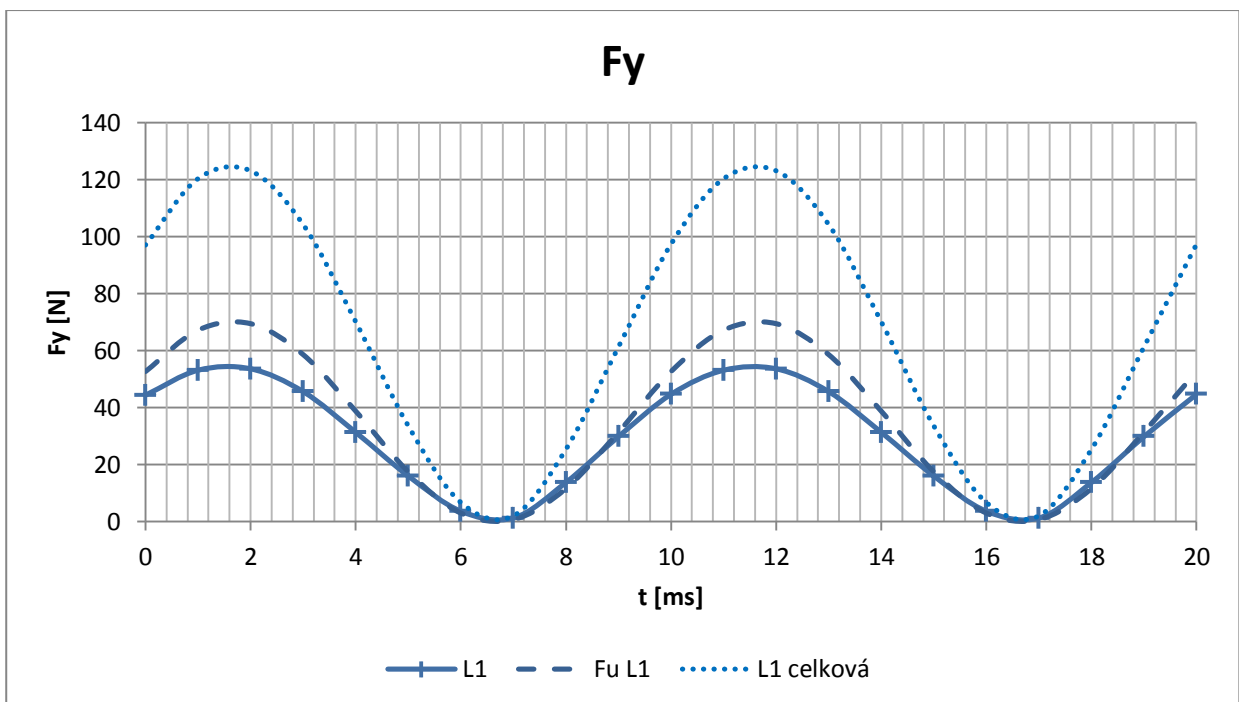


Graf.7.2.34 Průběhy momentů

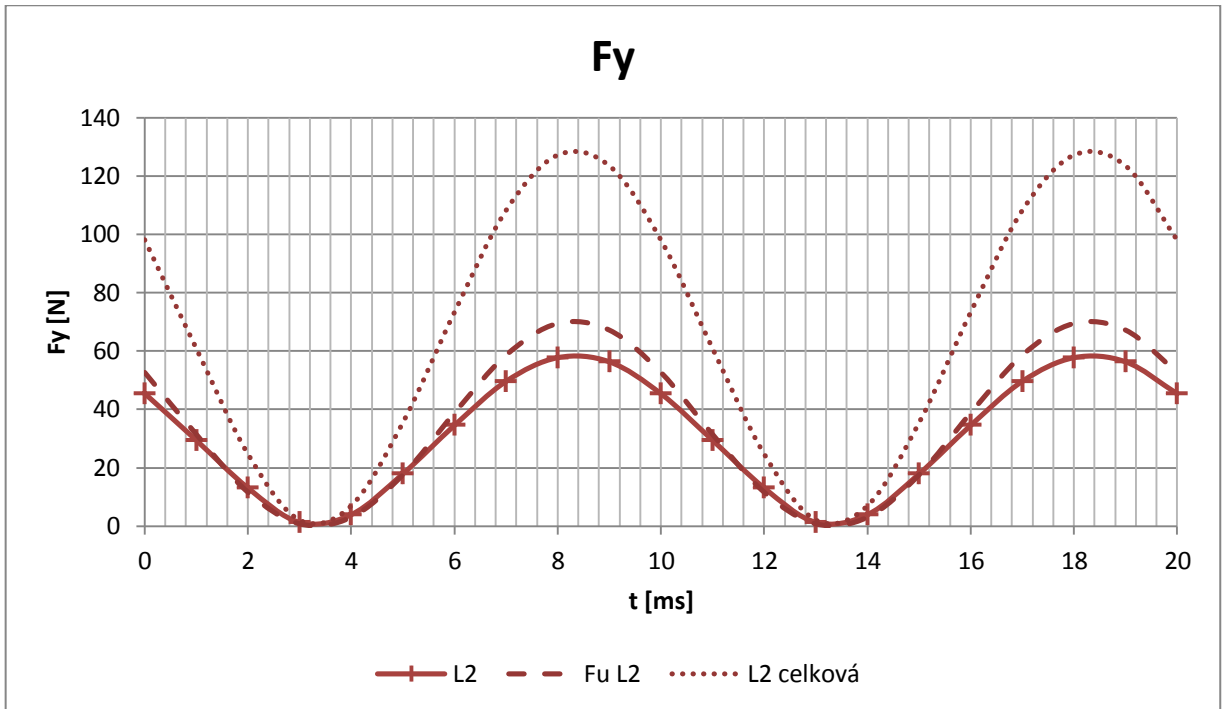
Průběhy proudů a momentů pro proud 10 kA jsou na grafech 7.2.35 až 7.2.41



