

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. Tomáš Benčo



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL PŮSOBÍCÍCH NA PROUDOVODNOU DRÁHU SPÍNACÍHO PŘÍSTROJE

CALCULATION OF ELECTRODYNAMIC FORCES ACTING ON CURRENT PATH OF A SWITCHING DEVICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Benčo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO 2019



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Tomáš Benčo

ID: 154679

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet elektrodynamických sil působících na proudovodnou dráhu spínacího přístroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

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

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 198
- [2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I, VUT v Brně, 1985
- [3] ČSN EN 60947-2 ed. 3 - Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 2: Jističe

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

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

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práca je zameraná na výpočet elektrodynamických síl, ktoré pôsobia na kontakty kompaktného ističa Siemens 3VA5 od firmy OEZ Letohrad. Táto práca je rozčlenená do desiatich kapitol. V úvodnej kapitole je popísané, prečo je dôležité zaoberať sa výpočtom elektrodynamických síl a konštrukčným usporiadaním prúdovodnej dráhy. V druhej kapitole je popísaná problematika vzniku a pôsobenia elektrodynamických síl na jednotlivé časti elektrického prístroja. V tretej kapitole sú opísané parametre, vlastnosti a konštrukčné usporiadanie ističa Siemens 3VA5. V štvrtej kapitole je opísaná problematika Metódy konečných prvkov. V piatej kapitole je popísaný postup vytvorenia 3D modelu prúdovodnej dráhy v programe Solidworks. Šiesta až deviata kapitola je zameraná na stacionárny výpočet momentov v programe Ansys Maxwell pomocou Magnetostatickej analýzy a na výpočet celkovej odpudivej sily v kontaktnom styku s uvažovaním vplyvu feromagnetických materiálov. Posledná kapitola je zameraná na dynamický výpočet momentov a síl pôsobiacich na kontakty v určitom časovom intervale.

Kľúčová slova

Istič Siemens 3VA5; elektrodynamické sily; kontakty; odpudivá sila; prúdovodná dráha; Ansys Maxwell

Abstract

The master thesis is focused on the calculation of electrodynamic forces acting on the contacts of the moulded case circuit breaker Siemens 3VA5 from OEZ Letohrad. This work is divided into ten chapters. In the introductory chapter it is described why it is important to deal with the calculation of the electrodynamic forces and the design of the current path. The second chapter describes the problem of the origin and effect of electrodynamic forces on individual parts of the electrical device. The third chapter describes the parameters, properties and design of the 3VA5 Siemens circuit breaker. The fourth chapter describes the Finite Element Methods. The fifth chapter describes how to create a 3D current path model in Solidworks. The sixth to ninth chapter is focused on the stationary calculation of moments in the program Ansys Maxwell by means of Magnetostatic Analysis and on the calculation of the total repulsive force between contacts with the influence of ferromagnetic materials. The last chapter is focused on dynamic calculation of moments and forces acting on contacts in a certain time interval.

Keywords

Circuit breaker Siemens 3VA5; electrodynamic forces; contacts; repulsive force; Ansys Maxwell

Bibliografická citace:

BENČO, Tomáš. *Výpočet elektrodynamických sil působících na proudovodnou dráhu spínacího přístroje* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119723>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jiří Valenta.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočet elektrodynamických sil působících na proudovodnou dráhu spínacího přístroje 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **22. května 2019**

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne: **22. května 2019**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	16
2	silové účinky elektrického prúdu	16
2.1	Sily elektrodynamické obecne	16
2.2	Vznik elektrodynamických síl.....	17
2.3	Sily medzi niekoľkými prúdovodnými dráhami	18
2.3.1	Prúdovodné vlákna s nekonečnou dĺžkou.....	18
2.3.2	Prúdovodné vlákna s reálnou dĺžkou	20
2.3.3	Prúdovodné vlákna s reálnymi prierezmi	22
2.4	Elektrodynamické sily v zakrivenej prúdovej dráhe.....	23
2.4.1	Pravouhlý záhyb vodiča.....	23
2.4.2	Dvojitý pravouhlý záhyb	24
2.5	Sily vyvolané zmenou prierezu vodiča	25
2.6	Odpudivé sily medzi kontaktmi	26
2.7	Príťažlivá sila od blízkeho feromagnetického materiálu.....	27
2.8	Charakter elektrodynamických síl.....	29
2.8.1	Pôsobenie jednosmerného prúdu	29
2.8.2	Pôsobenie striedavého prúdu	29
3	Kompaktný istič Siemens 3VA5.....	32
3.1	Funkcie ističa nízkeho napätia	32
3.2	Popis ističa 3VA5.....	32
3.3	Konštrukcia ističa 3VA52.....	34
3.3.1	Kazeta s kontaktným systémom	34
3.3.2	Spínací systém	36
3.3.3	Termomagnetická spúšť TM 230.....	37
4	Metóda konečných prvkov	40
5	Model prúdovodnej dráhy ističa.....	40
6	Stacionárny výpočet sily v programe ansys maxwell	42
6.1	Postup simulácie v programe Ansys Maxwell.....	42
6.1.1	Nastavenie materiálov.....	43
6.1.2	Nastavenie okrajových podmienok.....	45
6.1.3	Nastavenie prúdov	46

6.2	Výpočet momentu	46
6.3	Výpočet elektrodynamických síl	48
6.4	Rozloženie sily F na zložky F_x a F_y	49
6.5	Výpočet odpudivej sily F_u v prúdovodnej úžine.....	50
6.6	Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk}	51
6.7	Zhodnotenie výsledkov	52
7	Stacionárny výpočet síl s uvažovaním vplyvu feromagnetických materiálov .	53
7.1	Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} pre 1. prípad	53
7.2	Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} pre 2. prípad (V)	54
7.3	Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} pre 3. prípad (P)	55
7.4	Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} pre 4. prípad (P+V).....	56
7.5	Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} pre 5. prípad (P+V+SS)	56
7.6	Zhodnotenie výsledkov	57
8	Stacionárny výpočet síl pri elektrickom oblúku.....	59
8.1	Moment a sily pôsobiace pri elektrickom oblúku	59
8.1.1	Výpočet momentu a síl pre 1. prípad	60
8.1.2	Výpočet momentu a síl pre 2. prípad (V)	61
8.1.3	Výpočet momentu a síl pre 3. prípad (P)	62
8.1.4	Výpočet momentu a síl pre 4. prípad (P+V).....	64
8.1.5	Výpočet momentu a síl pre 5. prípad (P+V+SS)	65
8.2	Vplyv zhášacej komory na elektrický oblúk	66
8.2.1	Výpočet síl pôsobiacich na el. oblúky pre 1. prípad	66
8.2.2	Výpočet síl pôsobiacich na el. oblúky pre 2. prípad	68
8.2.3	Výpočet síl pôsobiacich na el. oblúky pre 3. prípad	69
8.3	Zhodnotenie výsledkov	70
9	stacionárny výpočet momentov – Magnetostatická analýza.....	72
9.1	Výpočet momentov pre 1. prípad.....	74
9.2	Výpočet momentov pre 2. prípad.....	75
9.3	Zhodnotenie výsledkov	77
10	dynAmický výpočet momentov a síl – tranzientná analýza.....	78
10.1	Postup simulácie.....	79
10.2	Striedavý prúd 9 kA.....	83

10.3	Striedavý prúd 21 kA.....	89
10.4	Striedavý prúd 30 kA.....	94
10.5	Výsledky z Tranzientnej analýzy	103
10.6	Zhodnotenie výsledkov	108
11	Záver	110
12	Prílohy	112

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Silové pôsobenie magnetického poľa.....	17
Obr. 2-2 Silové pôsobenie magnetického poľa na prúdovodič.....	18
Obr. 2-3 Dva vodiče ľubovoľne umiestnené v priestore [3].....	19
Obr. 2-4 Sila medzi dvoma prúdovodnými vláknami nekonečnej dĺžky [3].....	19
Obr. 2-5 Indukcia v bode A od prúdového vlákna konečnej dĺžky [3]	20
Obr. 2-6 Sila medzi dvoma prúdovodnými vláknami konečnej dĺžky [3].....	20
Obr. 2-7 Súmerné usporiadanie dvoch rozdielne dlhých prúdových vlákien [3]	21
Obr. 2-8 Nesúmerné usporiadanie dvoch rozdielne dlhých prúdových vlákien [3] .	21
Obr. 2-9 Závislosť činiteľa tvaru prierezu vodiča na usporiadaní prúdovodičov [3]	22
Obr. 2-10 Priebeh sily pôsobiacej na pravouhlý L záhyb [1][3]	23
Obr. 2-11 Priebeh sily pôsobiacej na spodný úsek dvojitého pravouhlého záhybu [3]	24
Obr. 2-12 Sila vznikajúca pri zmene prierezu prúdovodnej dráhy [3]	25
Obr. 2-13 Odpudivé sily v prúdovej úžine [3].....	26
Obr. 2-14 Príťažlivá sila pôsobiaca na prúdovodič v blízkosti feromagnetika [3]...	27
Obr. 2-15 Sila vtáhujúca oblúk do ocelevej roštovej komory [3]	28
Obr. 2-16 Typy oceľových plechov zhášacej komory [3]	28
Obr. 2-17 Priebeh sily pri striedavom prúde [3].....	30
Obr. 2-18 Priebeh sily pri prechode skratového prúdu [3]	31
Obr. 2-19 Priebeh prvej vlny striedavého prúdu [2][3]	31
Obr. 3-1 Kompaktný istič Sentron Siemens 3VA5 [7].....	32
Obr. 3-2 Rozmery ističa Sentron 3VA5 [7].....	33
Obr. 3-3 Jednotlivé konštrukčné prvky ističa s termomagnetickou spúšťou [7]	34
Obr. 3-4 Ľavý terminál	35
Obr. 3-5 Pravý terminál	35
Obr. 3-6 Konštrukcia zhášacej komory	35
Obr. 3-7 Plastová kazeta jedného pólu ističa 3VA5 [6]	36
Obr. 3-8 Jeden pól termomagnetickkej nadprúdovej spúšte TM 230 [6]	37
Obr. 3-9 Vypínacia charakteristika ističa Sentron 3VA52 [7].....	37
Obr. 3-10 Termomagnetická nadprúdová spúšť TM 230 [5][6].....	38

Obr. 4-1 Rozloženie siete prvkov na jednej fáze ističa Siemens 3VA5	40
Obr. 5-1 Model kontaktov jednej fázy	41
Obr. 5-2 Celkový pohľad na jednu fázu	41
Obr. 5-3 Pohľad zhora	42
Obr. 5-4 Bočný pohľad	42
Obr. 6-1 Voľba analýzy	43
Obr. 6-2 Nastavenie materiálov - Med' (Cooper)	43
Obr. 6-3 Nastavenie materiálov - Oceľ (Steel 1010)	44
Obr. 6-4 B-H charakteristika Ocele (Steel 1010)	44
Obr. 6-5 Znázornenie okrajových podmienok	45
Obr. 6-6 Nastavenie okrajových podmienok	45
Obr. 6-7 Nastavenie prúdov	46
Obr. 6-8 Výpočet momentu v osi Z	47
Obr. 6-9 Pôsobenie sily F v osi kontaktu	48
Obr. 6-10 Vzdialenosti v osiach x a y	49
Obr. 6-11 Určenie výslednej sily F _{celk}	51
Obr. 6-12 Závislosti síl na prúde	52
Obr. 7-1 U - závit zložený z (P) postranných častí a (V) vodorovnej časti z feromagnetického materiálu.....	53
Obr. 7-2 Prúdovodná dráha bez feromagnetických prvkov	54
Obr. 7-3 Prúdovodná dráha s vodorovnými prvkami U-závitu	54
Obr. 7-4 Prúdovodná dráha s postrannými prvkami U-závitu	55
Obr. 7-5 Prúdovodná dráha s postrannými a vodorovnými prvkami U-závitu	56
Obr. 7-6 Prúdovodná dráha s postrannými a vodorovnými prvkami U-závitu a zapínacím systémom	57
Obr. 7-7 Výsledné odpudivé sily pôsobiace v kontaktných stykoch pre všetky prípady v závislosti na prúde	58
Obr. 8-1 Zapínací systém ističa Siemens 3VA5	59
Obr. 8-2 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v osi y	60
Obr. 8-3 Prúdovodná dráha bez feromagnetických prvkov	60
Obr. 8-4 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 1. prípad....	61
Obr. 8-5 Prúdovodná dráha s vodorovnými prvkami U-závitu	61

Obr. 8-6 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 2. prípad....	62
Obr. 8-7 Prúdovodná dráha s postrannými prvkami U-závitu.....	63
Obr. 8-8 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 3. prípad....	63
Obr. 8-9 Prúdovodná dráha s postrannými a vodorovnými prvkami U-závitu	64
Obr. 8-10 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 4. prípad..	64
Obr. 8-11 Prúdovodná dráha s postrannými a vodorovnými prvkami U-závitu a spínacím systémom.....	65
Obr. 8-12 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 5. prípad..	66
Obr. 8-13 Prúdovodná dráha bez feromagnetických prvkov a zhášacích komôr pre 1. prípad	67
Obr. 8-14 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 1. prípad..	67
Obr. 8-15 Prúdovodná dráha s feromagnetickými prvkami bez zhášacích komôr pre 2. prípad	68
Obr. 8-16 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 2. prípad..	68
Obr. 8-17 Prúdovodná dráha s feromagnetickými prvkami a zhášacími komorami pre 3. prípad	69
Obr. 8-18 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 3. prípad..	69
Obr. 8-19 Sila pôsobiaca na elektrický oblúk MP v závislosti na prúde pre všetky tri prípady	70
Obr. 8-20 Sila pôsobiaca na elektrický oblúk VP v závislosti na prúde pre všetky tri prípady	70
Obr. 9-1 Veľkosti prúdov v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 20 kA	72
Obr. 9-2 Usporiadanie fáz v trojfázovom modeli	73
Obr. 9-3 Model prúdovodných dráh pre 1. prípad	74
Obr. 9-4 Momenty pôsobiace v jednotlivých fázach v závislosti na prúde 1. prípad	75
Obr. 9-5 Model prúdovodných dráh so zapínacím systémom pre 2. prípad.....	75
Obr. 9-6 Momenty pôsobiace v jednotlivých fázach v závislosti na prúde 2. prípad	76
Obr. 9-7 Momenty pôsobiace v jednotlivých fázach v závislosti na prúde pre 1. a 2. prípad	77
Obr. 10-1 Princíp Skin efektu	78
Obr. 10-2 Voľba analýzy	79
Obr. 10-3 Nastavenie prúdov	79

Obr. 10-4 Nastavenie časového intervalu výpočtu	80
Obr. 10-5 Parameter - Moment	81
Obr. 10-6 Parameter - Sila	81
Obr. 10-7 3F Model č.1	81
Obr. 10-8 Model č. 2 rozšírený o zapínací a prítlačný systém	82
Obr. 10-9 Momenty pôsobiace na RSM v závislosti na čase - 9 kA	83
Obr. 10-10 Sily pôsobiace v osi z na jednotlivé fázy v závislosti na čase - 9 kA	84
Obr. 10-11 Celkové odpudivé sily F_{celk} a úžinové sily F_u v závislosti na čase - 9 kA	85
Obr. 10-12 Celkové odpudivé sily F_{celk} a priebehy prúdov I v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 9 kA	86
Obr. 10-13 Celkové odpudivé sily F_{celk} / F_{celk_ZS} a PS v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 9 kA	87
Obr. 10-14 Grafické znázornenie vzájomného silového pôsobenia fáz v osi z - 9 kA	88
Obr. 10-15 Momenty pôsobiace na RSM v závislosti na čase - 21 kA	89
Obr. 10-16 Sily pôsobiace v osi z na jednotlivé fázy v závislosti na čase - 21 kA ..	90
Obr. 10-17 Celkové odpudivé sily F_{celk} a úžinové sily F_u v závislosti na čase - 21 kA	91
Obr. 10-18 Celkové odpudivé sily F_{celk} a priebehy prúdov I v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 21 kA	92
Obr. 10-19 Celkové odpudivé sily F_{celk} / F_{celk_ZS} a PS v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 21 kA	93
Obr. 10-20 Grafické znázornenie vzájomného silového pôsobenia fáz v osi z - 21 kA	94
Obr. 10-21 Momenty pôsobiace na RSM v závislosti na čase - 30 kA	96
Obr. 10-22 Sily pôsobiace v osi z na jednotlivé fázy v závislosti na čase - 30 kA ..	97
Obr. 10-23 Celkové odpudivé sily F_{celk} a úžinové sily F_u v závislosti na čase - 30 kA	100
Obr. 10-24 Celkové odpudivé sily F_{celk} a priebehy prúdov I v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 30 kA	101

Obr. 10-25 Celkové odporivé sily $F_{\text{celk}} / F_{\text{celk_ZS}}$ a PS v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 30 kA	102
Obr. 10-26 Grafické znázornenie vzájomného silového pôsobenia fáz v osi z - 30 kA	103
Obr. 10-27 Závislosť momentov na prúde v rozsahu - 3 -30 kA (percentuálny rozdiel)	104
Obr. 10-28 Závislosť celkových odporivých síl na prúde v rozsahu 3 - 30 kA (percentuálny rozdiel)	105
Obr. 10-29 Závislosť celkových odporivých síl F_{celk} a úžinových síl F_u na prúde v rozsahu 3 - 30 kA (percentuálny rozdiel)	106
Obr. 10-30 Závislosť síl pôsobiacich v osi z F_z na prúde v rozsahu 3 - 30 kA (percentuálny rozdiel)	107