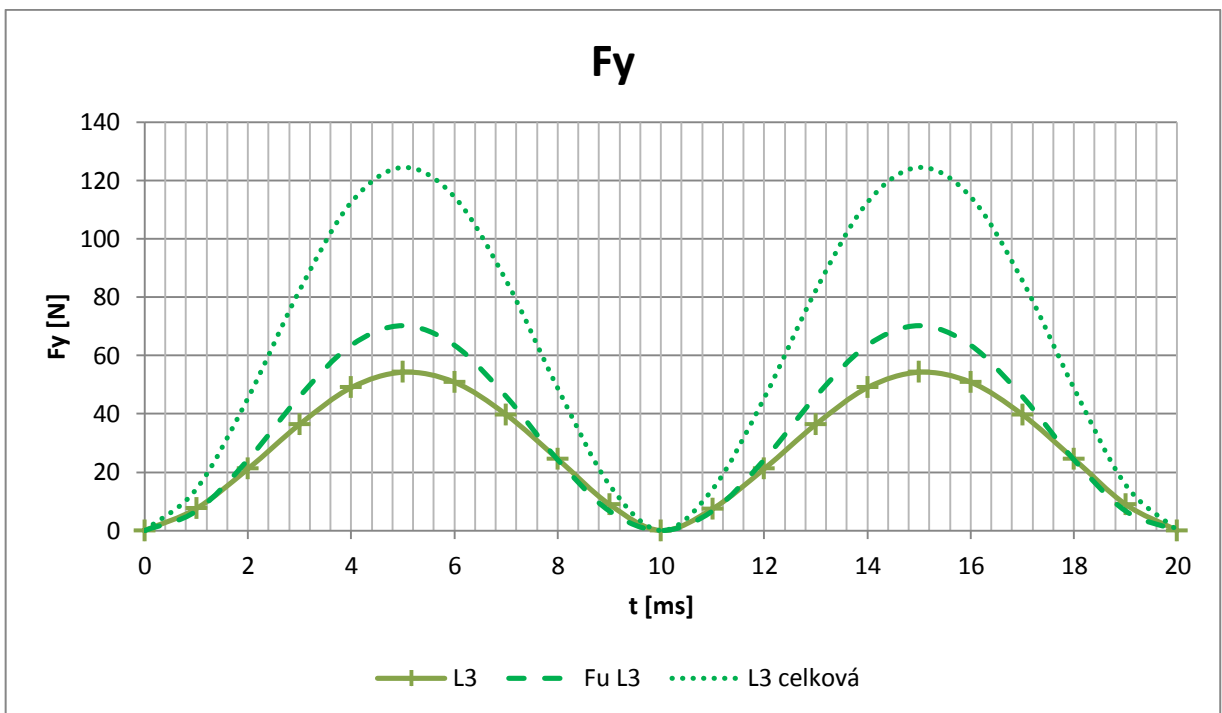
Graf.7.2.35 Průběhy sil Fx



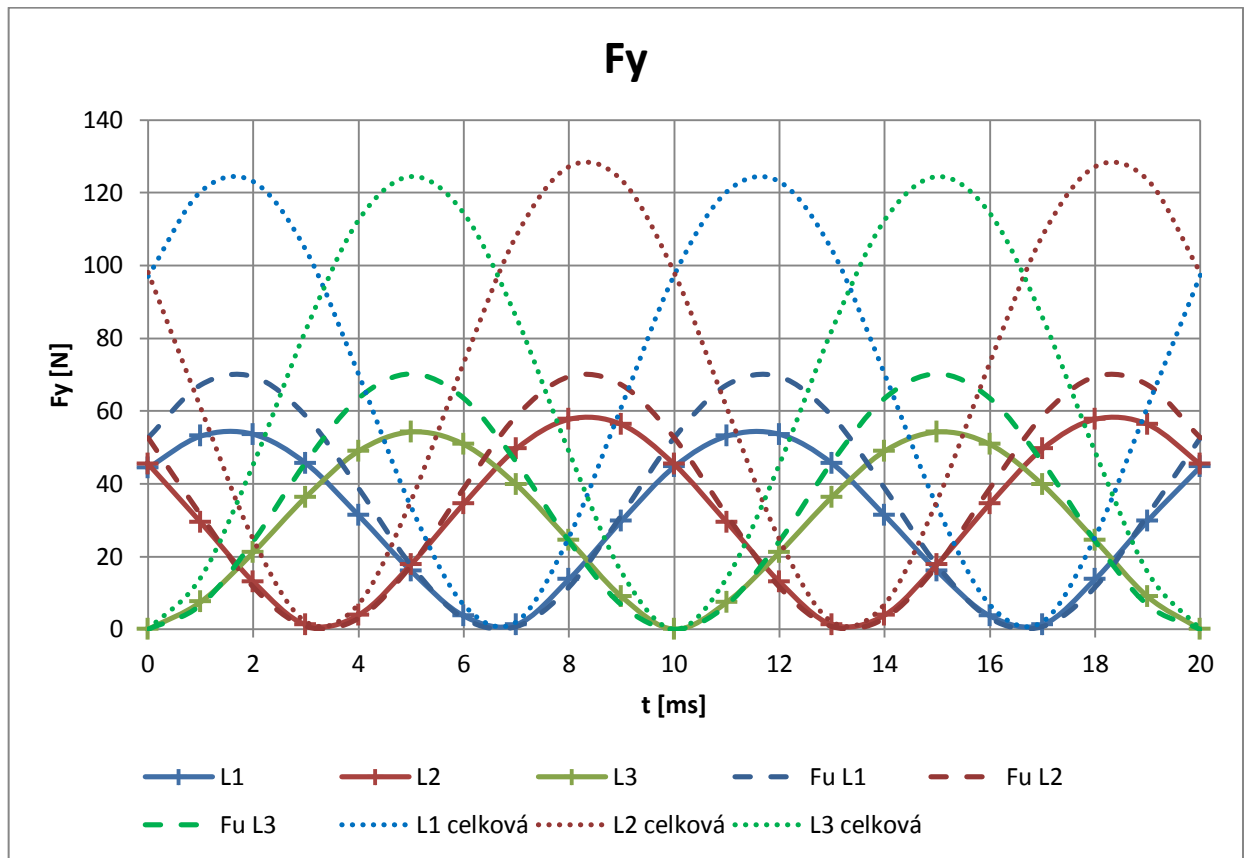
Graf.7.2.36 Průběhy sil Fy pro L1



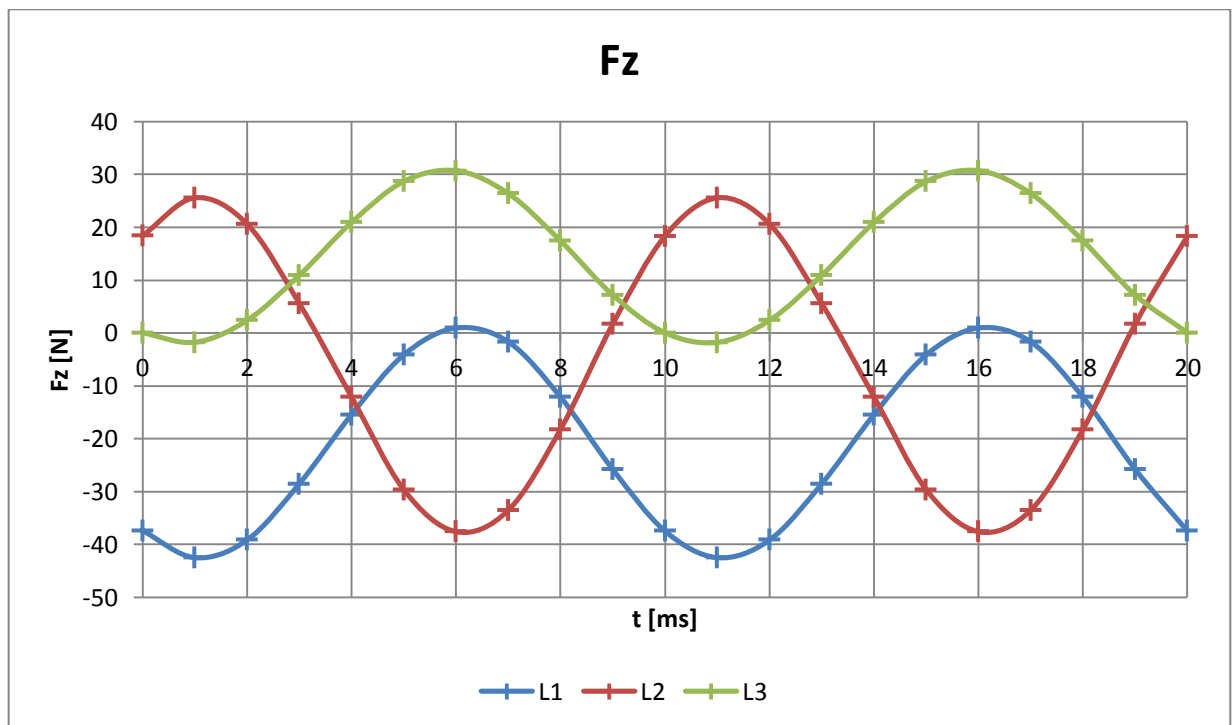
Graf.7.2.37 Průběhy sil  $F_y$  pro L2



Graf.7.2.38 Průběhy sil  $F_y$  pro L3

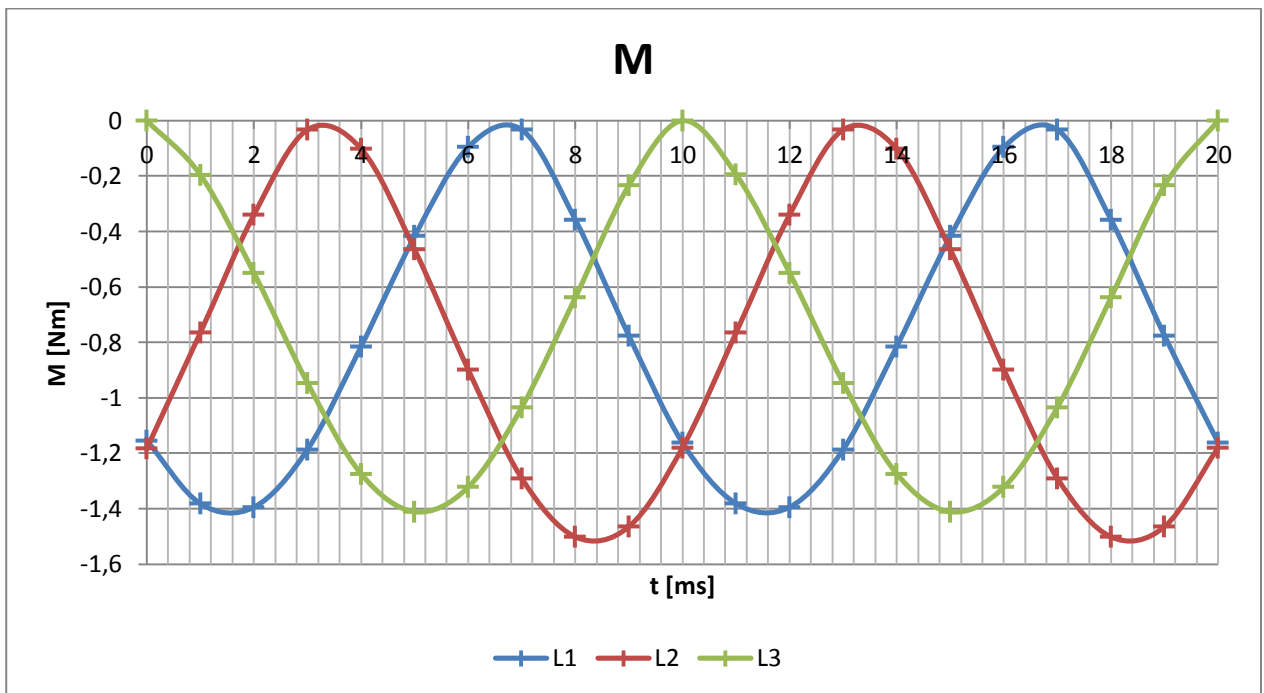


Graf.7.2.39 Průběhy sil F<sub>y</sub>



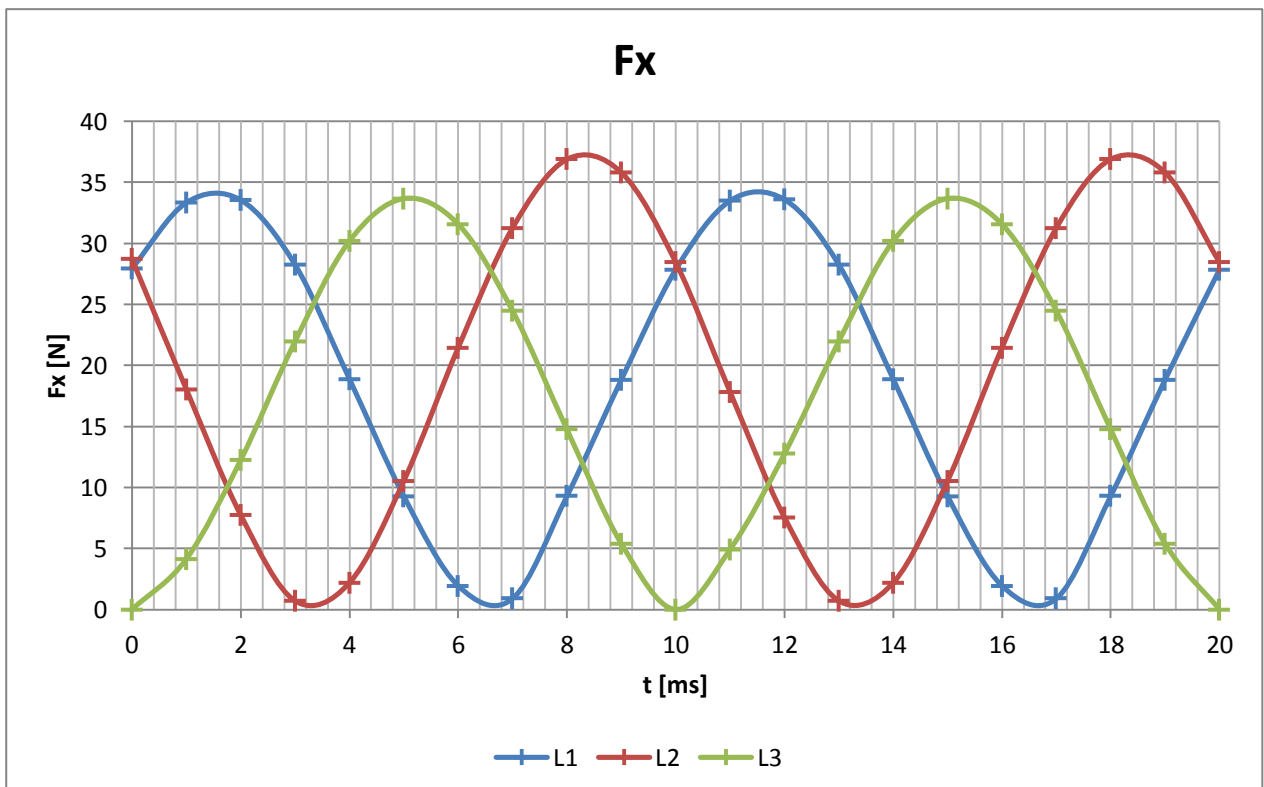