Seznam tabulek

Tabuľka 1 Parametre kompaktného ističa Sentron 3VA5 [7].....	33
Tabuľka 2 Popis konštrukčných prvkov z Obr. 3-3.....	34
Tabuľka 3 Moment pôsobiaci v prvej fáze	47
Tabuľka 4 Sily pôsobiace na kontakty v prvej fáze.....	48
Tabuľka 5 Sily F_x a F_y pôsobiace v kontaktoch prvej fázy	50
Tabuľka 6 Vlastnosti kontaktného materiálu.....	50
Tabuľka 7 Sila F_u v prúdovodnej úžine kontaktov.....	51
Tabuľka 8 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch.....	52
Tabuľka 9 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch pre 1. prípad	54
Tabuľka 10 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch pre 2. prípad	55
Tabuľka 11 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch pre 3. prípad	55
Tabuľka 12 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch pre 4. prípad	56
Tabuľka 13 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch pre 5. prípad	57
Tabuľka 14 Moment a sily pôsobiace v osi y na elektrické oblúky pre 1. prípad	60
Tabuľka 15 Moment a sily pôsobiace v osi y na elektrické oblúky pre 2. prípad	62
Tabuľka 16 Moment a sily pôsobiace v osi y na elektrické oblúky pre 3. prípad	63
Tabuľka 17 Moment a sily pôsobiace v osi y na elektrické oblúky pre 4. prípad	64
Tabuľka 18 Moment a sily pôsobiace v osi y na elektrické oblúky pre 5. prípad	65
Tabuľka 19 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v osi y pre 1. prípad.....	67
Tabuľka 20 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v osi y pre 2. prípad.....	68
Tabuľka 21 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v osi y pre 3. prípad.....	69
Tabuľka 22 Výsledné momenty vypočítané pre 1. prípad.....	74
Tabuľka 23 Výsledné momenty vypočítané pre 2. prípad.....	76
Tabuľka 24 Momenty pôsobiace vo všetkých fázach bez uvažovania ZS a PS - 30 kA.....	94
Tabuľka 25 Momenty pôsobiace vo všetkých fázach s uvažovaním ZS a PS - 30 kA	95
Tabuľka 26 F_z - Sily pôsobiace v osi z na RSM v jednotlivých fázach - 30 kA	98
Tabuľka 27 F_u - Úžinové sily pôsobiace v kontaktných stykoch - 30 kA	98
Tabuľka 28 F_{celk} - Výsledné odpudivé sily - 30 kA.....	99

1 ÚVOD

Pri prechode skratového prúdu zariadením vznikajú elektrodynamické sily, ktoré dosahujú veľkých hodnôt a môžu ho vážne poškodiť. Tieto sily najviac pôsobia na prúdovodnú dráhu elektrického zariadenia. Najkritickejším miestom prúdovodnej dráhy sú kontakty. Kontakty sú pri spínaní namáhané nielen elektrodynamickými silami, ale aj tepelnými účinkami. Preto sú na kontakty prístroja kladené veľké nároky a musia spĺňať nasledujúce požiadavky: [1]

- a. Nízky styčný odpor
- b. Dobrá elektrická a tepelná vodivosť
- c. Odolnosť proti mechanickému opotrebeniu
- d. Odolnosť proti zvareniu alebo zlepeniu pri zapínaní
- e. Odolnosť proti opáleniu elektrickým oblúkom pri spínaní a vypínaní

Na kontaktné ústrojenstvo pôsobia elektrodynamické sily hneď z niekoľkých dôvodov. V prvom rade je to sila vyvolaná prechodom skratového prúdu, cez jednotlivé záhyby prúdovodnej dráhy v mieste kontaktného ústrojenstva. Ďalšou zložkou je odpudivá sila pôsobiaca v prúdovej úžine, ktorá vzniká prechodom skratového prúdu v mieste kontaktného styku. Ďalšia sila, ktorá pôsobí na kontaktné ústrojenstvo je sila, ktorá je spôsobená blízkosťou feromagnetického materiálu, ktorý je v našom prípade feromagnetický materiál použitý v zhasanej komore. Aby boli tieto sily správne využité, tak je potrebné sa podrobnejšie zaoberať geometriou prúdovodnej dráhy. [1]

2 SILOVÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PRÚDU

2.1 Sily elektrodynamické obecne

Prúdovodné časti elektrických prístrojov sú za prevádzky namáhané mechanickými silami, ktoré vyvoláva prúd pretekajúci prúdovodnými časťami elektrického prístroja. Tento jav je jeden zo základných prejavov elektrického prúdu, ktorý sa využíva v mnohých odboroch elektrotechniky. Najznámejšia aplikácia je v elektrických motoroch, v elektromagnetických prístrojoch a v meracej technike. Znalosť vzťahov medzi mechanickou silou a elektrickým prúdom umožňuje nielen stavbu ekonomických zariadení, v ktorých meníme elektrickú energiu na mechanickú energiu, ale aj prístroje na meranie elektrických veličín. V takýchto zariadeniach sú vznikajúce mechanické sily užitočné a potrebné. [2]

Mechanické sily medzi spriahnutými vodičmi vznikajú vždy, aj vtedy, keď je to nepotrebné. V takýchto prípadoch nebývajú už mechanické sily užitočné, ale naopak škodlivé, hlavne v dôsledku veľkých prúdov. Tieto dosahujú medzi jednotlivými vodičmi v rozvodnom systéme alebo v prúdovodných častiach prístrojov veľkosti mega newtonov. V dôsledku tohto je potom nutné navrhnuť celé rozvodné alebo spínacie zariadenie tak, aby nemohlo dôjsť k poškodeniu vodivých a hlavne izolačných častí. Tieto sily môžu mať tiež deštruktívny účinok na kontakty zariadenia, pretože môžu znižovať kontaktnú silu, čo vedie k zväčšeniu stykových odporov, zvýšeniu teploty

kontaktov a následne ich zvarení. Ak poznáme pôsobenie týchto síl, môžeme predom zabrániť nežiadúcim dôsledkom. Môžeme tomu zabrániť napríklad tým, že konštrukciu upravíme tak, aby sme pôsobiacu silu zmenšili. [2]

2.2 Vznik elektrodynamických síl

Ak prechádza prúdovodnou dráhou zariadenia elektrický prúd, tak vznikajú elektrodynamické sily, ktoré spôsobujú mechanické namáhanie častí prúdovodnej dráhy. Toto mechanické namáhanie môže pri prechode skratového prúdu dosahovať veľkých hodnôt. Príčinou vzniku týchto elektrodynamických síl v elektrických zariadeniach je existencia magnetických polí, ktoré na seba navzájom pôsobia.[1]

Vzťahy pre výpočet elektrodynamických síl medzi vodičmi je možné odvodiť:

1. Na základe zákonov elektrotechniky
2. Zo zmeny magnetickej energie sústavy

Ampérov zákon: Sila pôsobiaci na náboj pohybujúci sa v magnetickom poli je úmerná veľkosti náboja q a vektorovému súčinu rýchlosti náboja v a magnetickej indukcie B v danom bode:

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

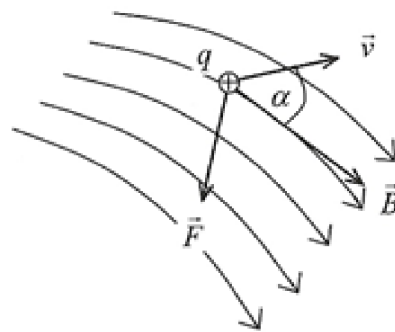
Sila F má smer kolmý k rovine vymedzenej vektormi v a B

A jej orientácia je určená pravidlom o výslednici vektorového súčinu ako je znázornené na Obr. 2.1[3]

Veľkosť sily je daná vzťahom:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (2.2)$$

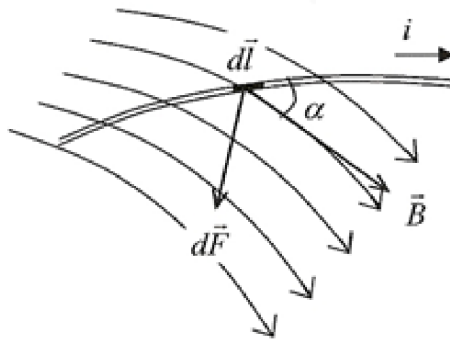
Vzťah (2.2) popisuje napríklad situáciu silového pôsobenia na nosič kladného náboja vo vnútri elektrického oblúku, ktorý sa nachádza v cudzom magnetickom poli. [3]



Obr. 2-1 Silové pôsobenie magnetického poľa

Ak dosadíme do vzťahu (2.1) za rýchlosť náboja $v = dl / dt$ a za náboj $dq = i \cdot dt$, tak získame silu pôsobiacu na element prúdovodného vlákna, ktorým preteká elektrický prúd a je umiestnený v magnetickom poli. Táto sila je daná vzťahom: [3]

$$d\vec{F} = i[\vec{dl} \times \vec{B}] \quad (2.3)$$



Obř. 2-2 Silové pôsobenie magnetického poľa na prúdovodič

Sila, ktorá pôsobí na celý prúdovodič dĺžky l , je potom rovná integrálu rovnice

(2.3): [3]

$$\vec{F} = i \int_l (\vec{dl} \times \vec{B}) \quad (2.4)$$

Ak uvažujeme vodič priamy a magnetické pole homogénne pozdĺž celej dĺžky vodiča, tak dostaneme z rovnice (2.3) pre veľkosť sily vzťah: [3]

$$F = B \cdot l \cdot i \cdot \cos \alpha \quad (2.5)$$

2.3 Sily medzi niekoľkými prúdovodnými dráhami

Táto kapitola je rozdelená do troch častí: [1]

- Prúdovodné dráhy sa nahradia prúdovodnými vláknami s nekonečnou dĺžkou
- Prúdovodné dráhy sa nahradia prúdovodnými vláknami s konečnou dĺžkou
- Prúdovodné dráhy sa nahradia prúdovodnými vláknami s reálnym prierezom

2.3.1 Prúdovodné vlákna s nekonečnou dĺžkou

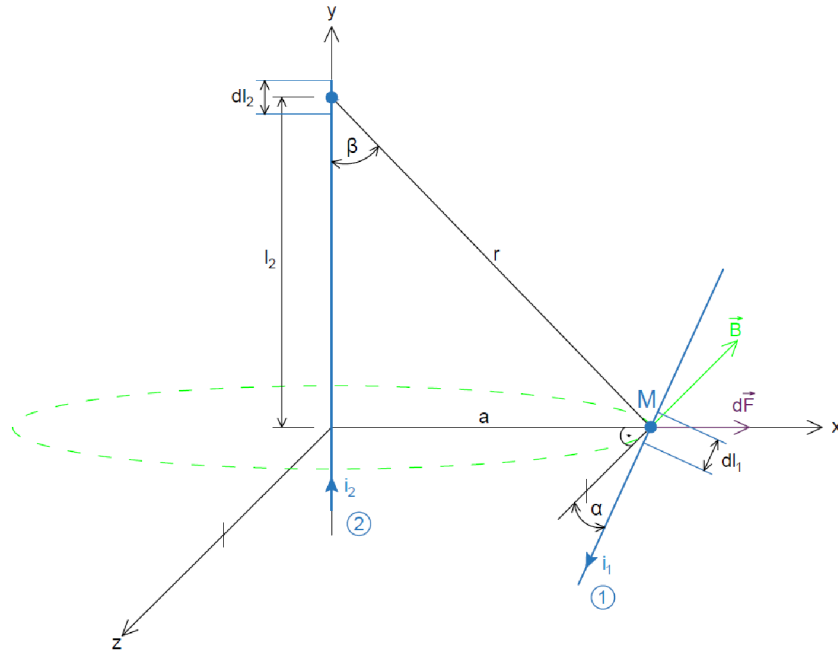
Obecný vzťah pre výpočet síl pôsobiacich na vodiče: [3]

Máme dva dlhé priame vodiče I_1 a I_2 ľubovoľne umiestnené v priestore. Na element dl_1 vodiča 1, ktorým tečie prúd i_1 , a ktorý sa nachádza v homogénnom magnetickom poli s indukciou B_2 (generovanou vodičom 2), pôsobí podľa Ampérového zákona elementárna sila: [3]

$$d\vec{F}_1 = i_1 [\vec{dl}_1 \times \vec{B}_2] \quad (2.6)$$

Prepisom vektorového súčinu do skalárnej formy dostaneme pre element síl výraz:

$$dF_1 = B_2 \cdot \sin \alpha \cdot i_1 \cdot dl_1 \quad (2.7)$$

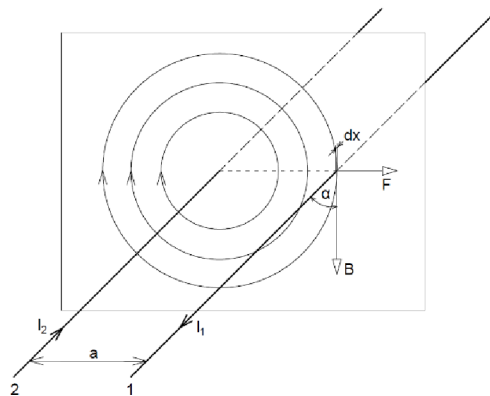


Obr. 2-3 Dva vodiče ľubovoľne umiestnené v priestore [3]

Smer vektoru magnetickej indukcie v mieste M je určený podľa pravidla pravej ruky. Smer vektoru sily pôsobiacej v mieste M je určený tiež pomocou pravidla pravej ruky (1.natiahnuté prsty v smere prúdu, 2. sklopené prsty v smere indukcie, 3. palec ukazuje smer sily). Obecný vzťah pre výpočet sily medzi dvoma rovnobežnými prúdovodnými vláknami, z ktorých vodič I_2 je nekonečne dlhý a vzdialenosť medzi vodičmi je rovná a :

$$F_1 = \frac{2l_1}{a} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot 10^{-7} \quad (2.8)$$

Je to sila pôsobiaca na nekonečne dlhý vodič 1 ($l_1 = \infty$) pretekaný prúdom i_1 , ktorý sa nachádza v magnetickom poli vyvolanom prúdom i_2 tečúcim budiacim nekonečne dlhým vodičom $l_2 = \infty$. [3]

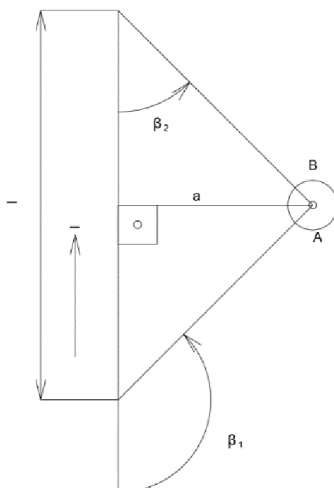


Obr. 2-4 Sila medzi dvoma prúdovodnými vláknami nekonečnej dĺžky [3]

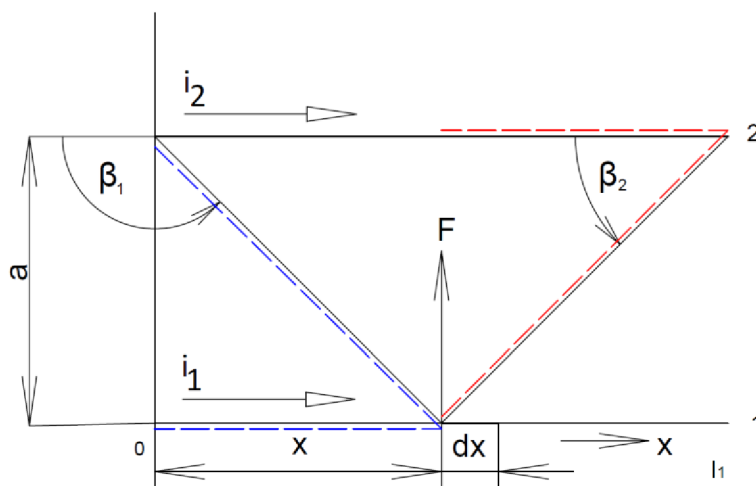
2.3.2 Prúdovodné vlákna s reálnou dĺžkou

V tejto chvíli už nebude budiaci vodič 2 nekonečne dlhý, ale bude mať reálnu dĺžku l_2 a budeme uvažovať vplyv tejto konkrétnej dĺžky l_2 na silu pôsobiacu na rovnobežný vodič 1. Vyjdeme z indukcie B magnetického poľa v bode A, vodiča 1, ktorý sa nachádza mimo prúdovodič konečnej dĺžky l_2 . Výsledný vzťah pre indukciu B :

$$B = \mu_r \cdot \frac{\mu_0 \cdot i_2}{4\pi a} \cdot (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad (2.9)$$



Obr. 2-5 Indukcia v bode A od prúdového vlákna konečnej dĺžky [3]



Obr. 2-6 Sila medzi dvoma prúdovodnými vláknami konečnej dĺžky [3]

Po dosadení do vzťahu (2.9):

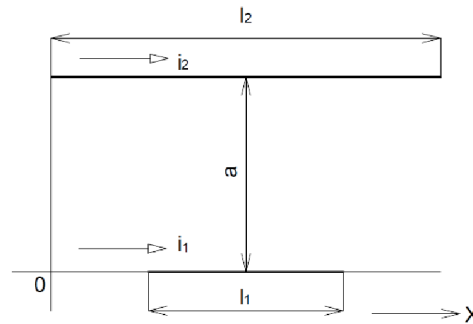
$$\cos \beta_2 = \frac{l_1 - x}{\sqrt{a^2 + (l_1 - x)^2}} \qquad \cos \beta_1 = \frac{-x}{\sqrt{a^2 + x^2}}$$

Po vyňatí dĺžky l_1 pred zátvorku získame konečný vzťah pre silu medzi dvoma vodičmi konečnej dĺžky:[3]

$$F_1 = \frac{2l_1}{a} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{a}{l_1}\right)^2 + 1} - \frac{a}{l_1} \right] \quad (2.10)$$