Graf.7.2.40 Průběhy sil F<sub>z</sub>



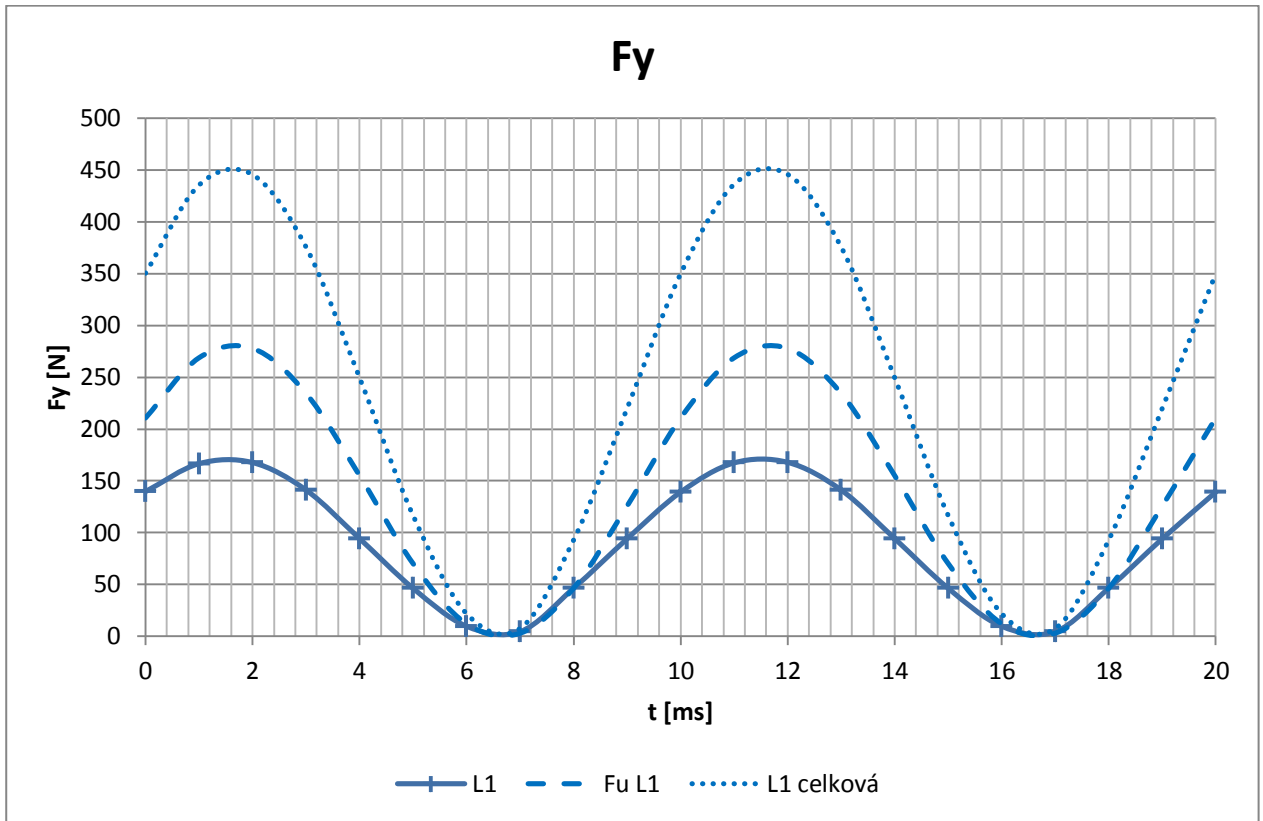
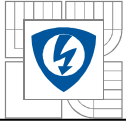


Graf.7.2.41 Průběhy momentů

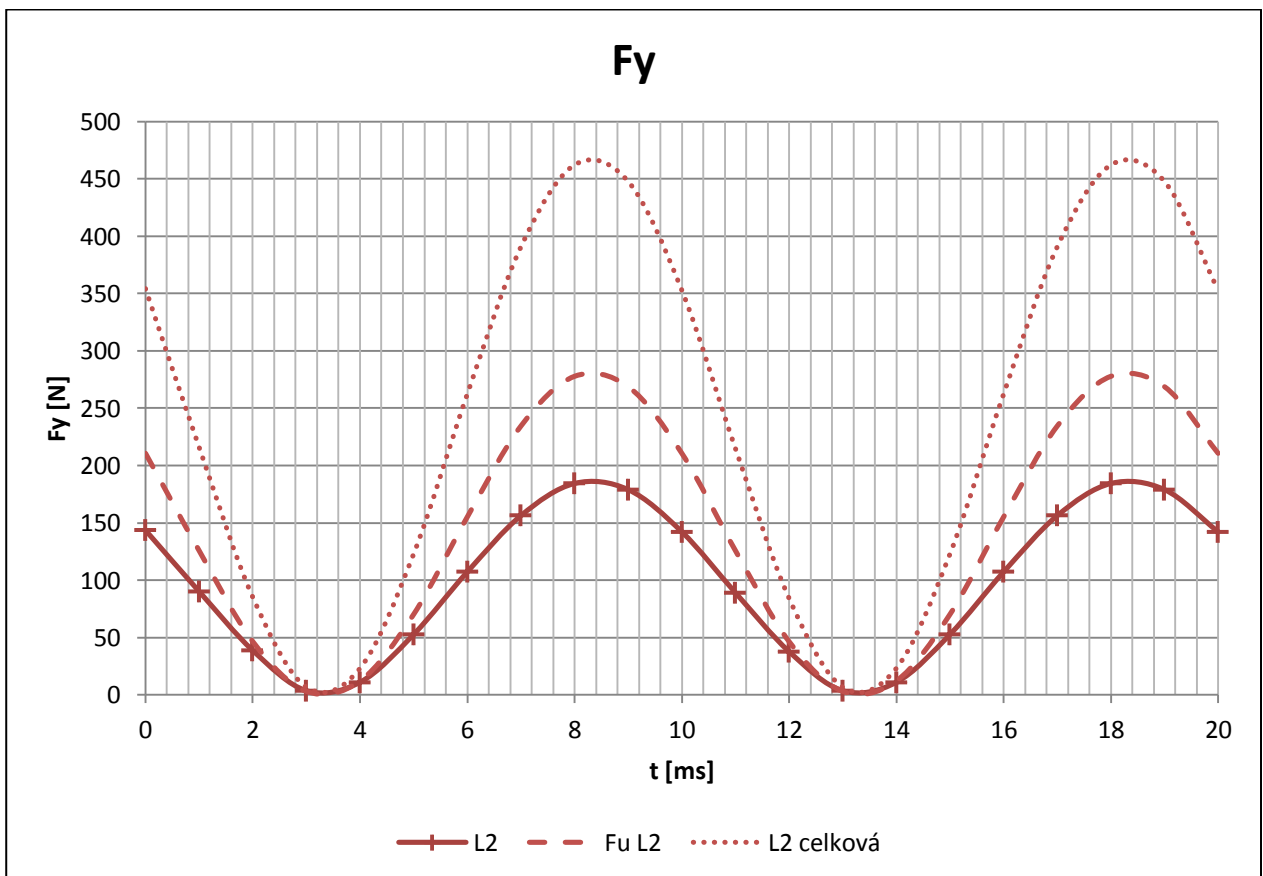
Průběhy proudů a momentů pro proud 20 kA jsou na grafech 7.2.42 až 7.2.48



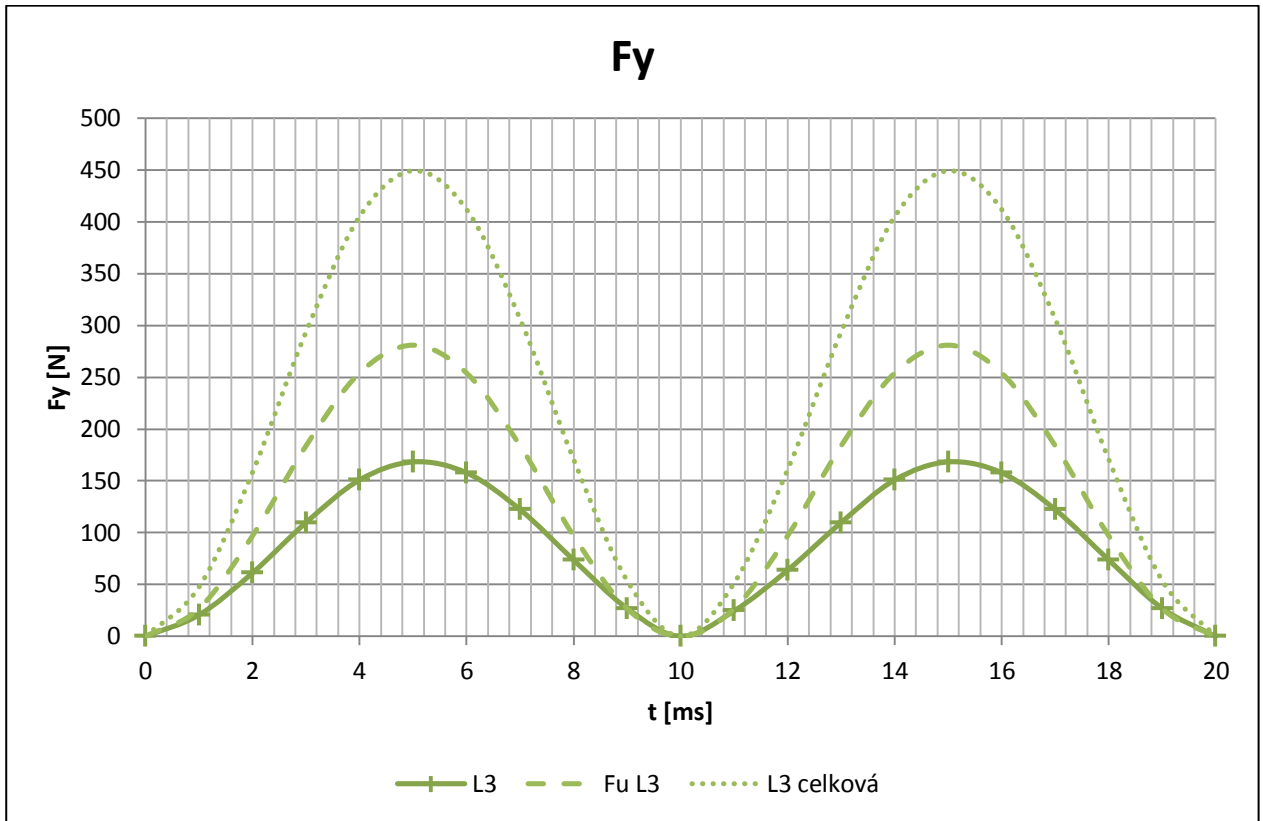
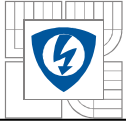
Graf.7.2.42 Průběhy sil Fx