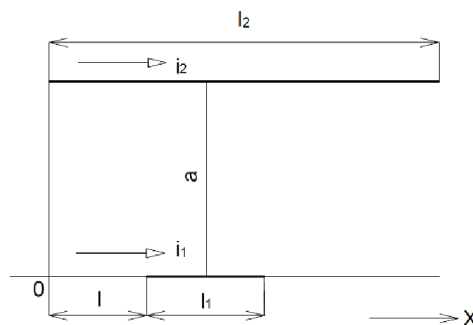
Po porovnaní vzťahov (2.8) a (2.10) je vidieť, že v novom vzťahu (2.10) pribudla hranatá zátvorka, ktorá reprezentuje, ako sa zmení veľkosť sily, ak uvažujeme dva vodiče konečnej dĺžky. Tento člen v zátvorke je tzv. činiteľ usporiadania vodičov konečnej dĺžky, ktorý označujeme k_d .[2][3]

Činiteľ konečnej dĺžky k_d sa čiastočne mení podľa konfigurácie vodičov:



Obr. 2-7 Súmerné usporiadanie dvoch rozdielne dlhých prúdových vlákien [3]

$$k_d = \sqrt{1 - \frac{(l_1 + l_2)^2}{4a^2}} - \sqrt{1 - \frac{(l_2 + l_1)^2}{4a^2}} \quad (2.11)$$



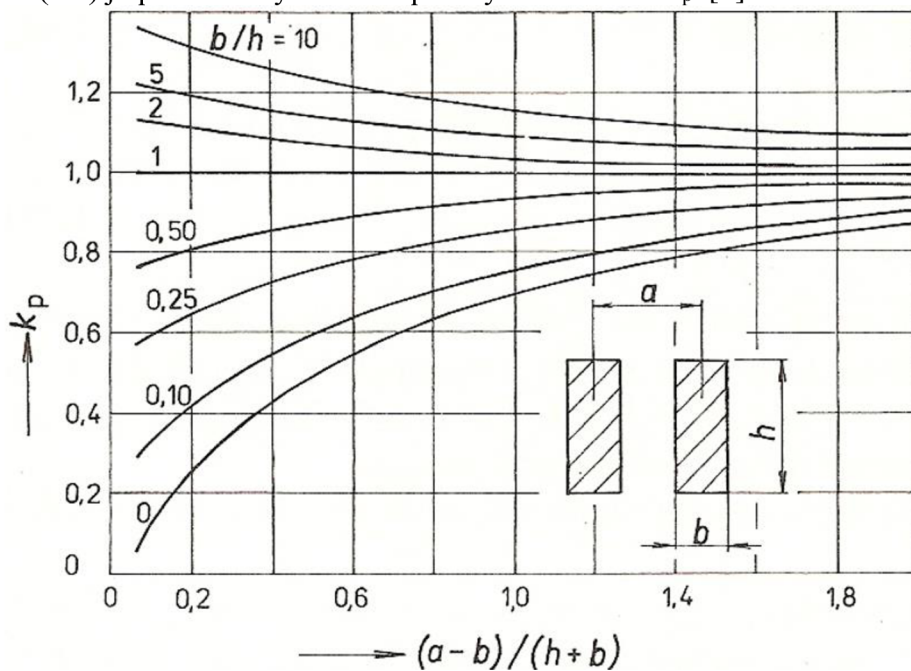
Obr. 2-8 Nesúmerné usporiadanie dvoch rozdielne dlhých prúdových vlákien [3]

$$k_a = \frac{1}{2} \left[\frac{l_1 + l_2}{a} + \sqrt{\frac{(l_2 + l_1)^2}{a^2} + 1} - \frac{l_2}{a} - \sqrt{\frac{l_2^2}{a^2} + 1} \right] \quad (2.12)$$

2.3.3 Prúdovodné vlákna s reálnymi prierezmi

V predchádzajúcich dvoch kapitolách bola prúdovodná dráha nahradená prúdovodným vláknom, kde sme uvažovali, že vzdialenosť vodičov je oveľa väčšia ako ich priemer. V praxi takáto náhrada vodiča vláknom vyhovuje v prípadoch kruhového a medzikruhového prierezu vodičov.

V prípade, keď sú vodiče robustné a majú pravouhlý prierez, nebude pôsobiaca sila rovnaká. Keďže veľkosť magnetického poľa budeného vodičom pravouhlého prierezu, je voči magnetickému poľu budeného prúdovými vláknami odlišná. Silu vypočítanú podľa vzťahu (2.8) je potrebné vynásobiť opravným činiteľom k_p . [3]



Obr. 2-9 Závislosť činiteľa tvaru prierezu vodiča na usporiadaní prúdovodičov [3]

Približné vzťahy pre výpočet činiteľa tvaru prierezu k_p :

$$\frac{b}{h} > 1 \quad k_p = 1 + \frac{0,12}{\frac{a-b}{h+b} + \frac{h}{b}} \quad (2.13)$$

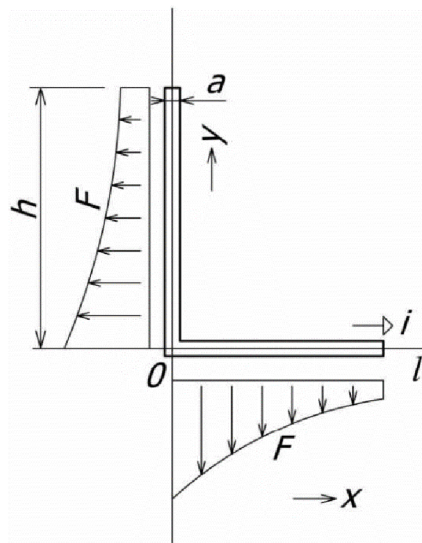
$$\frac{b}{h} \leq 1 \quad k_p = 1 - \frac{0,12}{\frac{a-b}{h+b} + \frac{b}{h}} \quad (2.14)$$

2.4 Elektrodynamické sily v zakrivenej prúdovej dráhe

Elektrodynamické sily v zakrivenej prúdovodnej dráhe je možné vypočítať tak, že prúdovodnú dráhu rozdelíme na priame úseky konečnej dĺžky a následne vypočítame vzájomné sily. [1][3]

2.4.1 Pravouhlý záhyb vodiča

Priebeh a pôsobenie dynamických síl v zahnutom vodiči do pravého uhla, alebo odbočujúceho od priameho vodiča v pravom uhle, je daný smerom prúdu v jednotlivých úsekoch. [2]



Obr. 2-10 Priebeh sily pôsobiacej na pravouhlý L záhyb [1][3]

Veľkosť sily pôsobiacej na prúdovodnú dráhu v osi x, ktorá bude zaťažovať celú dĺžku l počítame (rozloženie sily je znázornené na Obr. 2-10):

$$F_l = i^2 \cdot \ln \left(\frac{2l}{a} \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + (a/2)^2}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} \right) \cdot 10^{-7} \quad (2.15)$$

Po určení pôsobiacej sily F_l , si vypočítame celkový moment M_l pôsobiaci na rameno l:[2]

$$M_l = i^2 \cdot h \cdot \ln \left(\frac{l + \sqrt{h^2 + l^2}}{\frac{a}{2} + \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}} \right) \cdot 10^{-7} \quad (2.16)$$

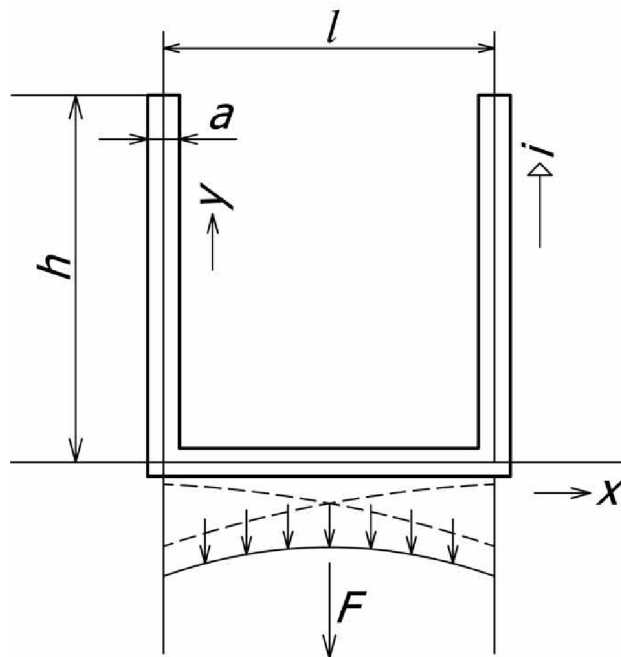
Nakoniec vypočítame vzdialenosť ťažiska sily F_l od osi prúdovodnej dráhy h:[2]

$$l = \frac{M_l}{F_l} \quad (2.17)$$

Rovnakým postupom by sme vypočítali silu F_h , ktorá pôsobí na rameno h , celkový moment M_h a tiež vzdialenosť ťažiska sily F_h od osi prúdovodnej dráhy l .

2.4.2 Dvojitý pravouhlý záhyb

Veľmi častým tvarom prúdovej dráhy v spínacích prístrojoch nízkeho aj vysokého napätia je dvojitý pravouhlý záhyb. Výpočet pôsobiacej sily, na dva zvislé úseky, je možné urobiť rovnakým spôsobom ako bolo popísané v kapitole 2.4.1. Rozdiel je akurát v spodnej časti prúdovodnej dráhy, na ktorú pôsobia dva zvislé úseky o dĺžke h . V tomto úseku je výsledná sila dvojnásobná a je rozložená ako je znázornené na obr. 2-11.



Obr. 2-11 Priebeh sily pôsobiacej na spodný úsek dvojitého pravouhlého záhybu [3]

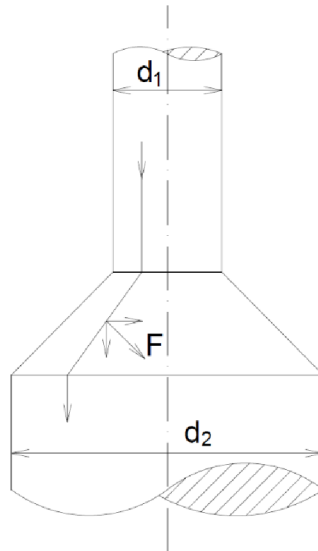
Silu F_1 vypočítame ako :

$$F_1 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \left(\frac{2lh + \sqrt{h^2 + (a/2)^2}}{a} \frac{h + \sqrt{h^2 + l^2}}{h} \right) \quad (2.18)$$

Pôsobenie výslednej sily F_1 je umiestnené v strede dĺžky l . V prípade nesymetrie zvislých častí prúdovodnej dráhy sa pôsobisko výslednej sily posunie bližšie k dlhšiemu ramenu. [1][3]

2.5 Sily vyvolané zmenou prierezu vodiča

Zmenu prierezu vodiča a tým aj deformáciu prúdovodnej dráhy si môžu vynútiť rôzne okolnosti. Môže to byť napríklad otvor vo vodiči. Účel tohto otvoru býva väčšinou pripojenie vodiča skrutkou k nosnej izolácii prístroja, alebo možnosť pripojiť ďalšie časti prúdovej dráhy. Každá zmena prierezu vodiča je príčinou vzniku síl. [3]



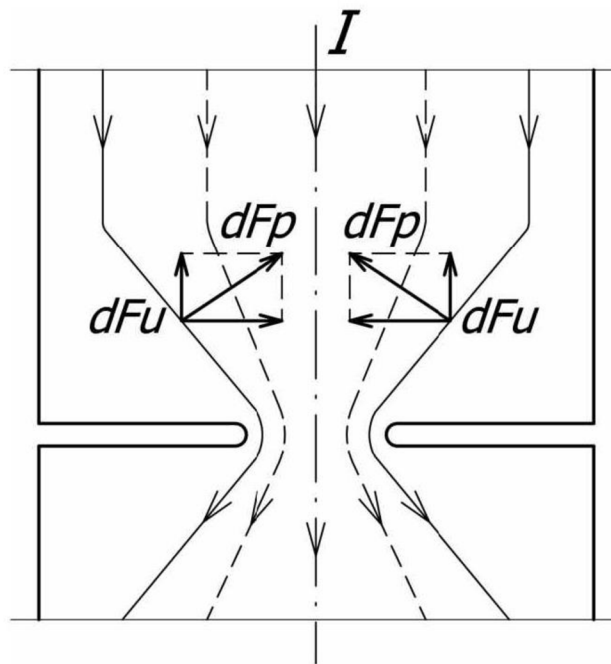
Obr. 2-12 Sila vznikajúca pri zmene prierezu prúdovodnej dráhy [3]

Pri súmernej zmene kruhového prierezu, podľa Obr. 2-12, veľkosť sily udáva vzťah:

$$F = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (2.19)$$

2.6 Odpudivé sily medzi kontaktmi

Sú dôsledkom skutočnosti, že prúd neprechádza celou styčnou plochou kontaktu, ale tzv. prúdovými úžinami. Pri konštrukcii kontaktov je potrebné s týmito silami počítať. Ak nastane situácia, kedy súčet odpudivých síl F_u je väčší ako sila prítlačná F_{prit} , dochádza pri prechode skratového prúdu k odskoku kontaktov. Pri odskoku vzniká elektrický oblúk, ktorý môže nataviť kontakty a pri následnom zopnutí teda dosadnutí kontaktov môže dôjsť k ich zvareniu. Tento jav je veľmi nežiadúci, pretože kvôli zvareniu kontaktov dochádza najčastejšie k poruche prístroja. Pri čiastočnom zvarení kontaktov, pri ktorom ešte prístroj dokáže vypnúť, dochádza k vytrhnutiu materiálu z kontaktov a tým k skráteniu ich životnosti. [1][3]



Obr. 2-13 Odpudivé sily v prúdovej úžine [3]

Celkovú odpudivú silu F_u v jednej úžine vypočítame podľa vzťahu: [1][3]

$$F = 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \ln \frac{D}{a} \quad (2.20)$$

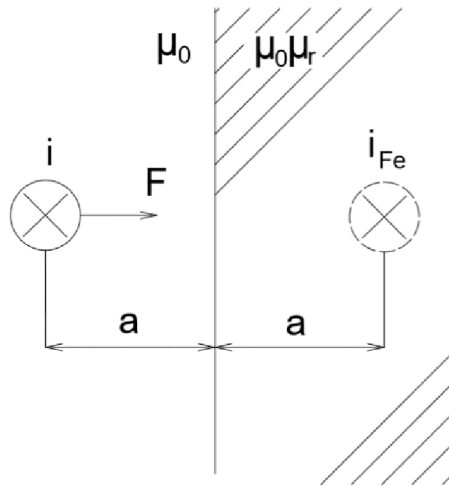
Celkovú odpudivú silu F_u v n nezávislých úžinách vypočítame podľa vzťahu: [1][3]

$$n \cdot F_u = n \cdot \frac{I^2}{n} \cdot \ln \frac{D\sqrt{n}}{a} 10^{-7} \quad (2.21)$$

2.7 Príťažlivá sila od blízkeho feromagnetického materiálu

Ak sa nachádza vodič pretekaný prúdom v blízkosti feromagnetického telesa napríklad oceľovej dosky alebo konštrukcie o permeabilite $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ pričom μ_r je pomerná permeabilita feromagnetika, potom pôsobí na blízky vodič istá sila.

Jej veľkosť je možné stanoviť, keď zavedieme predstavu zrkadlového obrazu rovnobežného vodiča



Obr. 2-14 Príťažlivá sila pôsobiaca na prúdovodič v blízkosti feromagnetika [3]

Za tohto predpokladu zrkadlenia je možné celý prípad posudzovať ako dva rovnobežné nekonečne dlhé vodiče. Pre výpočet sily použijeme rovnicu:

$$F = \frac{2l}{a} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot 10^{-7} \quad (2.22)$$

Ak dosadíme za prúd $i = i_{Fe}$ tak dostaneme:

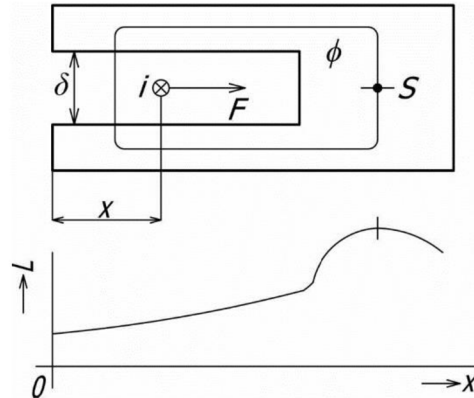
$$F = \frac{2l}{2a} \cdot i \cdot i_{Fe} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} \cdot \frac{l}{a} \cdot i^2 \cdot 10^{-7} \quad (2.23)$$

Veľkosť sily, ktorá vťahuje oblúk do vnútra výrezu, môžeme stanoviť zo zmeny energie nahromadenej v magnetickom poli oblúku:[3]

$$F = \frac{\partial W_m}{\partial x} \quad kde \quad W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \quad (2.24)$$

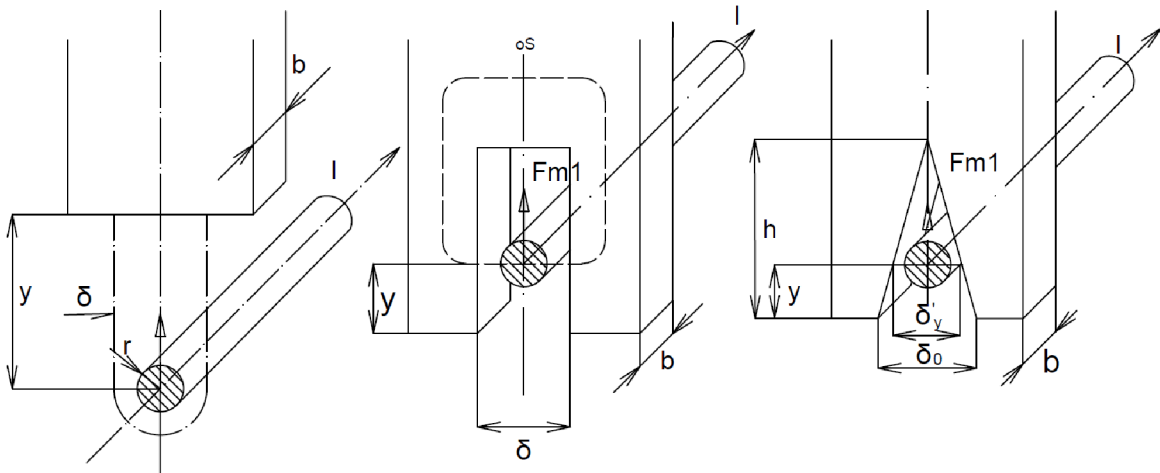
Za predpokladu, že prúd i sa nebude meniť, tak potom v závislosti na súradnici x bude sila určená rovnicou:

$$F = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L}{\partial x} \quad (2.25)$$



Obr. 2-15 Sila vťahujúca oblúk do oceľovej roštovej komory [3]

Oblúk sa pohybuje do zhašacej komory jednak pôsobením elektrodynamických síl, ktoré sú vyvolané pevnými úsekmi prúdovodnej dráhy a tiež silami vyvolanými blízkym feromagnetickým materiálom (rebrá v rošte zhašacej komory). Feromagnetický materiál a v ňom rôzne tvarované výrezy pôsobia silou na oblúk tak, že sa zväčšuje rýchlosť jeho pohybu do roštovej komory napríklad pri stýkačoch alebo ističoch. Tým sa posilňuje chladenie oblúku odvodom tepla do kovových dosiek, rastie odpor oblúku, posilňuje sa dejonizácia stĺpca oblúku a tým sa uľahčuje zhašanie oblúku v prostredí zhašadla a tiež aj urýchlenie zotavovania elektrickej pevnosti po prerušení prúdu.