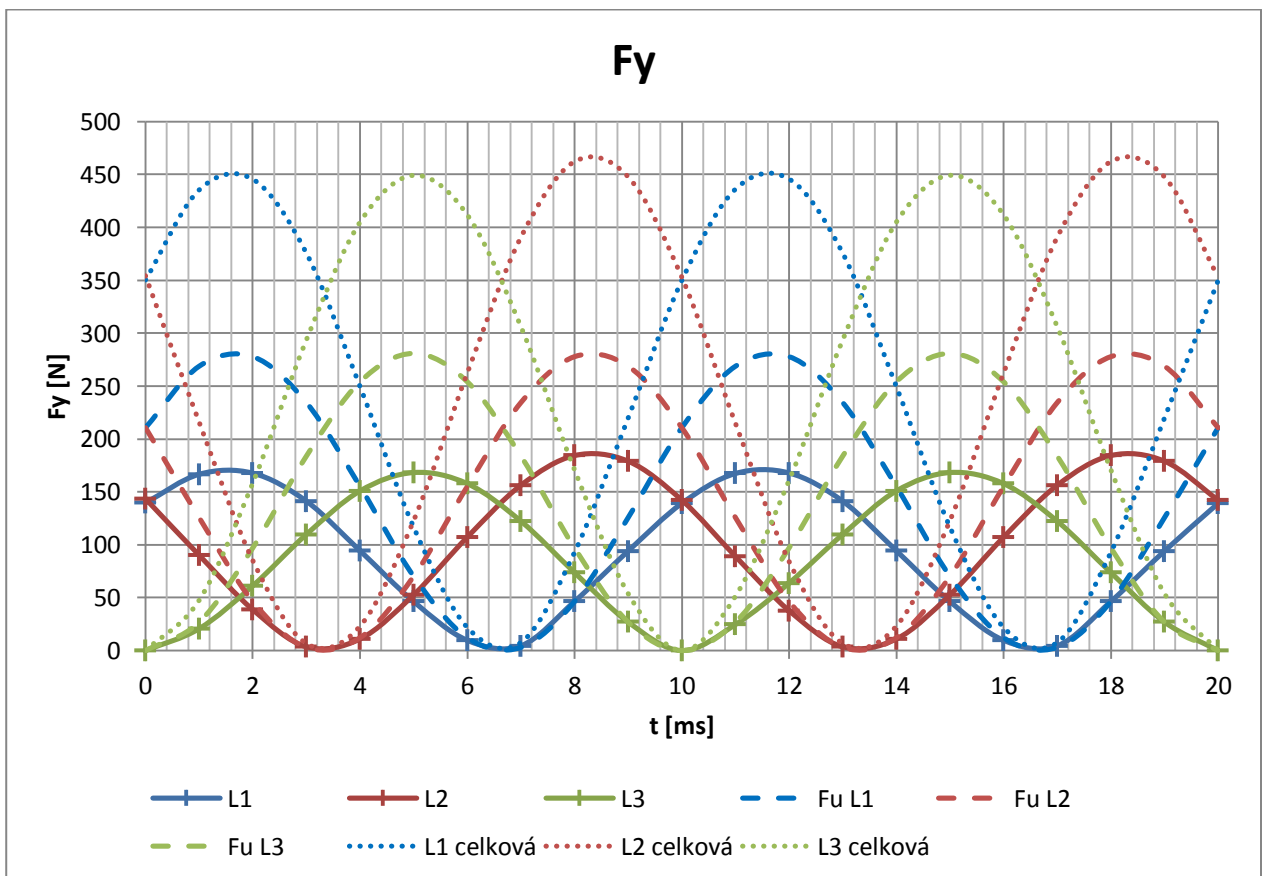
Graf.7.2.43 Průběhy sil F<sub>y</sub> pro L1



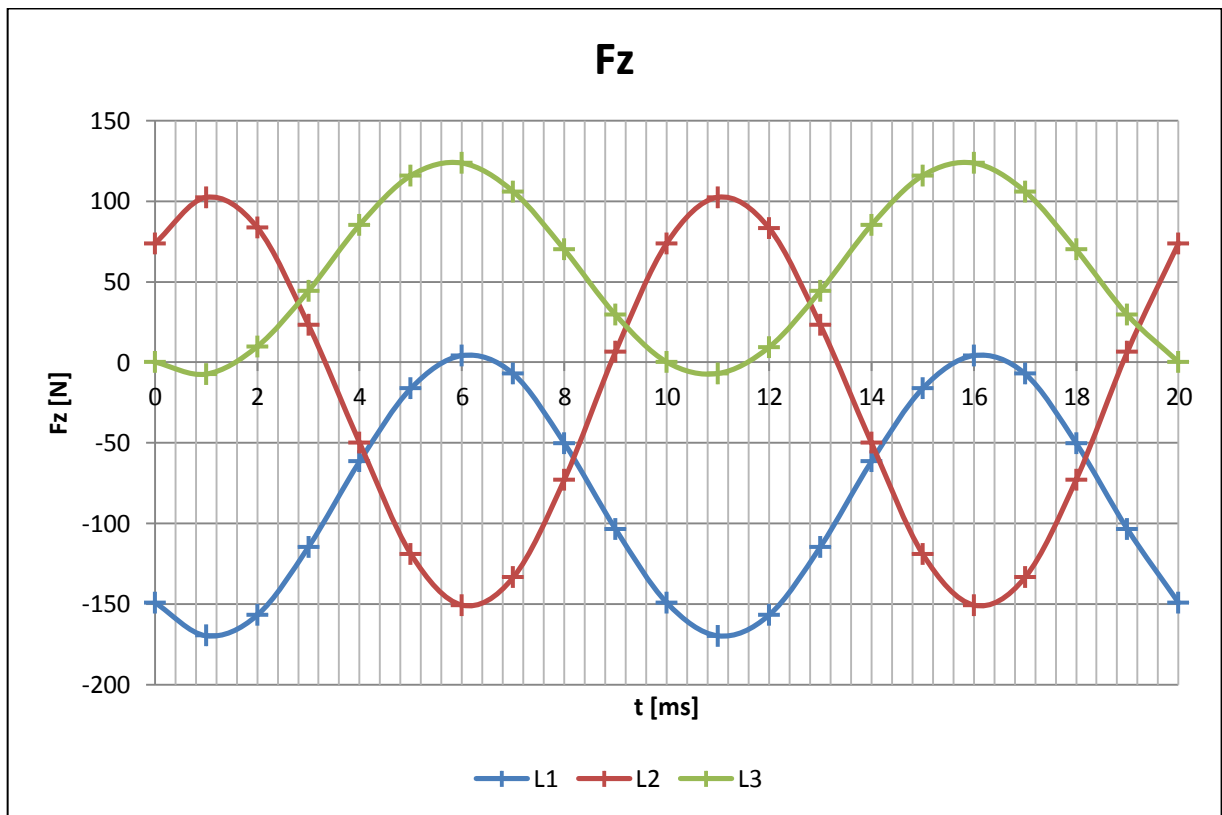
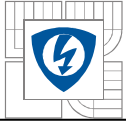
Graf.7.2.44 Průběhy sil F<sub>y</sub> pro L2



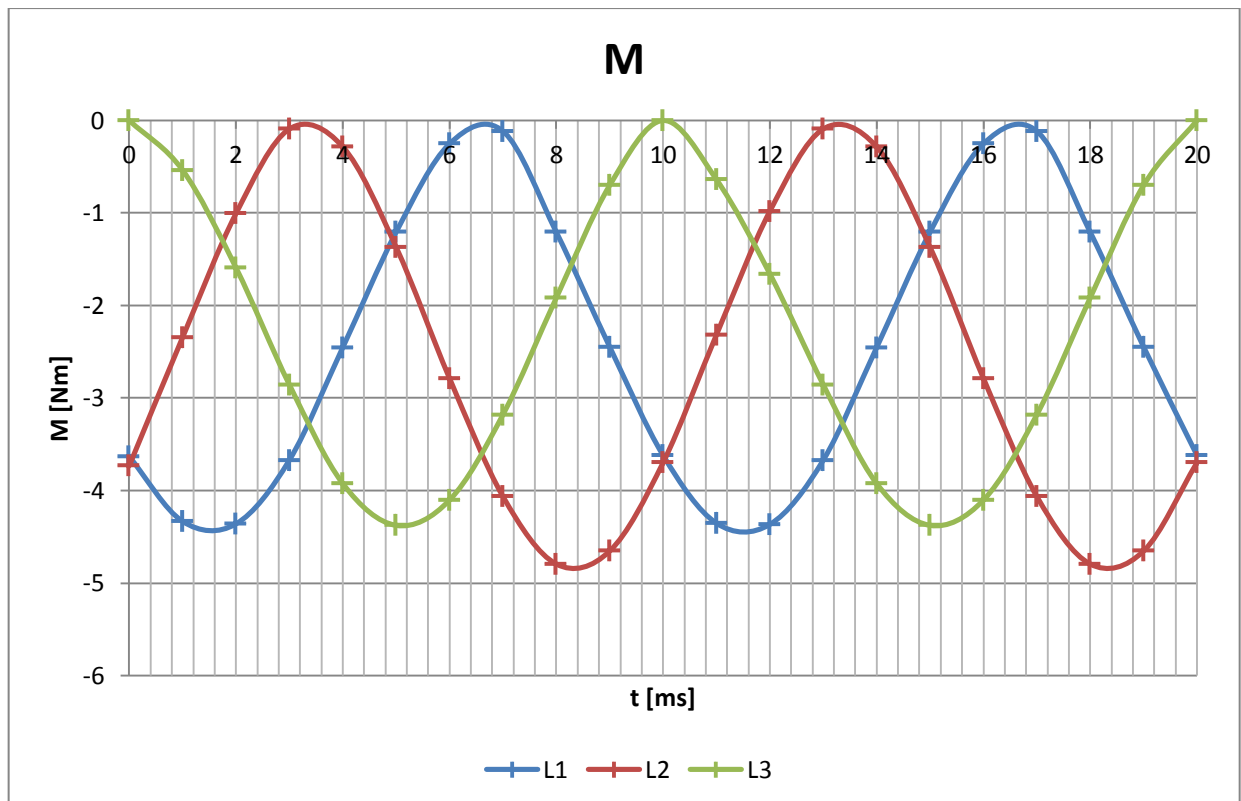
Graf.7.2.45 Průběhy sil  $F_y$  pro L3



Graf.7.2.46 Průběhy sil  $F_y$

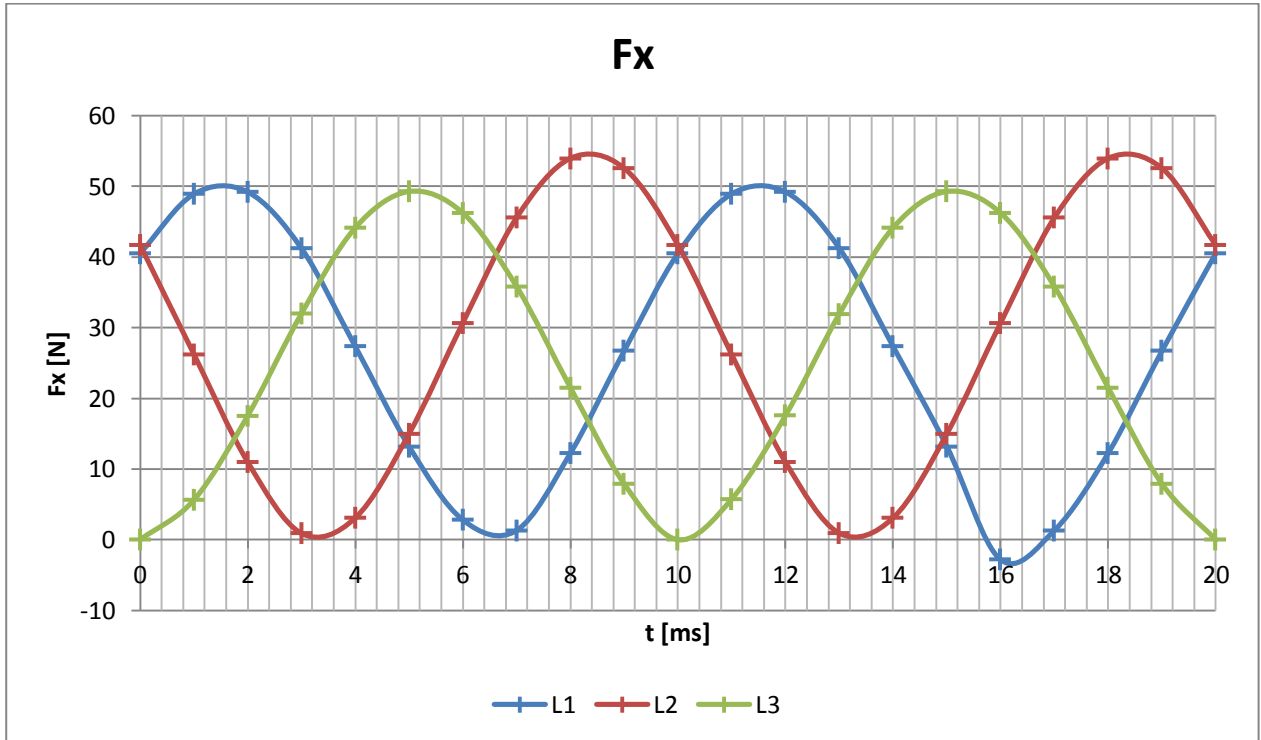


Graf.7.2.47 Průběhy sil Fz

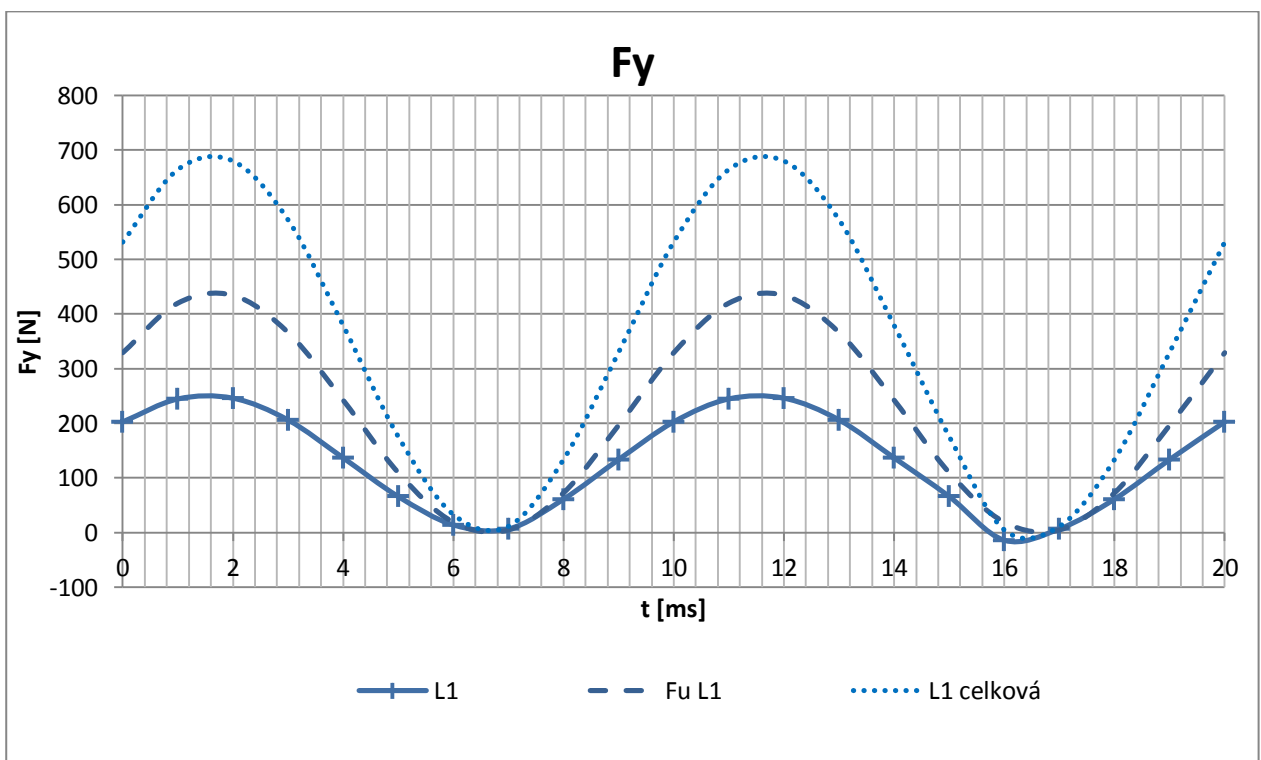


Graf.7.2.48 Průběhy momentů

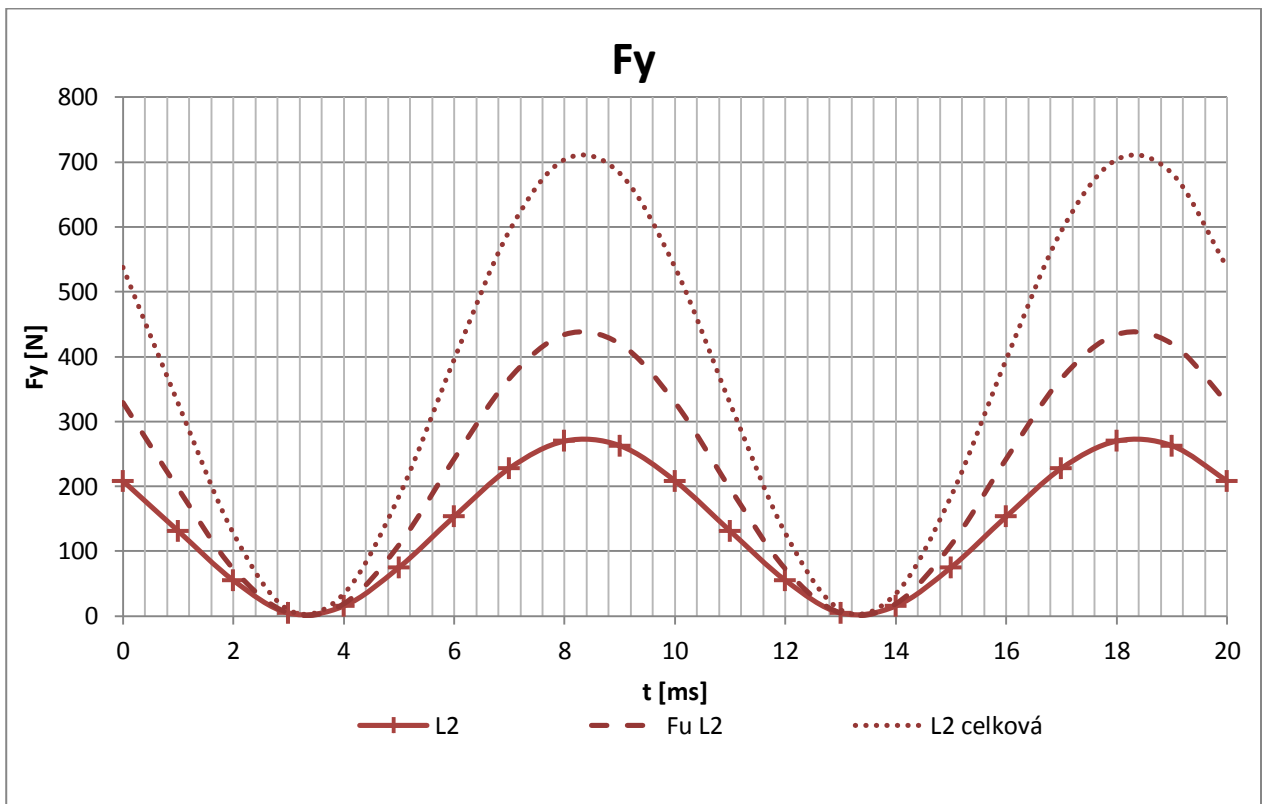
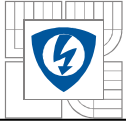
Průběhy proudů a momentů pro proud 25 kA jsou na grafech 7.2.49 až 7.2.55