Obr. 2-16 Typy oceľových plechov zhašacej komory [3]

2.8 Charakter elektrodynamických síl

2.8.1 Pôsobenie jednosmerného prúdu

Je to spôsob, akým elektrodynamické sily namáhajú vodiče a je daný charakterom prúdu, ktorý tieto sily vyvolá. Jednosmerný prúd spôsobuje v normálnom stave trvalý, nepremenný ťah. Iba pri zopnutí obvodu alebo pri jeho zmene dochádza k zmene tejto sily. V tomto prípade nenastane zmena sily skokovo, ale zmení sa vplyvom indukčnosti obvodu L plynulo podľa exponenciálnej funkcie: [2]

$$i = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad (2.26)$$

Prechodový jav po určitej dobe zmizne (pre t veľmi veľké je výraz $e^{-\frac{R}{L}t}$ rovný skoro nule) a prúd $i = I = \frac{U}{R}$. Na pomere $\tau = \frac{L}{R}$, tj. na časovej konštante obvodu záleží z dôvodu toho, že jej pomer nám udáva, za akú dlhú dobu prebehne nárast prúdu na plnú hodnotu I . Čím je indukčnosť obvodu L voči odporu R menšia, tým je doba nárastu kratšia. S rýchlosťou nárastu prúdu súvisí aj rýchlosť nárastu elektrodynamických síl, ktoré mechanicky namáhajú vodiče. [2]

Celkový charakter nárastu elektrodynamických síl pri jednosmernom prúde je pomerne pozvoľný. Samozrejme záleží na indukčnosti obvodu. Pri skrate na vodičoch je indukčnosť obvodu veľmi malá, prúd narastá rýchlo, elektrodynamické sily pôsobia na vodiče ako ráz. Po počiatočnom náraste namáhajú elektrodynamické sily v jednosmernej sieti vodiče ďalej nemenným, kludným ťahom.

2.8.2 Pôsobenie striedavého prúdu

Pri striedavom prúde je to inak. Charakter síl sa mení s charakterom prúdu, ktorého okamžitá hodnota stále kmitá medzi hodnotou nulovou a maximálnou hodnotou. Ak do rovnice (2.22) dosadíme za prúdy i_1 a i_2 striedavé prúdy, posunuté voči sebe o uhol φ , dostaneme vzťahy pre ich okamžité hodnoty:

$$i_1 = I_1 \cdot \sin \omega t \quad (2.27)$$

$$i_2 = I_2 \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.28)$$

Maximálne hodnoty prúdov:

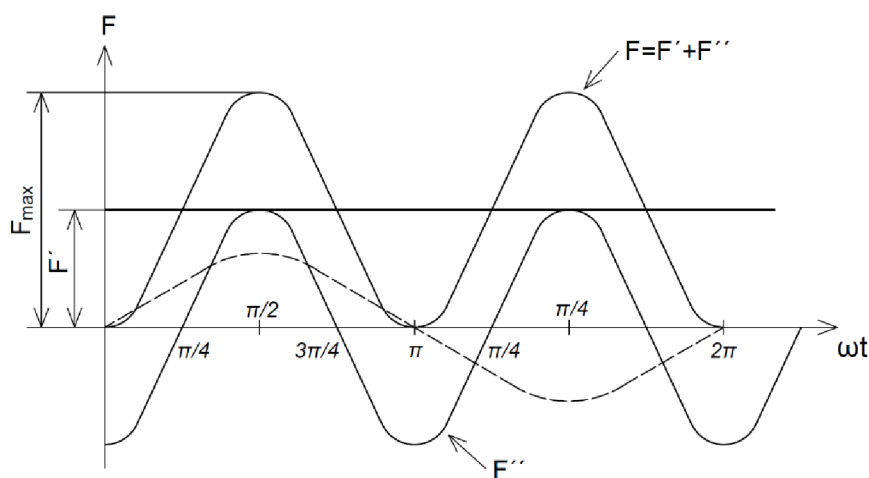
$$i_1 = \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \sin \omega t \quad (2.29)$$

$$i_2 = \sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.30)$$

Z predošlých vzťahov dostaneme výslednú silu:

$$F = 4 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{l_1}{a} \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) \cdot 10^{-7} \quad (2.31)$$

Výsledná sila je tvorená dvoma silami. Jedna je časovo nezávislá (odpovedá $\cos \varphi$) a druhá je časovo závislá a jej frekvencia je 2ω .



Obr. 2-17 Priebeh sily pri striedavom prúde [3]

Z Obr. 2-17 je vidieť, že vodiče sú namáhané opakovanými rázmi o dvojnásobnej sile, než je trvalá sila pri jednosmernom prúde rovnakej veľkosti.

Ak uvažujeme skratový prúd s priebehom:

$$i = I_{\infty} \cdot (e^{-t/\tau} - \cos \omega t) \cdot \sqrt{2} \quad (2.32)$$

Kde:

I_{∞} - ustálená hodnota prúdu v obvode

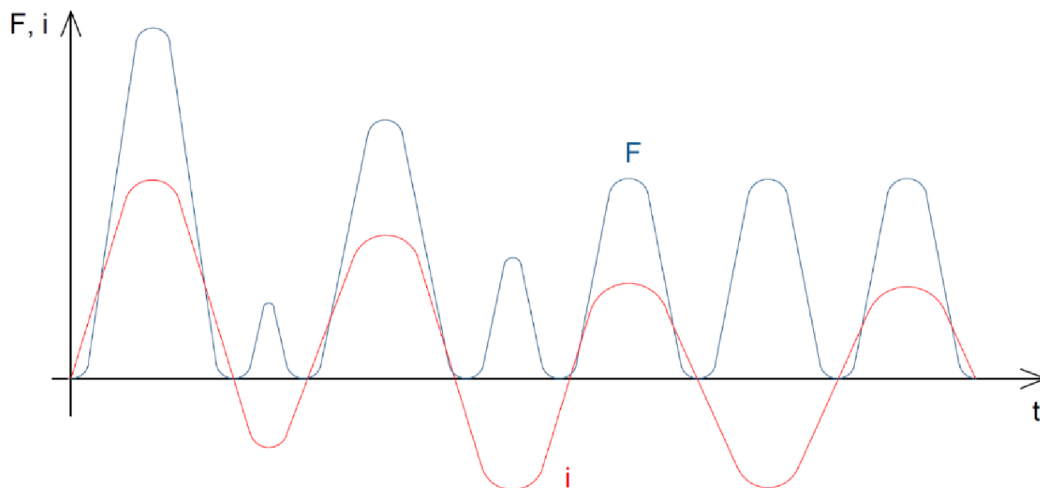
τ - časová konštanta tlmenia prechodnej zložky

Za predpokladu že obidvoma vodičmi tečie rovnaký prúd, je pôsobiaca sila:

$$F = 4 \cdot I^2 \cdot \frac{l_1}{a} \cdot (e^{-t/\tau} - \cos \omega t)^2 \cdot 10^{-7} \quad (2.33)$$

Po úprave dostaneme vzťah:

$$F = 4 \cdot I^2 \cdot \frac{l_1}{a} \cdot \left[e^{-2t/\tau} - 2e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega t + \frac{1}{2}(1 + \cos 2 \omega t) \right] \cdot 10^{-7} \quad (2.34)$$

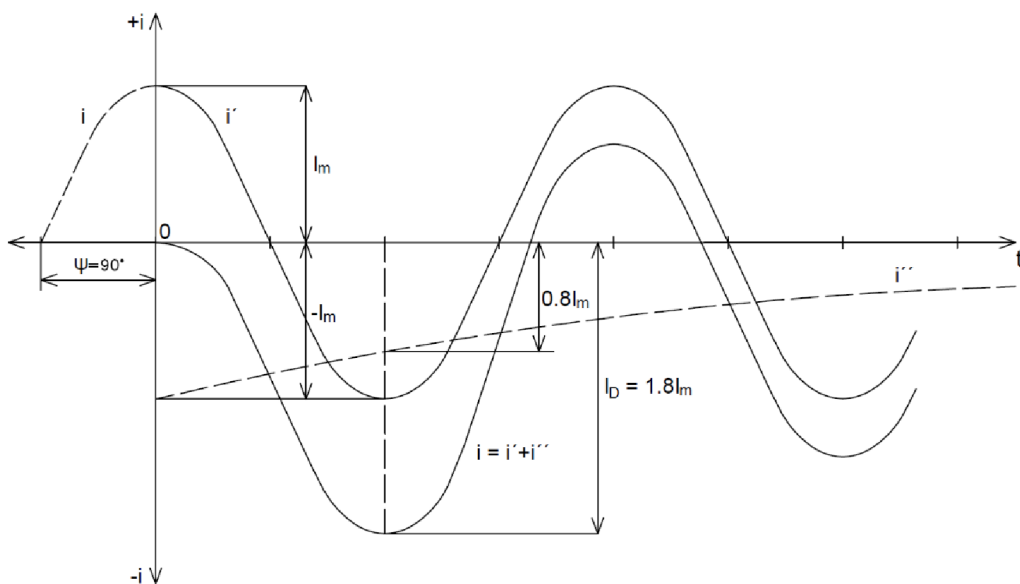


Obr. 2-18 Priebeh sily pri prechode skratového prúdu [3]

Pri zapínaní sa zhoršujú pomery v striedavej sieti tým, že prvá vlna prúdu môže vplyvom prechodnej jednosmernej zložky prekmitnúť nad amplitúdu ustáleného prúdu. Najväčšia možná veľkosť tohto dynamického prúdového rázu sa uvažuje podľa normy ako 2,54 násobok efektívnej hodnoty zapínacieho prúdu. Priebeh tohto prúdového dynamického rázu je znázornený na Obr. 2-19.

Dynamický prúd je daný vzťahom:

$$I_{dyn} = 1,8 \cdot \sqrt{2 \cdot I_{ef}} = 2,54 \cdot I_{ef} \quad (2.35)$$



Obr. 2-19 Priebeh prvej vlny striedavého prúdu [2][3]

3 KOMPAKTNÝ ISTIČ SIEMENS 3VA5

3.1 Funkcie ističa nízkeho napätia

Istič je mechanický spínací prístroj, bez ktorého si už nedokážeme predstaviť distribúciu elektrickej energie. V tejto kapitole sa budeme podrobnejšie zaoberať hlavnými funkciami a konštrukčným prevedením ako celku a jeho jednotlivými časťami . [4][5]

Istič má v bežnom prevedení viacero funkcií. V prvom rade je to funkcia istenia a chránenia obvodu, Je to funkcia, ktorá zabezpečuje bezpečné prevádzkovanie elektrických prístrojov v elektrickom obvode. Tejto funkcie sa dosiahne správnym konštrukčným prevedením častí ističa, kedy istič s určitými parametrami je schopný správne zareagovať na nežiadúcu hodnotu elektrického prúdu a tým následne ochráni elektrické zariadenia v obvode.[4]

Druhá funkcia ističa je funkcia vypínacia. Aby mohol byť obvod v prípade potreby správne chránený, tak musí byť samočinne vypnutý.[4]

3.2 Popis ističa 3VA5

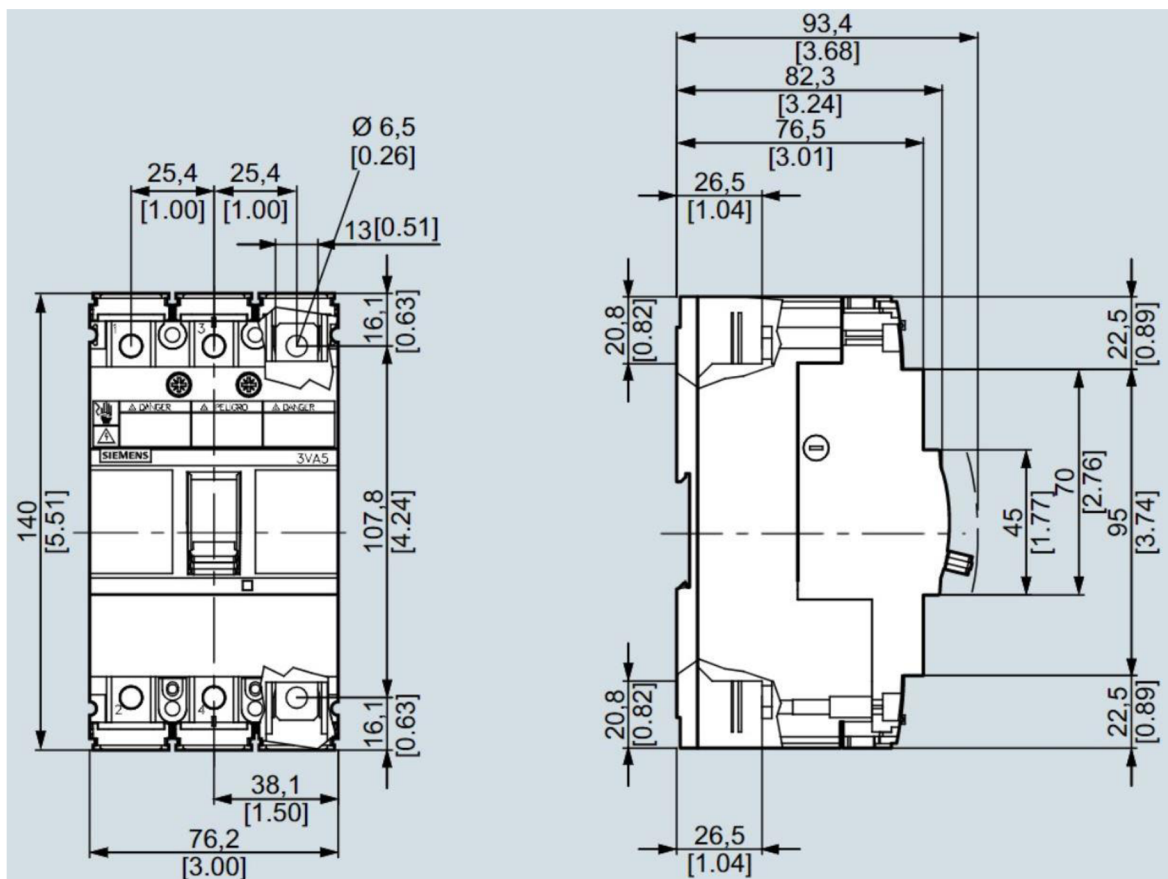
Kompaktný istič 3VA52 je modulárny a vysoko variabilný prístroj produktovej rady Sentron od spoločnosti Siemens, ktorý je určený hlavne k isteniu vedení proti preťaženiu a proti skratu. Tento istič je vybavený termomagnetickou nadprúdovou spúšťou TM230, ktorá tvorí samostatný blok, ktorý je možné vymeniť. V tejto spúšti sú zapúzdrené základné prvky termomagnetickkej spúšte, teda bimetalové pásiky a elektromagnet vložený do každého pólu spúšte.[6]



Obr. 3-1 Kompaktný istič Sentron Siemens 3VA5 [7]

Tabuľka 1 Parametre kompaktného ističa Sentron 3VA5 [7]

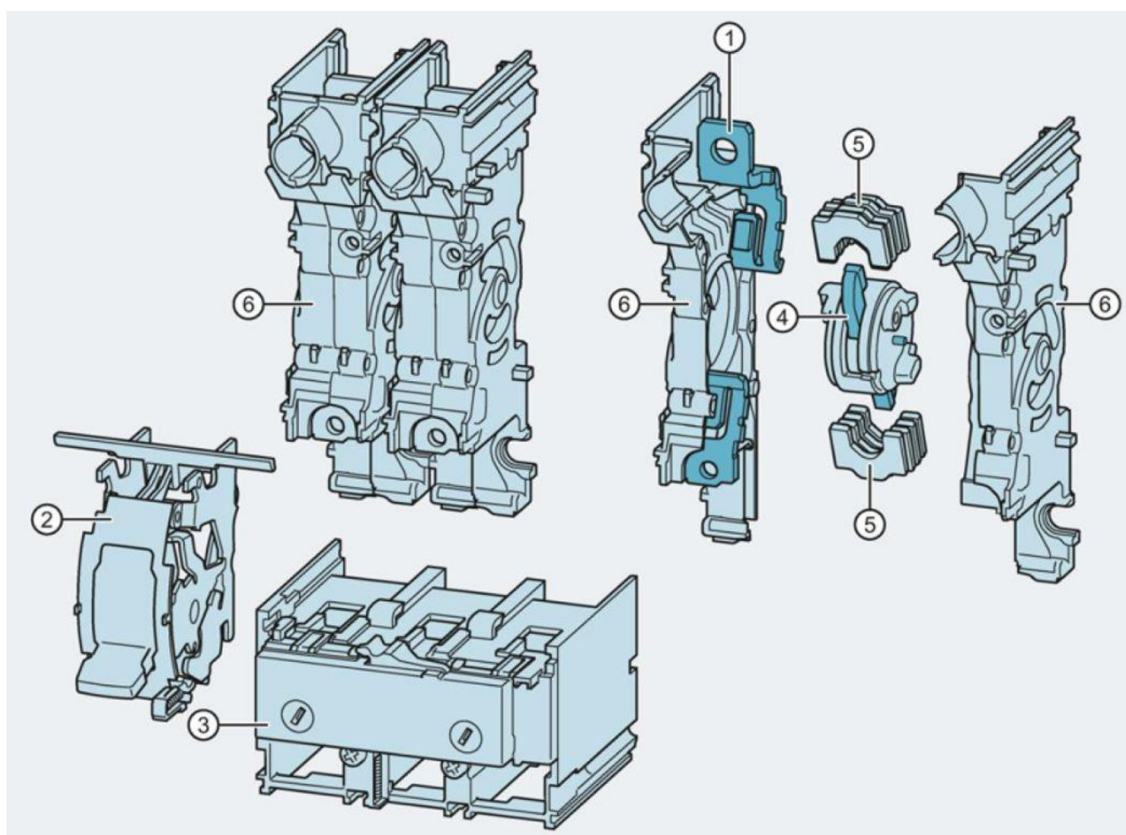
Počet pólov	3
Menovitý prúd I_n	250A
Menovité pracovné napätie U_e	690V AC
Menovitý kmitočet f_n	50/60 Hz
Menovité impulzné výdržné napätie U_{imp}	8 kV
Kategória užitia (selektivita)	A
Menovitá medzná skratová vypínacia schopnosť I_{cu} pri U_e	10 kA pri 690 V (AC)
	110 kA pri 380/415 V (AC)
	200 kA pri 220/240 V (AC)
Referenčná teplota okolia	40°C



Obr. 3-2 Rozmery ističa Sentron 3VA5 [7]

3.3 Konštrukcia ističa 3VA52

Na Obr. 3-3 sú znázornené hlavné konštrukčné časti ističa



Obr. 3-3 Jednotlivé konštrukčné prvky ističa s termomagnetickou spúšťou [7]

Tabuľka 2 Popis konštrukčných prvkov z Obr. 3-3

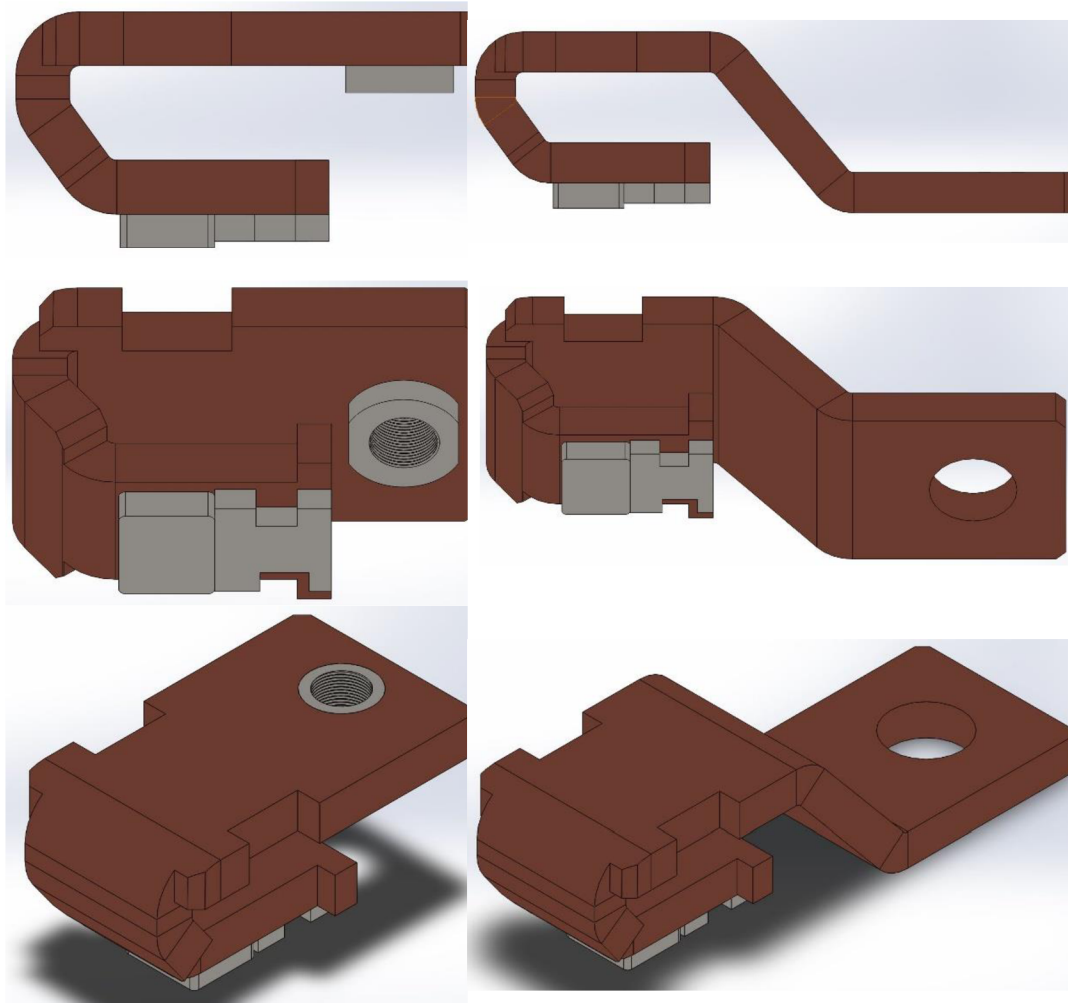
1	Vstupný a výstupný práporec kontaktného systému
2	Ovládací systém
3	Spúšť ističa
4	Rotačný kontaktný systém
5	Zhášacie komory
6	Plastová kazeta s kontaktným systémom

3.3.1 Kazeta s kontaktným systémom

Plastová kazeta s kontaktným systémom obsahuje rotačný systém, pevné kontakty, feromagnetické prvky, prívodný a vývodný práporec a dve zhášacie komory ako môžeme vidieť na Obr. 3-3. Každý pól ističa 3VA5 je tvorený vlastnými oddelenými plastovými kazetami s kontaktným systémom.[6]

Terminál vľavo slúži k pripojeniu samostatného bloku v ktorom sa nachádza nadprúdová spúšť. Terminál vpravo slúži ako hlavný pripojovací terminál celého prístroja. Terminály sú súčasťou práporecov, ktoré spájajú terminál s pevným kontaktom.

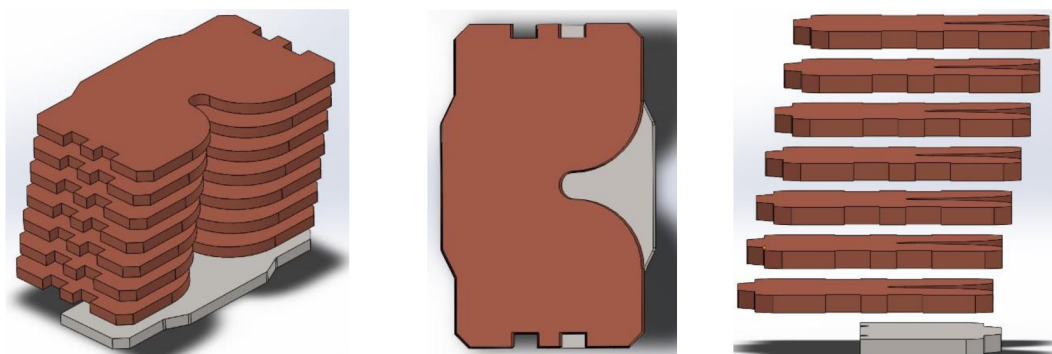
Práporce sú konštruované (zahnuté) tak, aby bol spínací oblúk pri vypínaní vytláčaný vplyvom elektrodynamickej sily smerom do zhášacích komôr.[6]



Obr. 3-4 Ľavý terminál

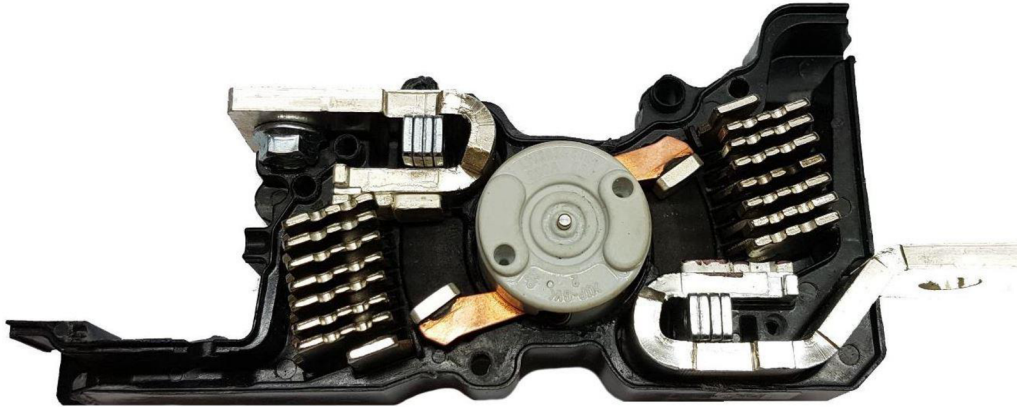
Obr. 3-5 Pravý terminál

Feromagnetické prvky slúžia na ovplyvňovanie elektrického oblúku počas vypínacieho deja. Zhášacie komory sú tvorené oddelenými plechmi, ktoré sú vyrobené z feromagnetického materiálu z dôvodu ovplyvňovania elektrického oblúku.[6]



Obr. 3-6 Konštrukcia zhášacej komory

Zhášacie komory slúžia k zhášaniu elektrického oblúku princípom ochladzovania a rozdelenia elektrického oblúku na väčší počet menších oblúkov, čo je výhodné z hľadiska nárastu napätia na oblúku vplyvom vzniku katódových a anódových úbytkov.[6]



Obr. 3-7 Plastová kazeta jedného pólu ističa 3VA5 [6]

Po spojení oboch polovic kazety k sebe, vzniknú nad pravou zhášacou komorou a pod ľavou zhášacou komorou dva výfuky, ktoré slúžia k odvedeniu plynov, ktoré vznikli pri horení oblúka smerom von z prístroja. Tieto výfuky tiež redukovávajú tlak vo vnútri kazety. Na Obr. 3-7 je vidieť celý kontaktný systém. Je riešený ako rotačný. Prúdovodná dráha je vo vypnutom stave prerušená na dvoch miestach, čo je výhodné z hľadiska zhášania elektrického oblúku a aj izolačnej hladiny v rozpojenom stave. Kontakty rotačného systému sú vyrobené zo zliatiny volfrámu, uhlíka a striebra. K ramenu rotačného systému sú kontakty pripevnené pomocou tvrdej pájky.[6]

3.3.2 Spínací systém

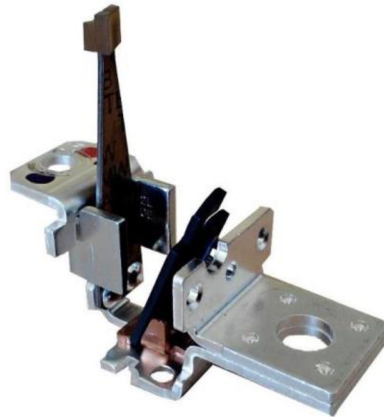
Spínací systém ističa je znázornený na Obr. 3-3 s označením číslo 2. Tento systém zastáva funkciu akumulátora energie, ktorá následne slúži k vybaveniu ističa spoločne s kontaktným a zhášacím systémom ističa. Pomocou tohto systému je istič uvedený do zapnutého stavu, kedy vedie elektrický prúd.

Pri zapínaní ističa do tohto stavu sú natiiahnuté vypínacie pružiny, v ktorých sa naakumuluje energia, ktorá je následne použitá na vybavenie ističa ak dostane pokyn od spúšte. Zapínanie ističa, respektíve maximálne natiiahnutie vypínacích pružín sa robí v dvoch krokoch. V prvom rade sú z vypnutej polohy (TRIP), kde sú pružiny v stave prakticky voľnej dĺžky, natiiahnuté do pozície (OFF). V tejto pozícii je istič stále v rozpojenom stave, avšak v tejto pozícii dochádza k opätovnému natiiahnutiu stradača spúšte ističa. Až teraz natiiahnutím páky do polohy (ON) sú pružiny maximálne natiiahnuté a istič je v zopnutom stave kedy vedie elektrický prúd.[5]

Pomocou ovládacej páky je možné ovládať istič manuálne, buď priamo rukou alebo pomocou ručnej mechanickej prevodovky, ktorá má výhodu v tom, že nám uľahčuje manipuláciu s ističom a má väčšiu silu. Na manipulovanie s ističom je možné použiť aj rôzne príslušenstvo, ako napríklad motorový pohon, ktorým je možné istič ovládať na diaľku bez potreby prítomnosti obsluhy.[5][7]

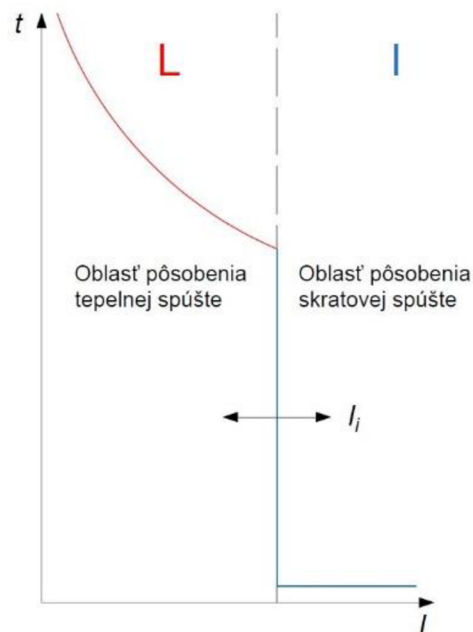
3.3.3 Termomagnetická spúšť TM 230

V tepelnej spúšti každého pólu je použitý jednostranne upevnený bimetalový pásik TB 185/08 lichobežníkového tvaru s medenou medzivrstvou. Je vyhrievaný nepriamo vedením tepla z paralelne vedúcej časti prúdovodnej dráhy, ku ktorej je prinitovaný. Pokiaľ nadprúd určitej veľkosti preteká dostatočne dlhú dobu, tak sa bimetal zahreje a v dôsledku toho sa prehne tak, že mechanicky zapôsobí na vybavovaciu lištu, ktorá uvoľní západku spínacieho systému. [6]



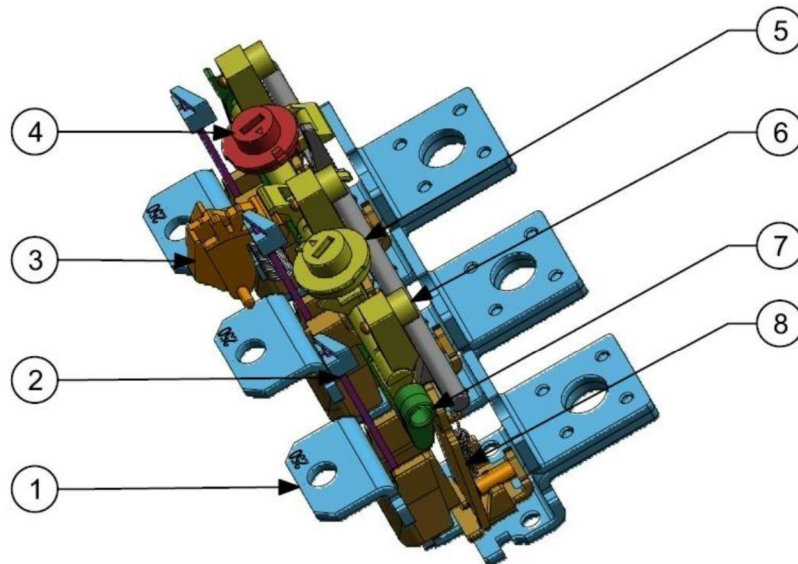
Obr. 3-8 Jeden pól termomagnetickkej nadprúdovej spúšte TM 230 [6]

Elektromagnet skratovej spúšte tvorí jho (jarmo) a kotva fixovaná vo východzej polohe pružinou. Vinutie elektromagnetu je tvorené magnetickým obvodom s jedným závitom. Je to časť prúdovodnej dráhy s paralelne pripojeným bimetalom. Tepelné aj skratové spúšte jednotlivých pólov ističa sú mechanicky spojené lištami, ktoré uvoľňujú voľnoběžku vybavovacieho mechanizmu prístroja. Jedná sa teda o nepriame pôsobenie bimetalu na vybavovací mechanizmus pomocou vybavovacej lišty. [6]



Obr. 3-9 Vypínacia charakteristika ističa Sentron 3VA52 [7]

Nadprúdová spúšť TM 230 je regulovateľná. Pri tomto type spúšte je regulácia menovitého (redukovaného) prúdu I_r možná otočným kotúčom zobrazeným na Obr. 3-10 číslo 4, avšak tento kotúč sa nachádza pod plastovým krytom celej spúšte. Táto hodnota I_r je už prednastavená pri výrobe tejto spúšte. Pomocou kotúča regulácie skratovej spúšte I_i , ktorý je označený na Obr. 3-10 s číslom 5, je možné prostredníctvom spoločnej lišty plynule meniť vzdialenosť kotvy od jha elektromagnetu (silu pružiny) a tým regulovať pôsobenie skratovej spúšte. Rozsah nastavenia je $I_i = 5 \div 10 \times I_n$ teda $I_i = 1250-2500A$. [6]



Obr. 3-10 Termomagnetická nadprúdová spúšť TM 230 [5][6]

Ako je vidieť z Obr. 3-10, spúšť TM 230 sa dá rozdeliť na 8 hlavných častí.