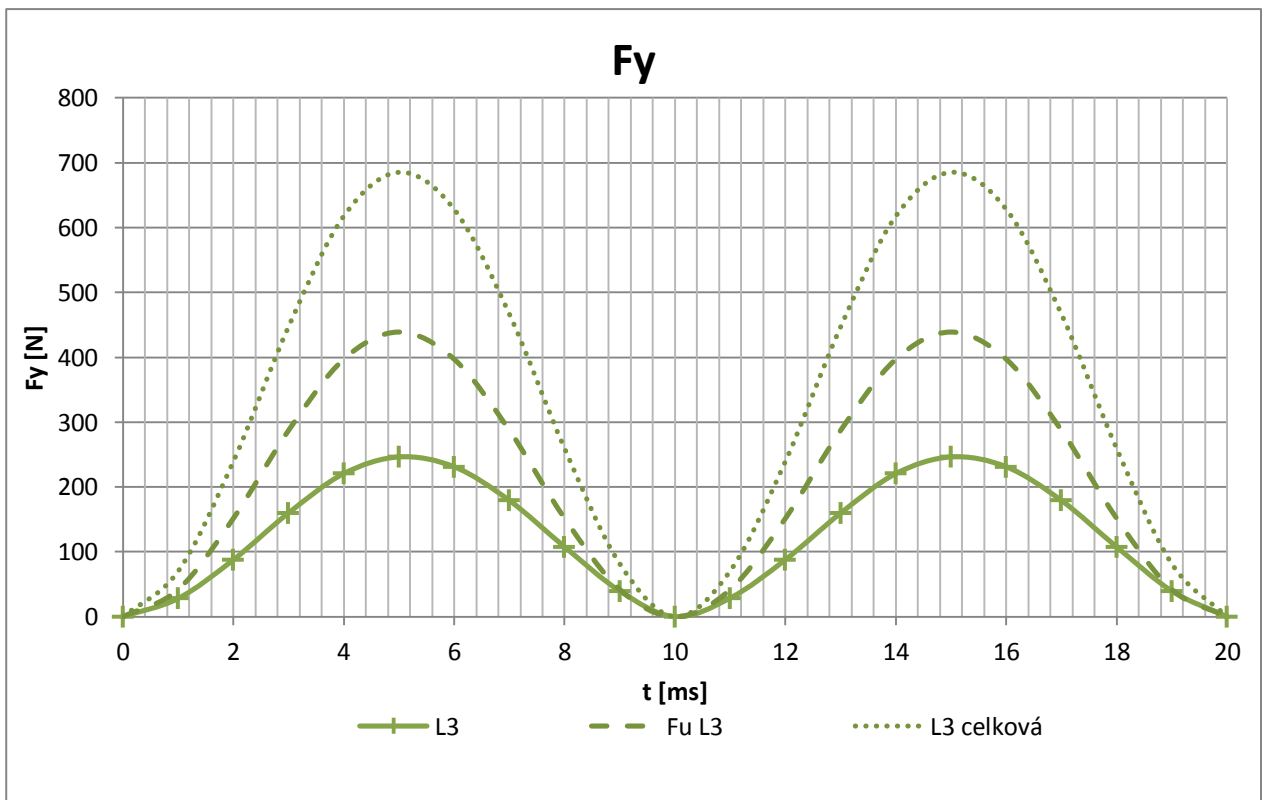
Graf.7.2.49 Průběhy sil Fx



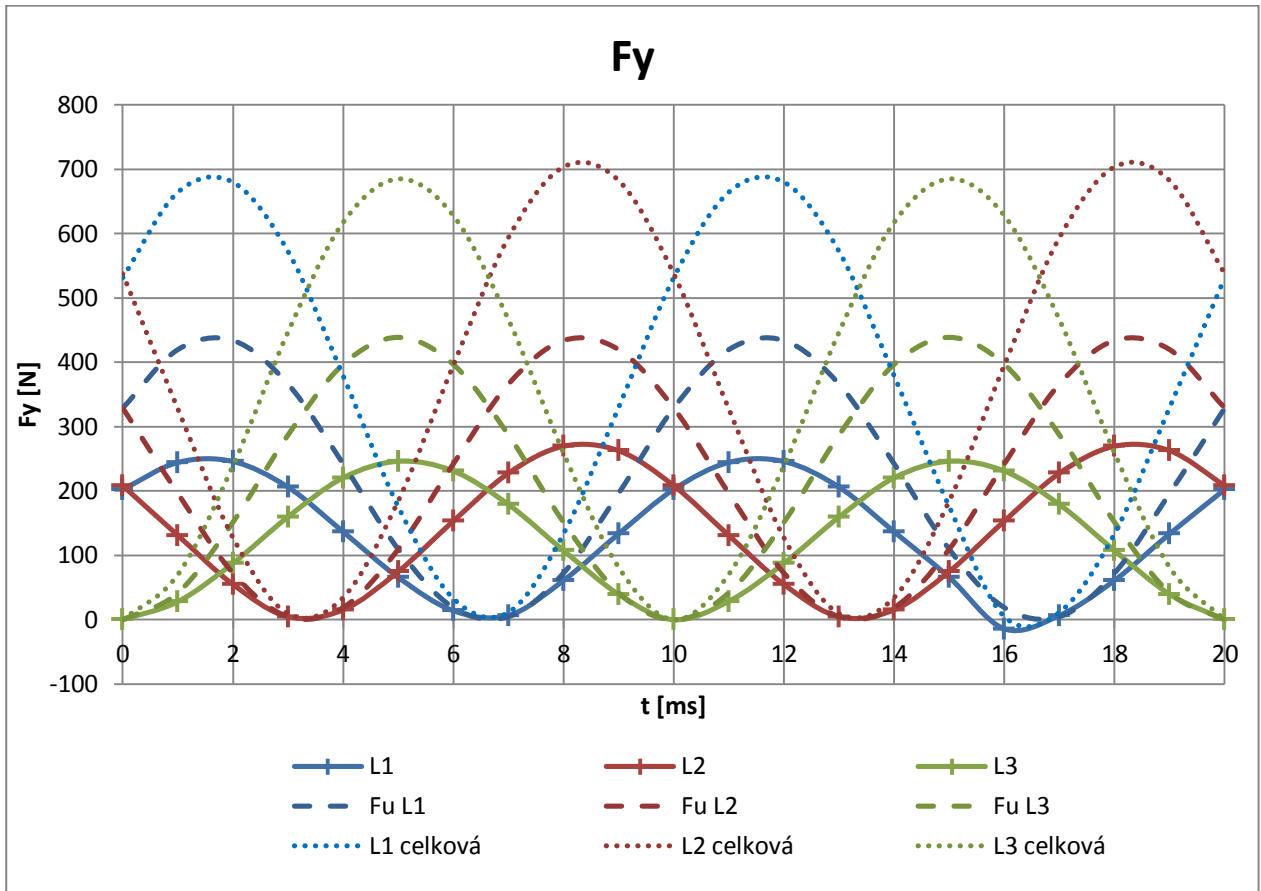
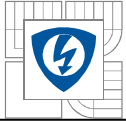
Graf.7.2.50 Průběhy sil Fy pro L1



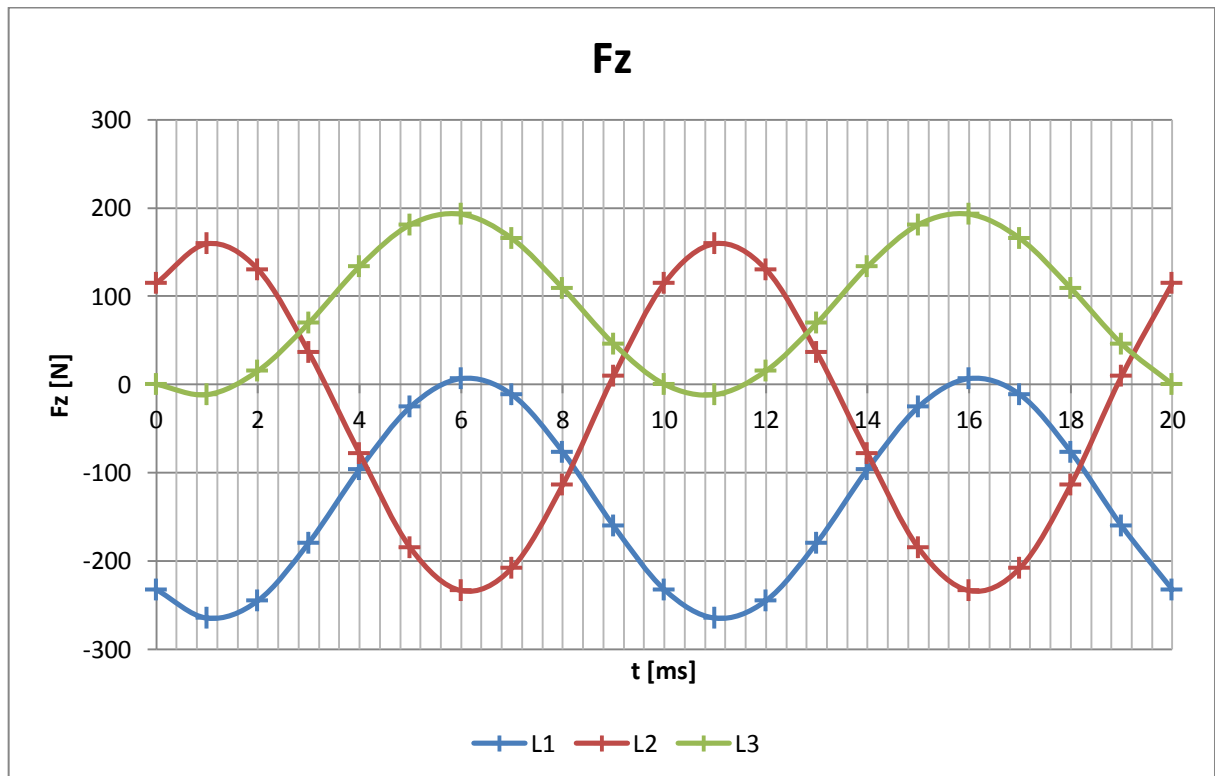
Graf.7.2.51 Průběhy sil  $F_y$  pro L2



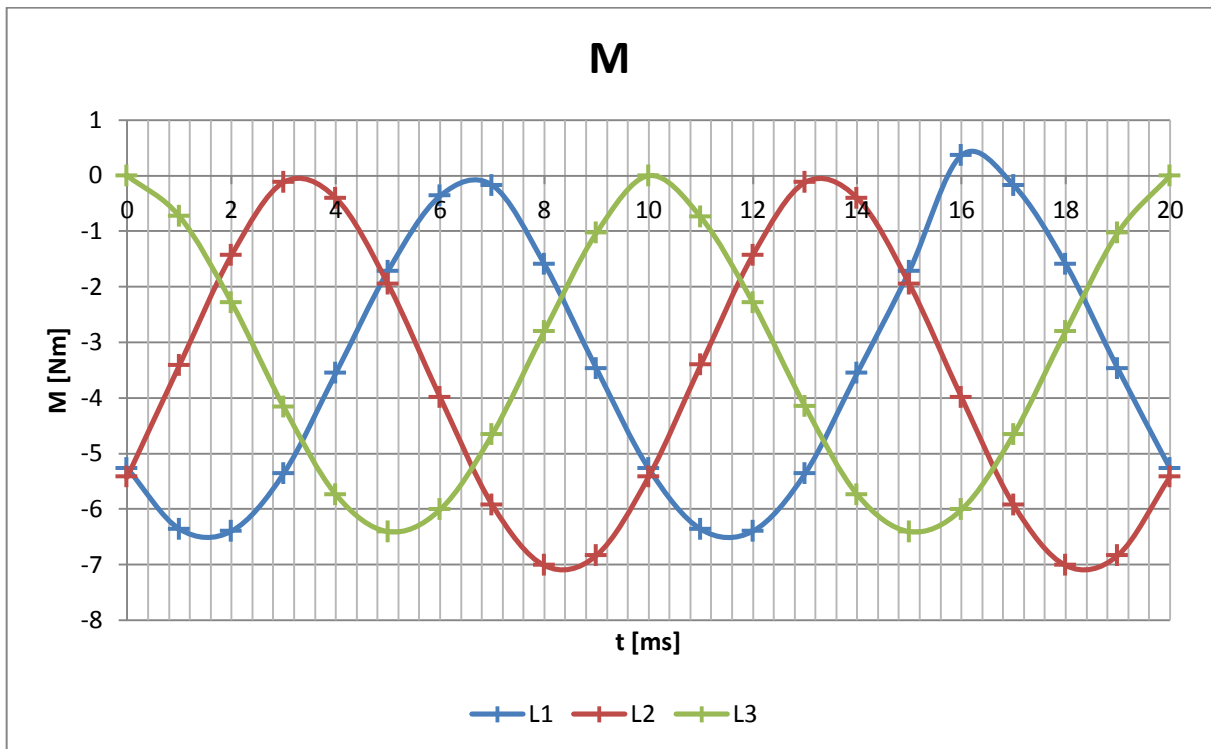
Graf.7.2.52 Průběhy sil  $F_y$  pro L3



Graf.7.2.53 Průběhy sil F<sub>y</sub>



Graf.7.2.54 Průběhy sil F<sub>z</sub>



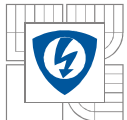
Graf.7.2.55 Průběhy momentů

V Tab. 7.2.7 jsou hodnoty sil a momentů při průchodu exponenciálně klesajícího proudu 15 kA – simulace zkratu.

Tab. 7.2.7: Hodnoty sil a momentů při průchodu exponenciálně klesajícího proudu

t [ms] 0				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	0	0	0	0
L2	0	0	0	0
L3	0	0	0	0
t [ms] 1				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	1,4534	7,2671	-1,984	-0,189
L2	0,613	3,0649	-4,488	-0,08
L3	3,2381	16,19	5,4155	-0,421





t [ms] 2				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	2,5648	12,824	-2,905	-0,333
L2	3,033	15,165	-23,27	-0,394
L3	8,8922	44,461	22,387	-1,156

t [ms] 3				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	2,2711	11,356	-0,17	-0,295
L2	7,645	38,225	-54,37	-0,994
L3	14,93	74,647	46,877	-1,941

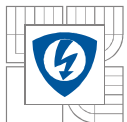
t [ms] 4				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	0,9325	4,6626	2,5169	-0,121
L2	14,465	72,325	-87,59	-1,881
L3	19,64	98,2	71,141	-2,554

t [ms] 5				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	0,03	0,15	-0,753	-0,004
L2	22,869	114,34	-109,8	-2,974
L3	21,554	107,77	86,829	-2,803

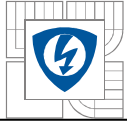
t [ms] 6				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	2,682	13,41	-16,96	-0,349
L2	31,33	156,65	-108	-4,074
L3	20,089	100,44	88,017	-2,612

t [ms] 7				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	8,1493	40,746	-47,74	-1,06
L2	37,419	187,09	-78,46	-4,865
L3	15,682	78,412	73,856	-2,039

t [ms] 8				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	15,276	76,381	-87,83	-1,986
L2	39,536	197,68	-27,66	-5,141

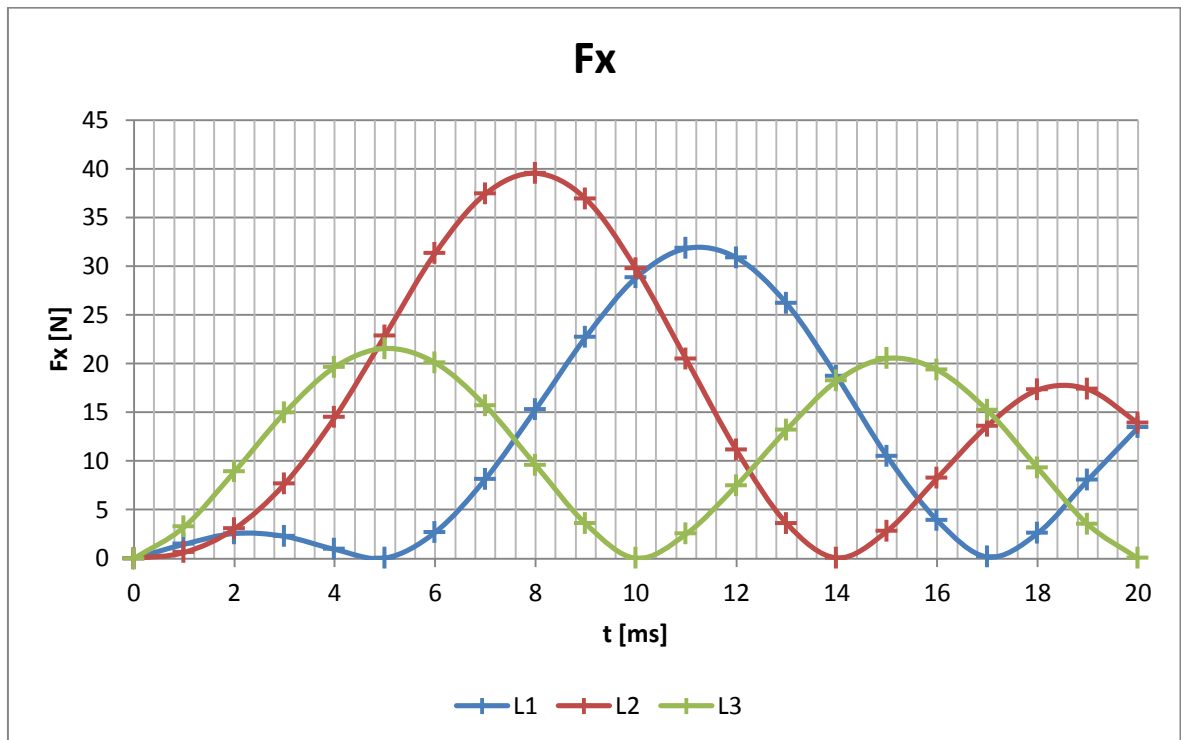
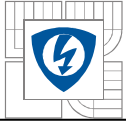


L3	9,5921	47,96	48,858	-1,247
t [ms] 9				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	22,724	113,62	-127,9	-2,955
L2	36,905	184,53	30,316	-4,799
L3	3,5563	17,781	21,805	-0,462
t [ms] 10				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	28,808	144,04	-156,5	-3,746
L2	29,763	148,81	77,263	-3,87
L3	0,0091	0,0455	0,2685	-0,001
t [ms] 11				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	31,819	159,1	-164,3	-4,137
L2	20,464	102,32	97,453	-2,661
L3	2,5051	12,526	-7,587	-0,326
t [ms] 12				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	30,878	154,39	-148,3	-4,015
L2	11,134	55,67	87,363	-1,448
L3	7,4817	37,408	-0,868	-0,973
t [ms] 13				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	26,169	130,84	-112,5	-3,403
L2	3,6066	18,033	49,845	-0,469
L3	13,201	66,007	17,271	-1,717
t [ms] 14				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	18,697	93,482	-67,11	-2,431
L2	0,0585	0,2923	1,359	-0,008
L3	18,224	91,121	38,426	-2,37
t [ms] 15				
	Fx	Fy	Fz	M

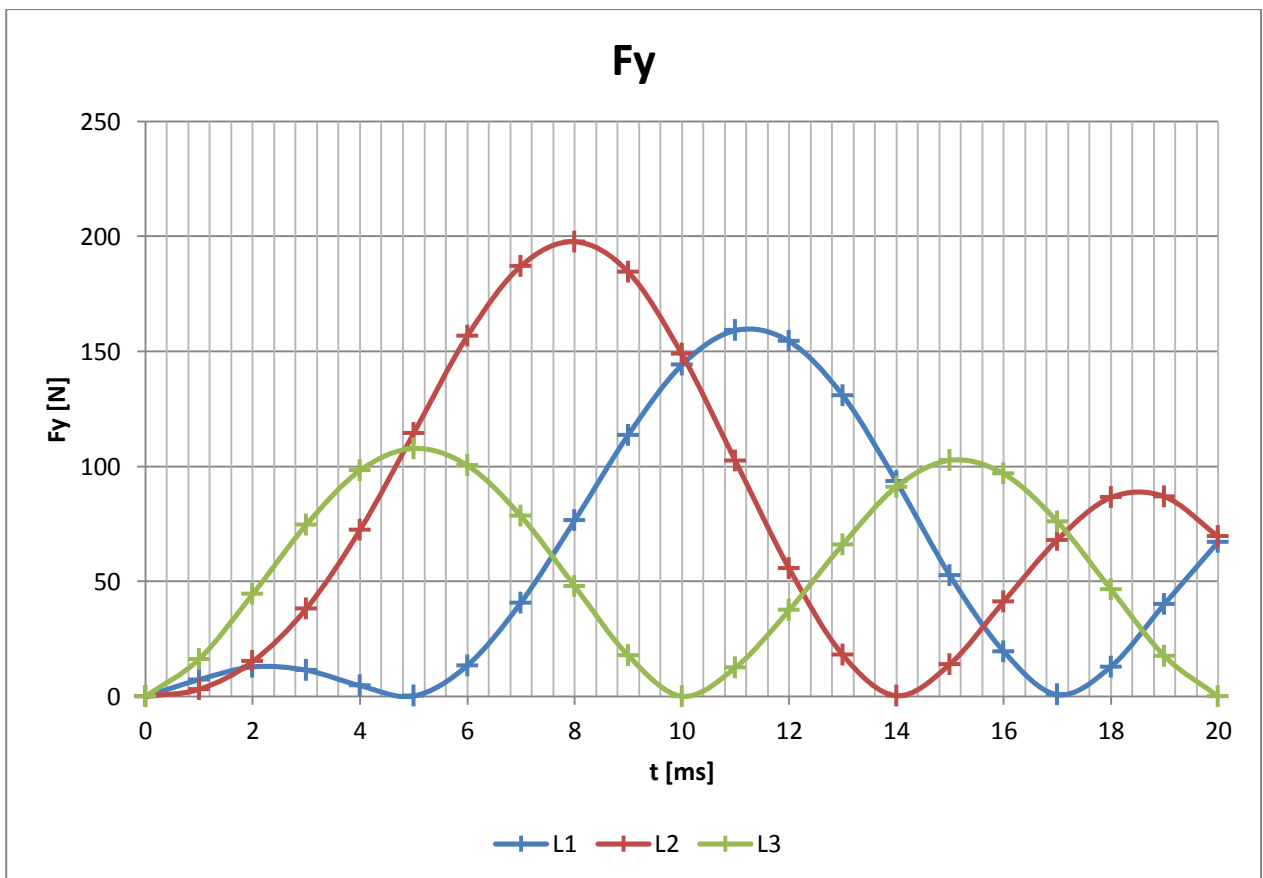


L1	10,502	52,509	-27,8	-1,366
L2	2,7988	13,994	-42,66	-0,364
L3	20,527	102,63	56,53	-2,669
t [ms] 16				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	3,9152	19,576	-2,961	-0,509
L2	8,2338	41,169	-69,41	-1,071
L3	19,361	96,804	62,443	-2,517
t [ms] 17				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	0,1503	0,7515	1,152	-0,02
L2	13,604	68,018	-68,31	-1,769
L3	15,206	76,028	54,43	-1,977
t [ms] 18				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	2,5791	12,895	-13,12	-0,335
L2	17,288	86,437	-42,37	-2,248
L3	9,3098	46,549	36,163	-1,211
t [ms] 19				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	8,0347	40,173	-38,6	-1,045
L2	17,366	86,829	-3,389	-2,258
L3	3,502	17,51	15,125	-0,455
t [ms] 20				
	Fx	Fy	Fz	M
L1	13,417	67,087	-62,6	-1,745
L2	13,9	69,498	30,733	-1,807
L3	0,0046	0,023	0,1635	-6E-04

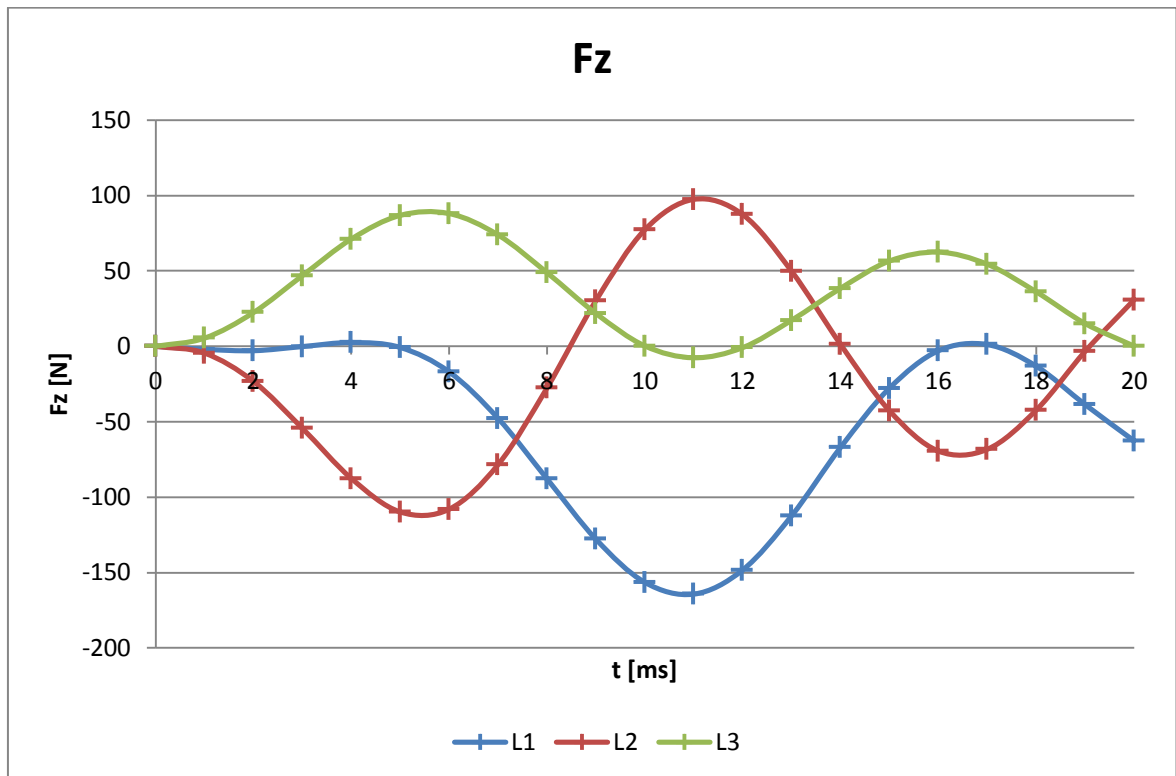
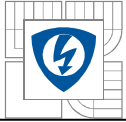
Průběhy proudů a momentů pro exponenciálně klesající proud 15 kA jsou na grafech 7.2.56 až 7.2.59