1. *Prúdovodná dráha* – Je tvorená z medenej pásoviny s postriebením povrchom. Prúdovodná dráha je tvarovaná podľa spôsobu usadenia do krytu spúšte. Najužšie miesto je v okolí bimetalu, kde dochádza k jeho nepriamemu zahrievaniu. Hlavná funkcia prúdovodnej dráhy spočíva vo vedení prúdu od prívodných káblov cez spúšť až ku kontaktnému systému. [6]
2. *Bimetal* – Je tvorený dvomi kompozitnými materiálmi, medzi ktorými sa nachádza medený pásik, ktorý zlepšuje rýchlosť ohrevu a tým aj jeho prehyb. [6]
3. *Stradač* – Systém otočného plastového dielca s pružinou, slúžiaci k vysielaniu impulzov na spínací systém. Toho je dosiahnuté naakumulovanou energiou v pružine, ktorá je hlavnou vybavovacou hriadeľou uvoľnená. [6]
4. *Nastavenie skratovej spúšte* - Otáčaním plastového kotúča dochádza k prevodu otáčavého pohybu na priamočiary, ktorý spôsobí priblíženie kotvy smerom k jhu elektromagnetu. Táto nastavená vzdialenosť určuje hodnotu skratového prúdu, ktorý istič prakticky okamžite (v jednotkách ms) vypne.

V našom prípade je táto spúšť už prednastavená a nie je možné ju nastavovať.[6]

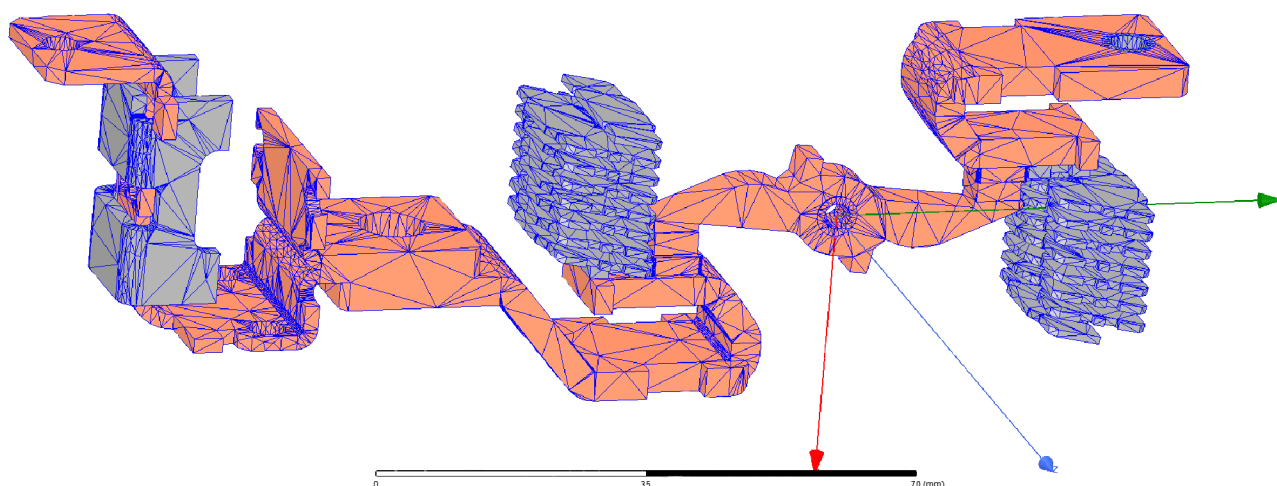
5. *Nastavenie tepelnej spúšte* - Otáčaním plastového kotúča spôsobíme lineárny pohyb , tentokrát hlavného vybavovacieho hriadeľa, kedy posunom voči bimetalu dochádza k nastaveniu hodnoty prúdu a tým aj k modelovaniu vypínacej charakteristiky pri preťažení.[6]
6. *Hlavný vybavovací hriadeľ* – Slúži k uvoľneniu stradača. Pri vybavení tepelnej spúšte, teda pri ohybe bimetalu, dôjde k pootočeniu tejto hriadele a následne k uvoľneniu pružiny stradača, ktorý následne dáva pokyn k reakcii systému. Rovnaký postup je aj pri vypínaní skratu, ale teraz miesto bimetalu otáča hlavnou hriadeľou pohybujúca sa kotva elektromagnetu. [6]
7. *Skratová signalizačná hriadeľ* – Pri vypínaní skratového prúdu a pohybe kotvy elektromagnetu dochádza okrem otáčania hlavnej vybavovacej hriadele aj k pohybu skratovej signalizačnej hriadele, ktorá slúži ako indikátor, že došlo k vypnutiu ističa z dôvodu skratu.[6]
8. *Kotva skratovej spúšte* – Kovová kotva elektromagnetu je pri nadprúde za pomoci pôsobenia elektromagnetickej sily priťahovaná k jhu. Aby k tomuto pritiahnutiu dochádzalo iba pri vyšších nadprúdoch (skratoch), je tomu prispôbená jej vzdialenosť od jha a sila použitej pružiny, ktorá kotvu pridrža vo východzej pozícii. Hodnotu vypínacieho skratového prúdu je možné meniť pomocou kombinácie vzdialenosti od jha a tuhosti pružiny.[6]

4 METÓDA KONEČNÝCH PRVKOV

Metóda konečných prvkov je metóda, ktorá sa používa na numerické riešenie polí, ktoré sú popísané diferenciálnymi rovnicami. Oblasť riešeného poľa sa pokryje sieťou prvkov, na ktorých sa potom aproximuje hľadaná veličina pomocou hodnôt definovaných v uzloch siete s použitím správne zvolenej aproximačnej funkcie. Presnosť výpočtu závisí na hustote a tvare prvkov siete a na voľbe aproximačnej funkcie. Diskretizácia rovníc vedie k sústave rovníc pre neznáme uzlové hodnoty. Po vyriešení sústavy rovníc sa vyhodnotia ďalšie požadované veličiny.[1][8]

Postup pri aplikácii MKP je tvorený týmito krokmi:[1][8]

- Generácia siete prvkov s uzlami
- Aproximácia potenciálu na jednotlivých prvkoch z uzlových hodnôt
- Zostavenie sústavy rovníc pre neznáme uzlové hodnoty
- Vyriešenie sústavy
- Spracovanie dodatočných požiadaviek – výpočet ďalších veličín a zobrazenie výsledkov

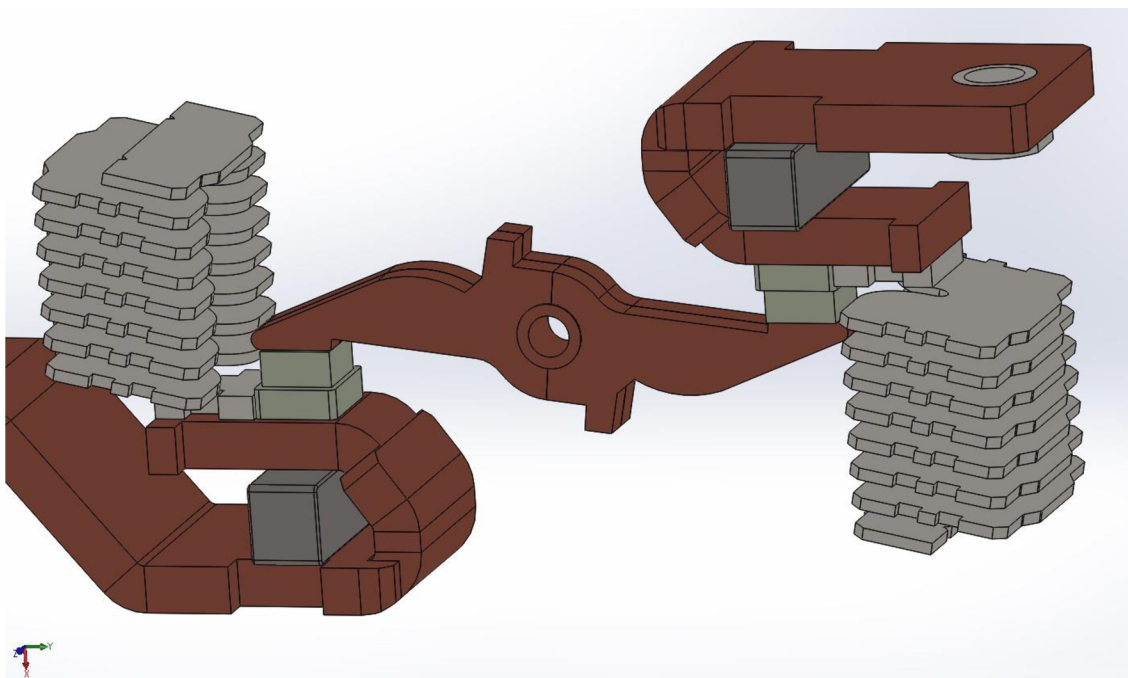


Obr. 4-1 Rozloženie siete prvkov na jednej fáze ističa Siemens 3VA5

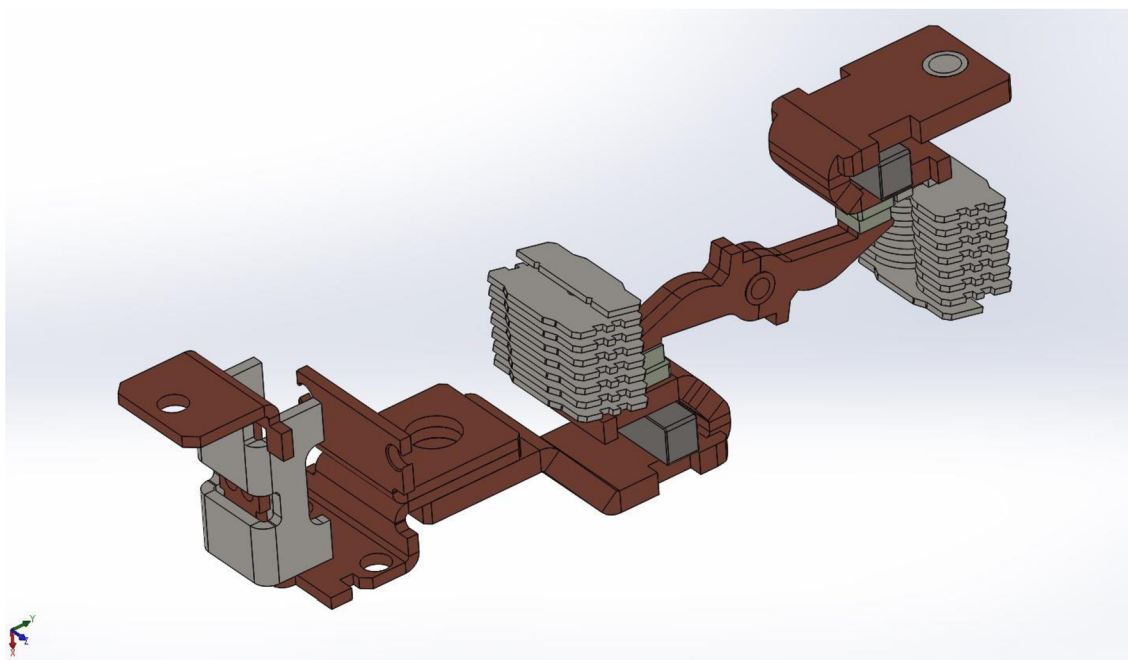
5 MODEL PRÚDOVODNEJ DRÁHY ISTIČA

Táto kapitola sa zaoberá geometriou prúdovodnej dráhy ističa Siemens 3VA5, ktorý dodala firma OEZ Letohrad a následným vytvorením modelu. Našou úlohou bolo zmerať rozmery jednotlivých častí prúdovodnej dráhy z fyzického zariadenia. Keďže jednotlivé komponenty boli premeriavané pomocou posuvného meradla, mohlo dôjsť k odchýlkam merania. Následne pomocou zmeraných hodnôt boli vytvorené v programe Solidworks modely jednotlivých komponentov, ktoré sa neskôr spojili do zostavy. Plastové diely sa do modelu nezahrnuli, pretože výpočet dynamických síl nijako neovplyvnia a predĺžili by dobu výpočtu v programe Ansys Maxwell.

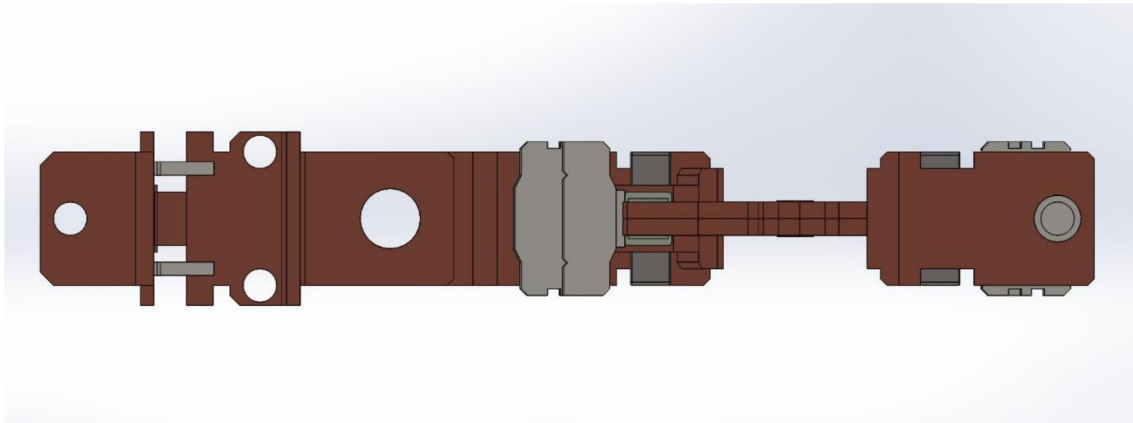
Model jednej fázy ističa Siemens 3VA5 sa skladá z 31 komponentov, ktoré musia na seba presne naväzovať. Táto požiadavka je splnená tým, že sa jednotlivé komponenty medzi sebou zafixujú väzbami. Na Obr. 5-1 je znázornený model kontaktov jednej fázy ističa.



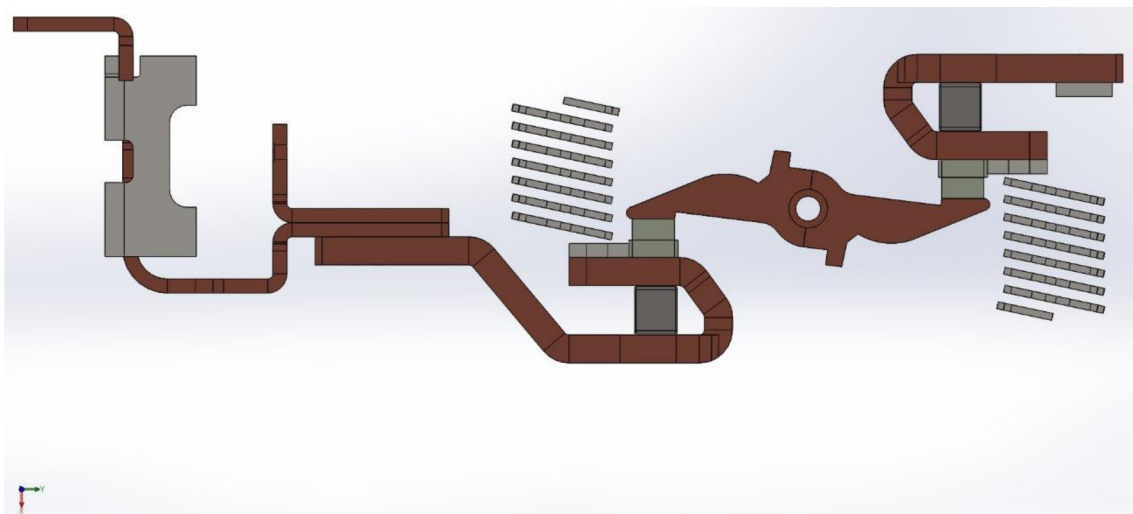
Obr. 5-1 Model kontaktov jednej fázy



Obr. 5-2 Celkový pohľad na jednu fázu



Obr. 5-3 Pohľad zhora



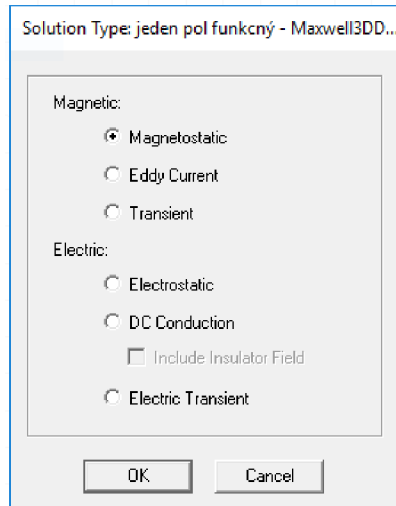
Obr. 5-4 Bočný pohľad

6 STACIONÁRNY VÝPOČET SILY V PROGRAME ANSYS MAXWELL

Pomocou tohto typu výpočtu je možné zistiť moment a elektrodynamické sily pre ustálený jednosmerný prúd. Tento výpočet neumožňuje sledovať meniace sa sily v určitom časovom intervale a zanedbávajú sa pri ňom javy spojené so vznikom vírivých prúdov a povrchových javov. [1]