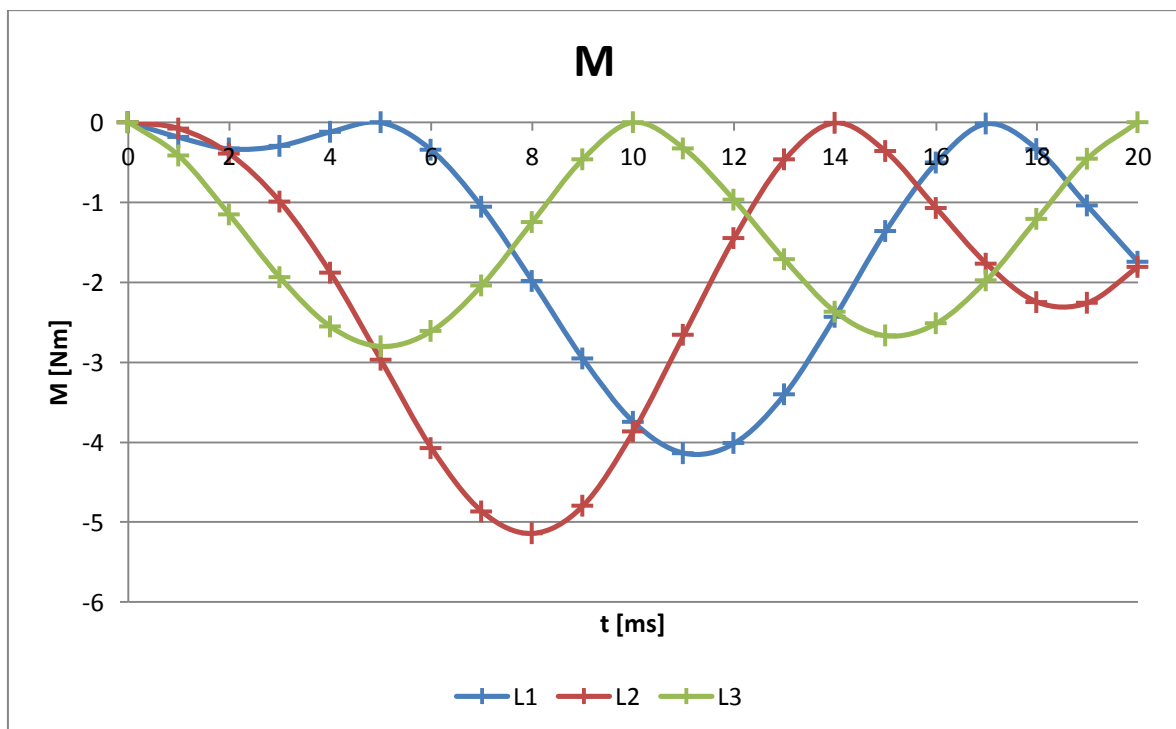
Graf 7.2.56: Průběhy sil  $F_x$



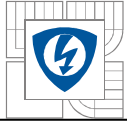
Graf 7.2.57 Průběhy sil  $F_y$



Graf 7.2.58 Průběhy sil  $F_z$



Graf 7.2.59 Průběhy momentů



## 8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá výpočtem elektrodynamických sil v proudovodné dráze jističe 160 A.

Na začátku práce jsou popsány dva základní jistící prvky – pojistka a jistič. Nalezneme zde jejich stručný popis a funkci.

Další kapitola (třetí) se zabývá materiály, které jsou běžně používány v elektrotechnice. Zvláštní podkapitola je věnována materiálům pro kontakty. Jsou v ní popsány nejvíce používané druhy materiálů, jako jsou čisté kovy, slitiny kovů a kompozitní materiály. Popsány jsou některé jejich vlastnosti, výhody i nevýhody.

Čtvrtá kapitola se zabývá vznikem elektrodynamických sil. Je zde vysvětlen vznik elektrodynamických sil, dále jsou zde rozebrány obecné případy, jako je vznik síly mezi dvěma vodiči, dále síly vyvolané střídavým proudem, síly vznikající v trojfázové soustavě, síly vznikající v jednoduchém a v složeném záhybu a nakonec síly v kontaktní úžině.

Pátá kapitola se zabývá konkrétním případem pro výpočet sil, a to jističem BC160 od firmy OEZ Letohrad. Je zde uveden stručný popis jeho parametrů. V další části je popsán a zobrazen zjednodušený model tohoto jističe a vysvětlení zjednodušení.

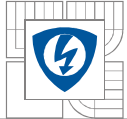
Šestá kapitola je věnována programu Maxwell, konkrétně analýzám a nastavení programu pro analýzy. Je popsáno nastavení materiálů modelu, vytvoření proudovodné dráhy, přiřazení proudů, nastavení parametrů výpočtu jako jsou síly a momenty. Nakonec je zde popsáno nastavení parametrů analýzy.

Poslední kapitola je věnována výsledkům měření.

Pro magnetostatickou analýzu jsou zde všechny hodnoty sil a momentů, jak pro jednopólový tak i pro třípólový model jističe. Jednotlivé průběhy těchto sil a momentů jsou v příslušných grafech. Jak je patrné z grafů, pro jednopólový model dosahu největších hodnot síla působící na kontakt ve směru osy  $y$  – působí tak rozpojení kontaktu. Naopak nejmenších hodnot dosahuje síla působící ve směru osy  $z$ . Je to způsobeno tím, že u jednopólového modelu nedochází k přitahování komponentů jinou silou, vznikající od průchodu proudu v další proudovodné dráze. Naproti tomu u modelu třípólového, dosahuje síla působící ve směru osy  $z$ , při průchodu proudů o velikosti 25 kA značných hodnot, a to nad 150 N. Jinými slovy, pohyblivé kontakty krajích pólů jsou namáhána silou ve směru osy  $z$  přes 150 N. Síly působící na kontakty ve směru osy  $x$  a  $y$  mají téměř shodnou velikost, ať se jedná o jedno nebo tři pólový model.

Pro tranzientní analýzu jednopólového modelu jsou opět uvedeny všechny hodnoty sil a momentů v tabulkách a jim odpovídající průběhy jsou zobrazeny v příslušných grafech.

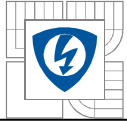
Pro tranzientní analýzu třípólového modelu jsou pro ukázkou uvedeny pouze hodnoty při proudu 15 kA, a to z důvodu velkého množství hodnot. Grafy jsou však uvedeny pro všechny proudy. Z grafů pro průběhy sil ve směru osy  $x$  je patrné, že síly mají shodný průběh s průběhem sinusového proudu. Z grafů pro průběhy sil ve směru osy  $z$  je patrné, že velikosti sil v prostřední fázi (L2) jsou dvojnásobné, oproti silám v krajních fázích (L1 a L2).



Na grafech pro průběhy sil ve směru osy  $y$  vidíme síly  $F_y$  resp.  $L1/L2/L3$ ,  $F_u$  a  $F_{celková}$ . Síla, která je přepočítána z momentu  $M$  působící na rameno pohyblivého kontaktu je označena  $F_y$  u jednopólového modelu a  $L1/L2/L3$  u třípólového modelu. Síla od kontaktní úžiny je označena  $F_u$ . Celková síla působící ve směru osy  $y$  je označena  $F_{celková}$ .

Z grafů je patrné, že pro proud 5 kA je síla  $F_u$ , která vzniká od kontaktní úžiny menší, než síla, která je přepočtena z momentu působící na rameno kontaktu. U proudů 10 kA, 15 kA, 20 kA a 25 kA je však síla vzniklá od kontaktní úžiny větší, než síla přepočtená z momentu působící na rameno kontaktu.

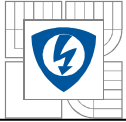
Z grafů je dále patrné, že dochází k omezení síly vzniklé při průchodu elektrického proudu. Nejlépe je to vidět na grafu, který zobrazuje průběh síly při průchodu stejnosměrných proudů (Graf 7.1.6). Při průchodu proudů 5 kA vzniká síla cca 10N. Vzorec pro výpočet síly obsahuje kvadrát proudu. Podle toho by síla, vzniklá při průchodu proudu a velikosti 25 kA měla dosahovat 25-ti násobku síly, která vznikne při průchodu proudu o velikosti 5 kA, tzn. 250 N. vzniklá síla však dosahuje velikosti „pouze“ cca 105N. to je způsobeno nejspíš nasycením materiálů proudovodné dráhy a zhášecí komory.



## LITERATURA

- [1] HAVELKA, Otto, Bohuslav DUBRAVEC, Boleslav GROSS, Vladimír HOMA a Vladimír NOVOTNÝ. *Elektrické přístroje*. První. Praha: SNTL, 1985. ISBN 04 - 529 - 85.
- [2] VALENTA, Jiří. *Diagnostika a jištění elektrických zařízení (MDJZ)* [Elektronické učební texty]. 2013, 152 str.
- [3] DOSTÁL, L. *Simulace nadproudové spouště jističe*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 43 s.
- [4] OEZ. *Kompaktní jističe Modeion: BC160*. Dostupné z: [www.oez.cz/produkty/bc160-kompaktni-jistice](http://www.oez.cz/produkty/bc160-kompaktni-jistice)
- [5] OEZ. *Kompaktní jističe Modeion: BC160*. Dostupné z: [www.oez.cz/produkty/arion-w113-vzduchove-jistice-a-odpinace](http://www.oez.cz/produkty/arion-w113-vzduchove-jistice-a-odpinace)
- [6] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.: Fyzika. *Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Část 3: Elektrina a magnetismus*. Brno a Praha: VUTIUM a Prometheus, 2000, ISBN 80-214-1868-0.
- [7] HAVELKA, O; VÁVRA, Z; SVOBODA D. Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I. První. Brno: VUT, 1985. ISBN 55 – 555/1 - 85.
- [8] BUŠOV, Bohuslav. *Stavba a výroba elektrických přístrojů (MSVP)* [Elektronické učební texty]. 2013
- [9] HLUBINKA, D. *Dimenzování proudovodné dráhy v elektrických přístrojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 82 s.
- [10] LIPTÁK, Jan a Josef SEDLÁČEK. Úvod do elektrotechnických materiálů. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 168 s. ISBN 80-01-03191-8.
- [11] OULEHLA, Jiří. Materiály v elektrotechnice a elektronice. Brno: Vojenská akademie, 1998, S. v, 245-488.
- [12] VALENTA, Jiří. *Stavba a výroba elektrických přístrojů (MSVP)* [Elektronické učební texty, přednášky]. 2013





## PŘÍLOHY

Příloha tohoto souboru obsahuje tyto části:

- Hodnoty sil a momentů pro střídavý proud 5 kA
- Hodnoty sil a momentů pro střídavý proud 10 kA
- Hodnoty sil a momentů pro střídavý proud 20 kA
- Hodnoty sil a momentů pro střídavý proud 25 kA
- Hodnoty sil a momentů pro střídavý proud 5 kA
- Hodnoty sil a momentů pro střídavý proud 10 kA
- Hodnoty sil a momentů pro střídavý proud 15 kA
- Hodnoty sil a momentů pro střídavý proud 20 kA
- Hodnoty sil a momentů pro střídavý proud 25 kA