6.1 Postup simulácie v programe Ansys Maxwell

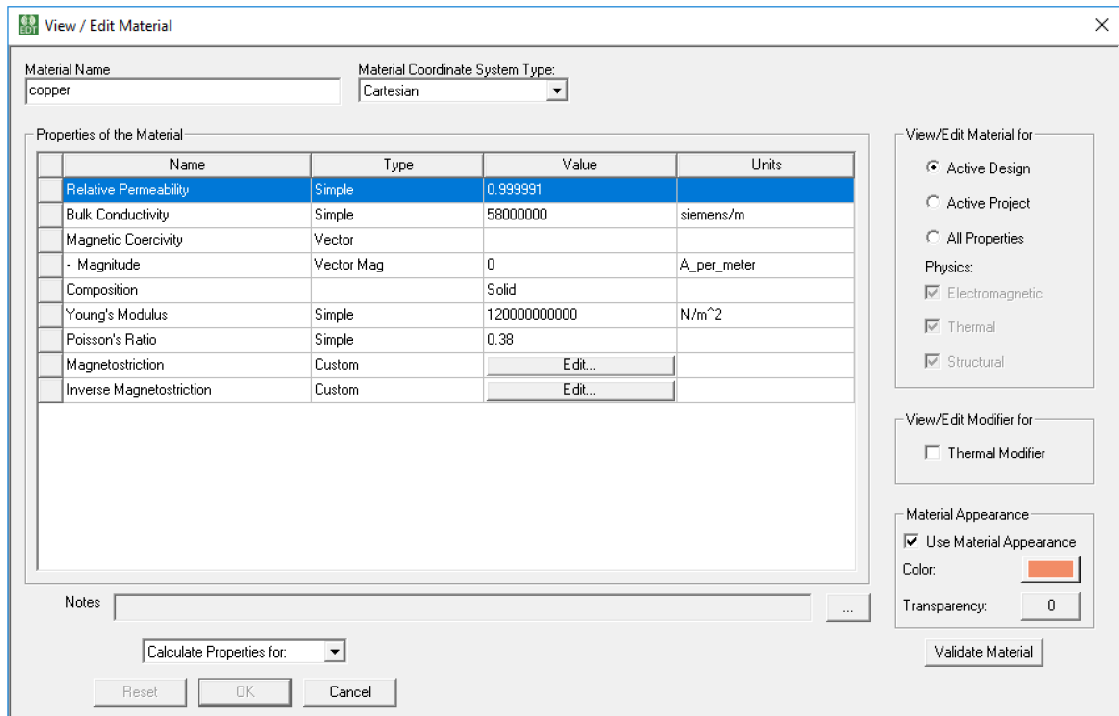
Po vytvorení modelu v programe Solidworks a po jeho zjednodušení sa celá zostava uložila vo formáte ACIS (.sat). Tento typ súboru bol následne naimportovaný do programu Ansys Maxwell pomocou funkcie (Modeler → Import). Keďže sa táto kapitola zaoberá statickou analýzou, tak na tento typ výpočtu bola zvolená Magnetostatická analýza.



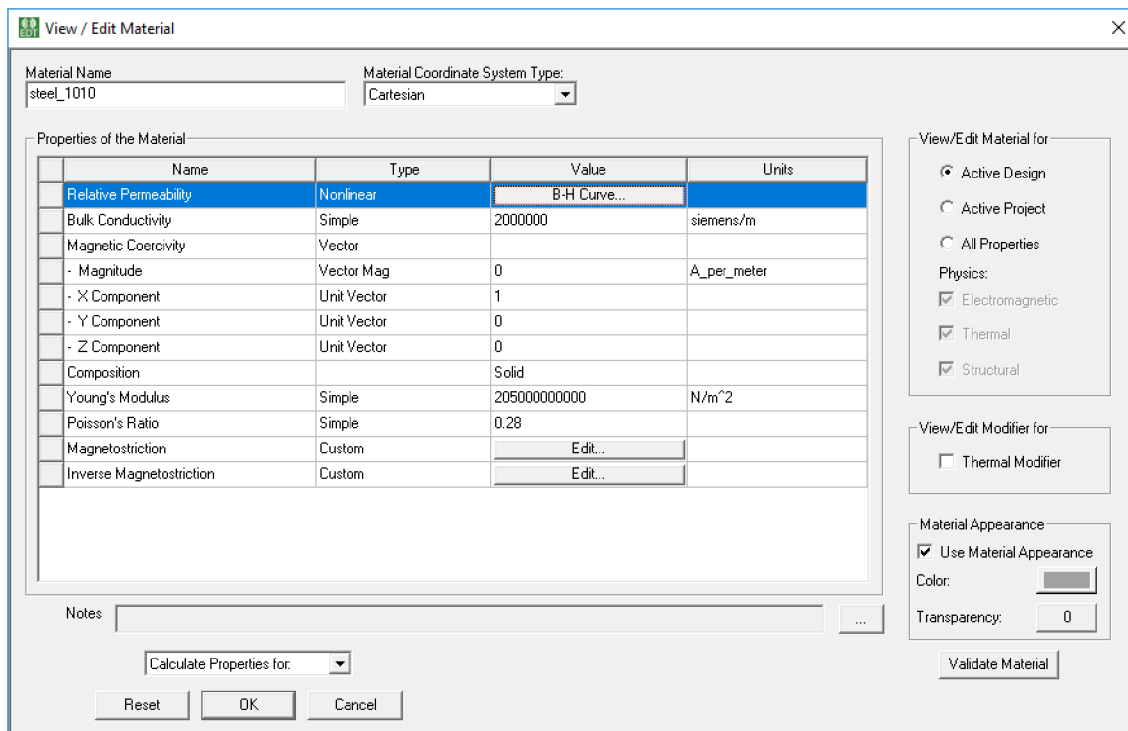
Obr. 6-1 Voľba analýzy

6.1.1 Nastavenie materiálov

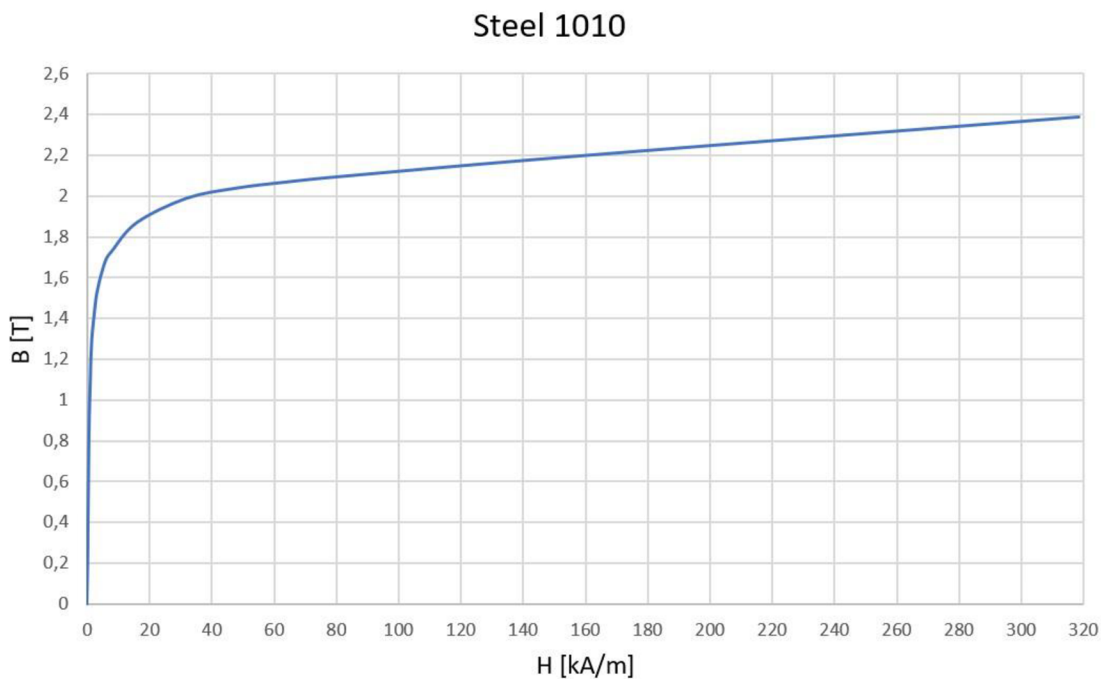
Následne v geometrii prúdovodnej dráhy boli jednotlivým komponentom priradené materiály (AssignMaterial → Edit Material). Celá prúdovodná dráha sa skladá z medi (Cooper), akurát plechy zhašacej komory, Ú záhyb spúšte, rozpery práporcov a závitová vložka sú z ocele (Steel 1010). Okolie prúdovodnej dráhy je tvorené vzduchom.



Obr. 6-2 Nastavenie materiálov - Meď (Cooper)



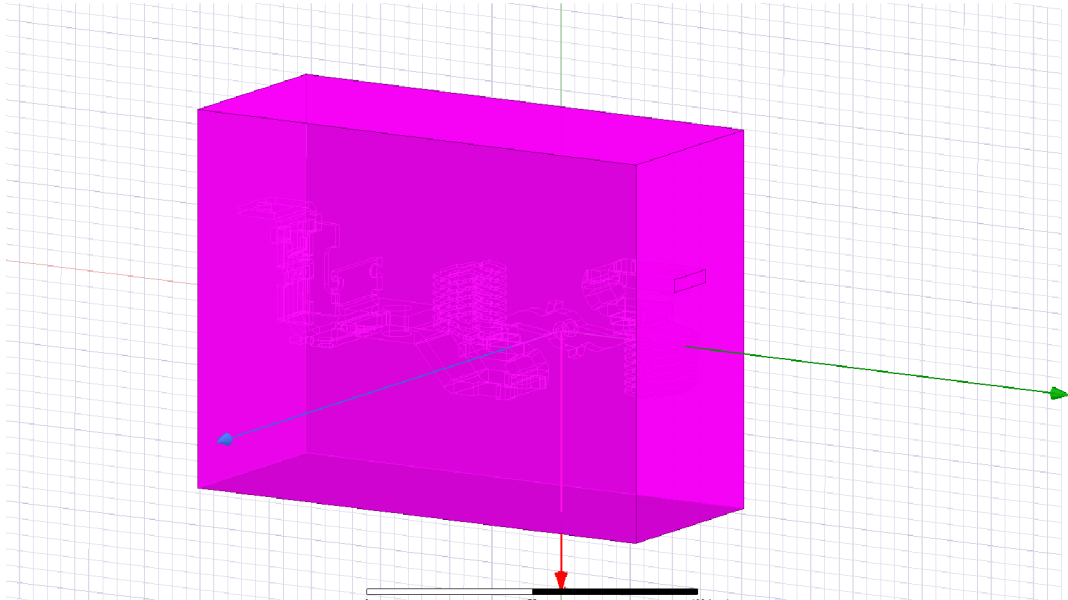
Obr. 6-3 Nastavenie materiálov - Oceľ (Steel 1010)



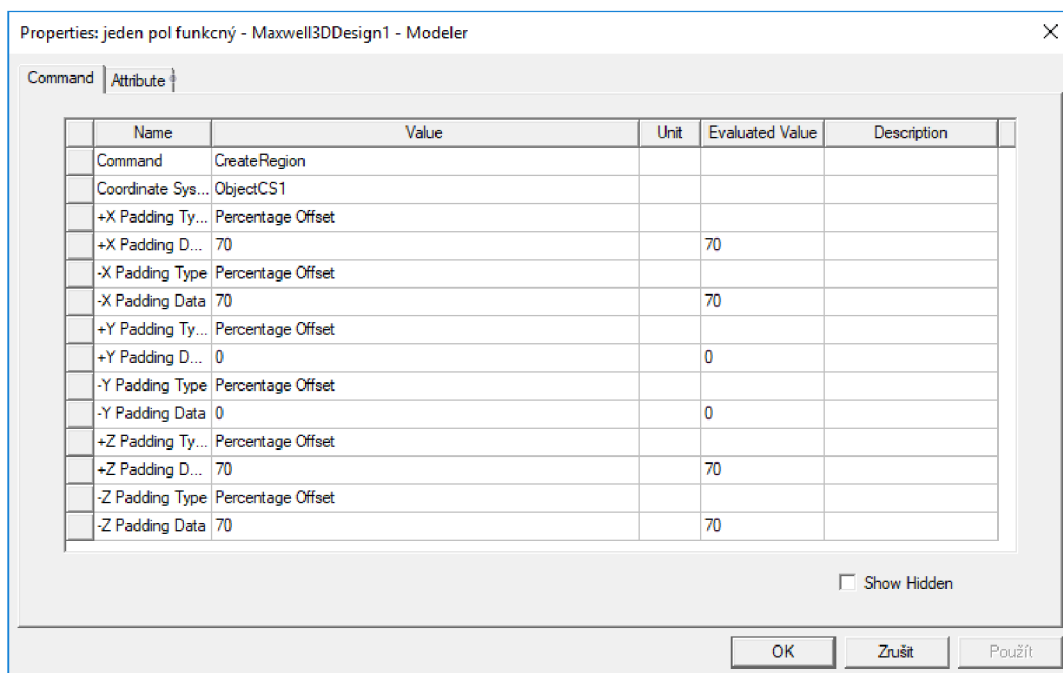
Obr. 6-4 B-H charakteristika Ocele (Steel 1010)

6.1.2 Nastavenie okrajových podmienok

Okolo prúdovodnej dráhy je potrebné pri výpočte definovať okrajové podmienky v osiach x,y,z (Boundary → Properties). V nastaveniach sa nastavili požadované rozmery vo všetkých osiach a po potvrdení sa okolo prúdovodnej dráhy vykreslil fialový kváder v ktorom je celá geometria uzavretá. V tomto objekte sa nachádza vzduch. Objekt, v ktorom je geometria uzavretá, je znázornený na Obr. 6-5.



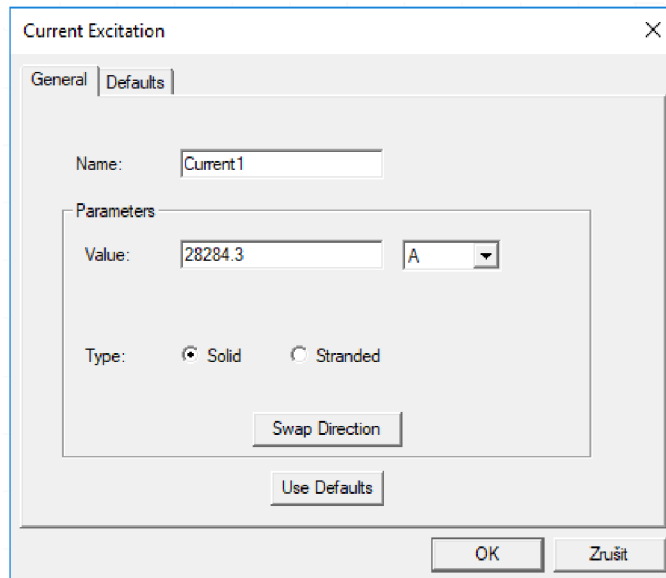
Obr. 6-5 Znáozornenie okrajových podmienok



Obr. 6-6 Nastavenie okrajových podmienok

6.1.3 Nastavenie prúdov

Pri statickom výpočte nás zaujímajú elektrodynamické sily, pôsobiace na kontakty ističa pri prechode skratových prúdov, ktoré odpovedajú efektívnym hodnotám 2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,24,26,28 a 30 kA. Keďže tento výpočet zahŕňa len jednu fázu, tak sa fázovým posunom nemusíme zaoberať. (Excitation → Assing → Current)



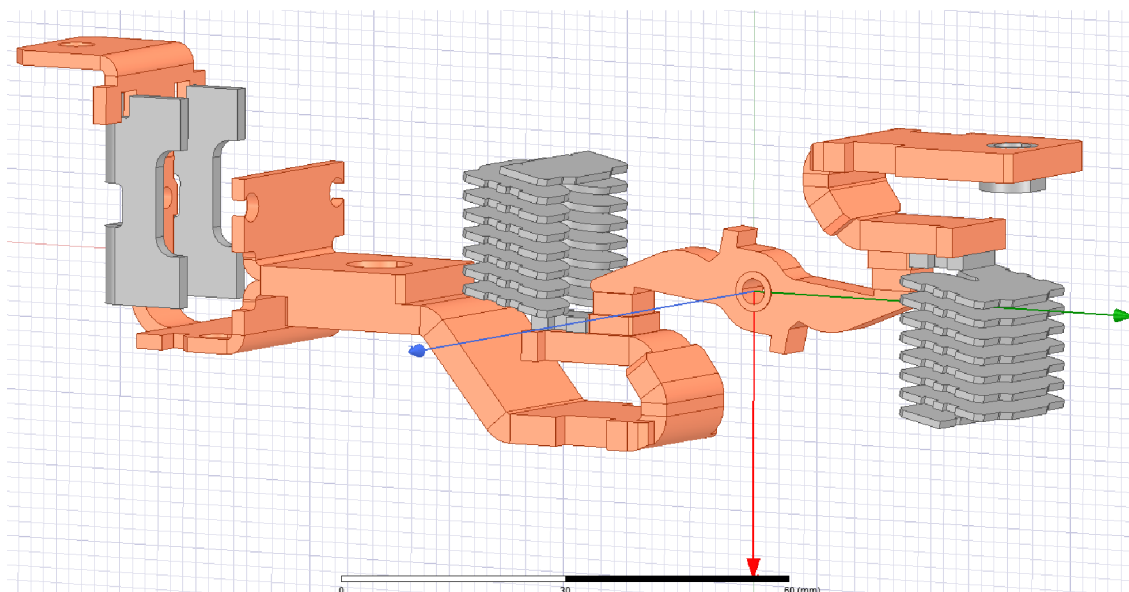
Obr. 6-7 Nastavenie prúdov

Príklad nastavenia prúdu – odpovedá hodnote efektívneho prúdu 20 kA v prvej fáze:

$$\begin{aligned}i &= I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos \varphi & (6.1) \\i &= 20000 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos 0 \\i &= 28284,3 \text{ A}\end{aligned}$$

6.2 Výpočet momentu

V programe Ansys Maxwell budeme počítať moment vznikajúci v osi Z pri rôznych hodnotách prúdu. V mieste kde chceme počítať moment je potrebné najprv vytvoriť nový súradnicový systém (Modeler → Coordinatesystem → Create → Relative CS → Offset). Novo vytvorený súradnicový systém je znázornený na Obr. 6-8. Po vytvorení nového súradnicového systému, je potrebné zdefinovať na akých častiach prúdovodnej dráhy má byť moment počítaný. V tomto prípade sa bude jednať o výpočet momentu na hriadeli otočného mostíka v prvej fáze.



Obr. 6-8 Výpočet momentu v osi Z

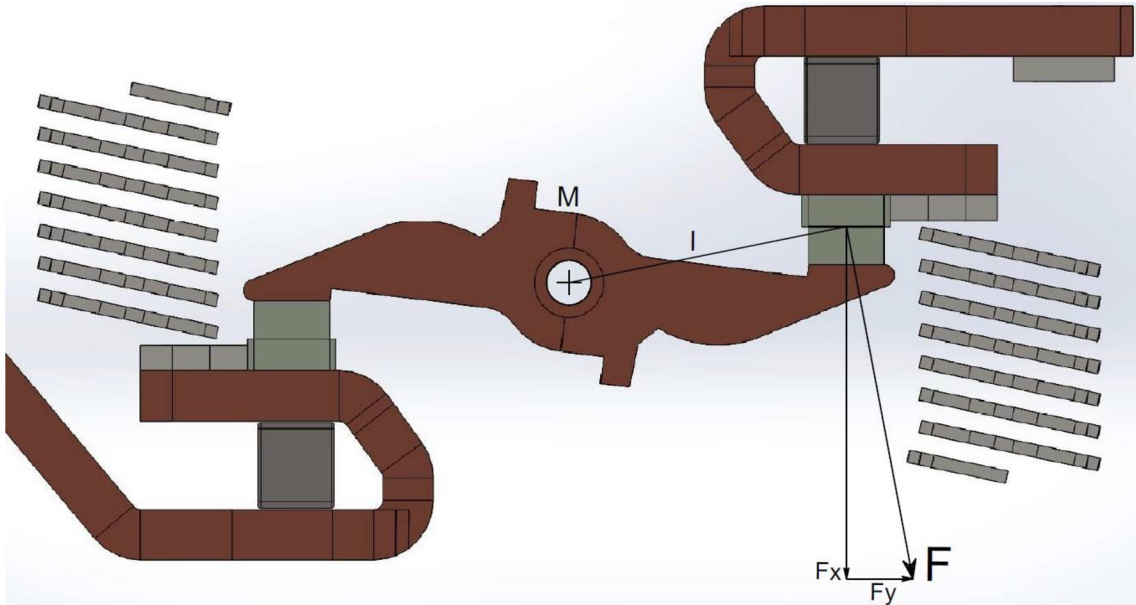
Tabuľka 3 Moment pôsobiaci v prvej fáze

Fáza 1	
Prúd	Moment
I [kA]	M [Nm]
2	-0,042
4	-0,166
6	-0,369
8	-0,647
10	-1,000
12	-1,428
14	-1,930
16	-2,508
18	-3,161
20	-3,890
22	-4,693
24	-5,572
26	-6,527
28	-7,557
30	-8,662

6.3 Výpočet elektrodynamických síl

Z nameraných momentov pre uvedené prúdy bola vypočítaná sila F , ktorá pôsobí v mieste styku pohyblivého kontaktu, ktorý sa nachádza na mostíku a pevného kontaktu, ktorý sa nachádza na malom práporci. Sila F sa vypočíta podľa vzťahu (6.2).

$$F = \frac{M}{l} \quad [N; Nm, m] \quad (6.2)$$



Obr. 6-9 Pôsobenie sily F v osi kontaktu

Príklad výpočtu pre pravý kontakt prvej fázy – prúd 20 kA:

Písmenom M je označené miesto, v ktorom sa počíta moment. Je to stred hriadeľa, na ktorom sa otáča spínací mostík s kontaktmi. Písmeno l označuje vzdialenosť od stredu hriadeľa k stredu kontaktu. Táto vzdialenosť je $l = 0,02244$ m. Spínací mostík obsahuje dva kontakty, takže výsledná sila sa rovnomerne rozdelí do oboch kontaktov. Výsledná sila v jednom kontakte sa vypočíta podľa vzorca (6.3)

$$F_{pravý} = \frac{M}{l} \cdot \frac{1}{2} = \frac{-3,89}{0,02244} \cdot \frac{1}{2} = -86,67 \text{ N} \quad (6.3)$$

Tabuľka 4 Sily pôsobiace na kontakty v prvej fáze

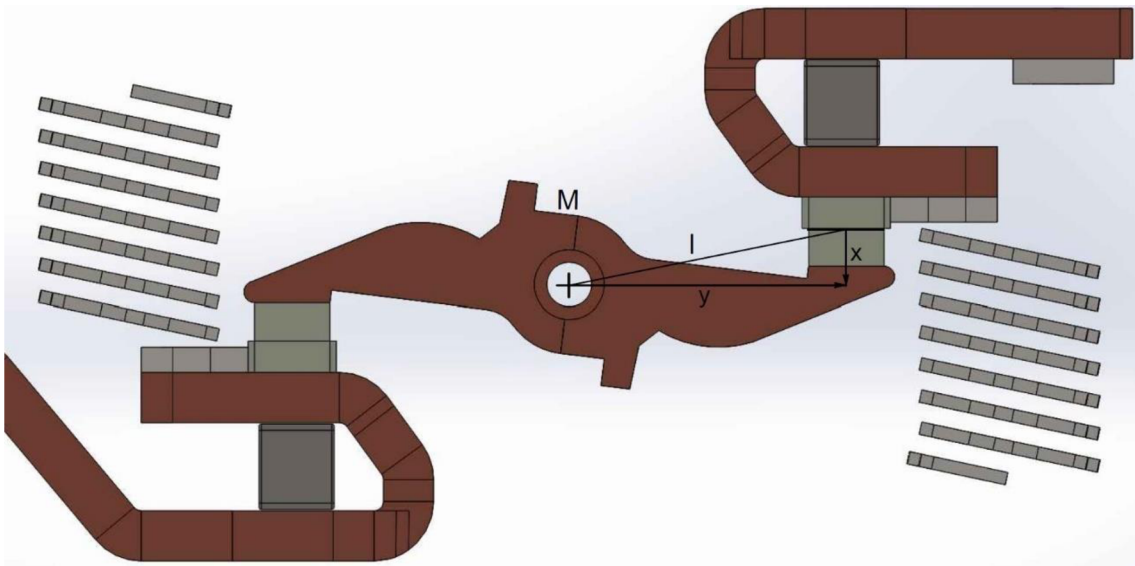
Fáza 1								
Prúd	Sila		Prúd	Sila		Prúd	Sila	
I [kA]	$F_{ľavý}$ [N]	$F_{pravý}$ [N]	I [kA]	$F_{ľavý}$ [N]	$F_{pravý}$ [N]	I [kA]	$F_{ľavý}$ [N]	$F_{pravý}$ [N]
2	-0,93	-0,93	12	-31,81	-31,81	22	-104,57	-104,57
4	-3,69	-3,69	14	-43,01	-43,01	24	-124,16	-124,16
6	-8,22	-8,22	16	-55,88	-55,88	26	-145,43	-145,43
8	-14,42	-14,42	18	-70,43	-70,43	28	-168,37	-168,37
10	-22,28	-22,28	20	-86,67	-86,67	30	-193	-193

6.4 Rozloženie sily F na zložky F_x a F_y

Vypočítaná sila F z predošlej kapitoly, ktorá pôsobí v mieste styku pevného a pohyblivého kontaktu, je rozdelená na zložky F_x a F_y , a hodnoty jednotlivých zložiek síl je možné vypočítať pomocou vzorcov (6.4) a (6.5).

$$F_x = F \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{x}{y}\right)\right) \quad [N; N, m, m] \quad (6.4)$$

$$F_y = F \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{x}{y}\right)\right) \quad [N; N, m, m] \quad (6.5)$$



Obr. 6-10 Vzdialenosti v osiach x a y

Príklad výpočtu pre pravý kontakt prvej fázy – prúd 20 kA:

Vzdialenosť x pre pravý kontakt: $x = 0,00445$ m

Vzdialenosť y pre pravý kontakt: $y = 0,022$ m

Sila F_x : Vypočítame ju pomocou vzťahu (6.4)

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

$$F_x = -86,67 \cdot \cos\left(\arctg\left(\frac{0,00445}{0,022}\right)\right) = -84,95N$$

Sila F_y : Vypočítame ju pomocou vzťahu (6.5)

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

$$F_y = -86,67 \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{0,00445}{0,022}\right)\right) = -17,18N$$

Tabuľka 5 Sily F_x a F_y pôsobiace v kontaktoch prvej fázy

Fáza 1								
Prúd	Sila		Prúd	Sila		Prúd	Sila	
	$F_{\text{ľavý}} = F_{\text{pravý}}$			$F_{\text{ľavý}} = F_{\text{pravý}}$			$F_{\text{ľavý}} = F_{\text{pravý}}$	
I [kA]	F_x [N]	F_y [N]	I [kA]	F_x [N]	F_y [N]	I [kA]	F_x [N]	F_y [N]
2	-0,91	-0,18	12	-31,18	-6,31	22	-102,49	-20,73
4	-3,62	-0,73	14	-42,16	-8,53	24	-121,7	-24,62
6	-8,06	-1,63	16	-54,77	-11,08	26	-142,54	-28,83
8	-14,13	-2,86	18	-69,03	-13,96	28	-165,03	-33,38
10	-21,84	-4,42	20	-84,95	-17,18	30	-189,17	-38,26

6.5 Výpočet odpudivej sily F_u v prúdovodnej úžine

K vypočítanej sile F_x sa pripočíta odpudivá silu, ktorá vzniká v prúdovodnej úžine. Táto sila je rozložená na zložky v osi x a na zložku pôsobiacu v osi y . Nás zaujíma iba sila pôsobiaca v osi x a budeme ju označovať F_u . Sila pôsobiaca v osi y je eliminovaná materiálou pevnosťou kontaktného materiálu. Následne sa táto sila vypočíta podľa vzťahu (6.6). [1]

$$F_u = I^2 \cdot \ln \frac{D}{a} \cdot 10^{-7} \quad [N; A, m] \quad (6.6)$$

$$D = \sqrt{a \cdot b} \quad (6.7)$$

, kde D je rozmer kontaktov a a je plocha styku kontaktov

$$a = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot HB}} \quad [mm; N, MPa] \quad (6.8)$$

, kde F je prítlačná sila kontaktu a HB je tvrdosť materiálu kontaktu

Tabuľka 6 Vlastnosti kontaktného materiálu

Kontakt	Materiál	Prítlačná sila F [N]	Tvrdosť HB [MPa]
Pevný a pohyblivý	AgW50	70	450

Príklad výpočtu pre pravý kontakt prvej fázy – prúd 20 kA:

$$F_u = I^2 \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{a \cdot b}}{\sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot HB}}} \right) \cdot 10^{-7} = 28284,3^2 \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{0,006 \cdot 0,006}}{\sqrt{\frac{4 \cdot 70}{\pi \cdot 450}}} \right) \cdot 10^{-7} = 208,11 \text{ N} \quad (6.9)$$

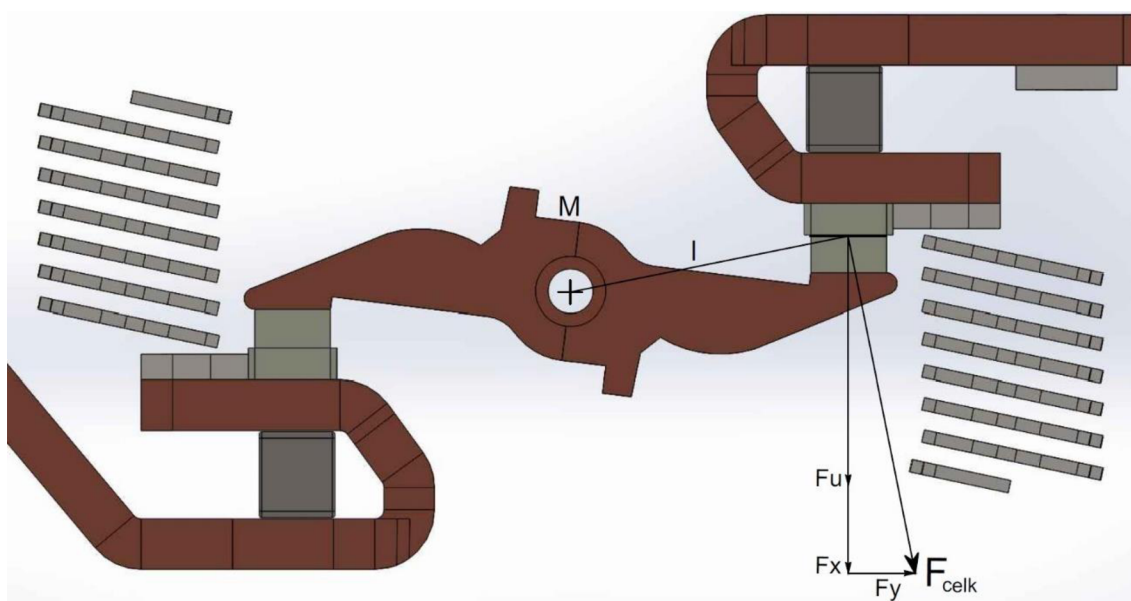
Tabuľka 7 Sila F_u v prúdovodnej úžine kontaktov

Fáza 1					
Prúd	Sila	Prúd	Sila	Prúd	Sila
	$F_{\text{pravý}} = F_{\text{pravý}}$		$F_{\text{pravý}} = F_{\text{pravý}}$		$F_{\text{pravý}} = F_{\text{pravý}}$
I [kA]	F_u [N]	I [kA]	F_u [N]	I [kA]	F_u [N]
2	2,08	12	74,92	22	251,81
4	8,32	14	101,97	24	299,68
6	18,73	16	133,19	26	351,7
8	33,3	18	168,57	28	407,89
10	52,03	20	208,11	30	468,24

6.6 Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk}

V predošlých kapitolách boli zistené hodnoty sily F_x , ktorá pôsobí v osi x, hodnoty sily F_y , ktorá pôsobí v osi y a hodnoty odpudivej sily F_u , ktorá vzniká v prúdovodnej úžine a pôsobí v osi x pri prechode uvedených hodnôt prúdov. Výsledná sila pôsobiaca na kontakty prístroja sa vypočíta podľa vzťahu (6.10). Rozloženie síl je znázornené na Obr. 6-11.

$$F_{\text{celk}} = \sqrt{(F_x + F_u)^2 + F_y^2} \quad [N; N, N, N] \quad (6.10)$$



Obr. 6-11 Určenie výslednej sily F_{celk}

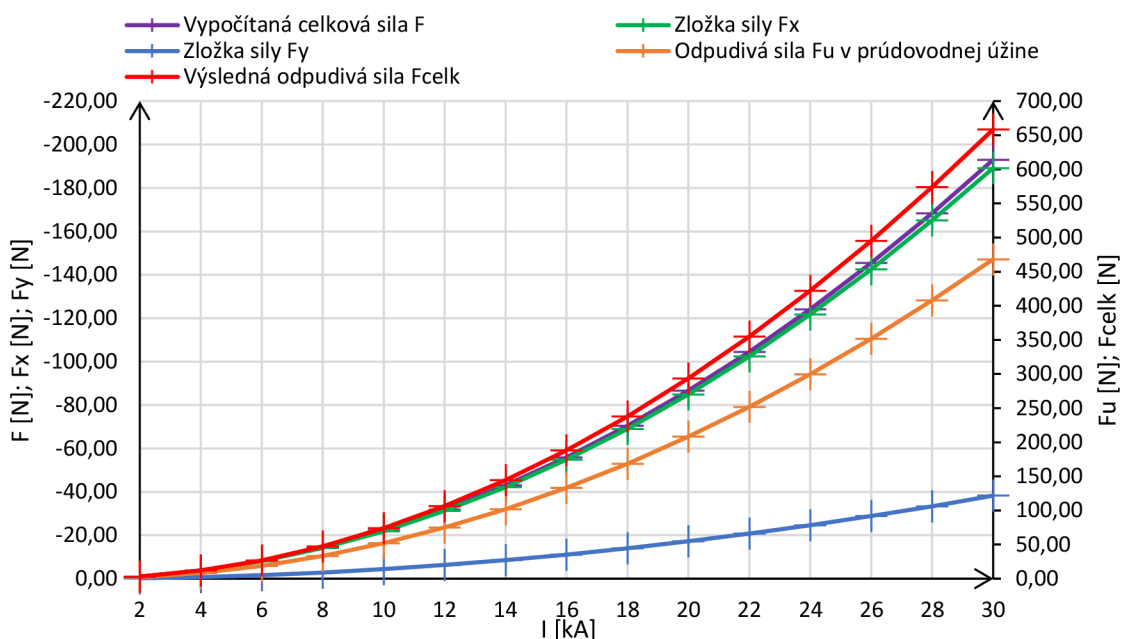
Príklad výpočtu pre pravý kontakt prvej fázy – prúd 20 kA:

$$F_{\text{celk}_p} = \sqrt{(F_x + F_u)^2 + F_y^2} = \sqrt{(-84,95 - 208,11)^2 + (-17,18)^2}$$

$$F_{\text{celk}} = 293,56 \text{ N}$$

Tabuľka 8 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch

Fáza 1								
Prúd	Sila		Prúd	Sila		Prúd	Sila	
I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]
2	3	3	12	106,28	106,28	22	354,91	354,91
4	11,96	11,96	14	144,38	144,38	24	422,09	422,09
6	26,84	26,84	16	188,29	188,29	26	495,09	495,09
8	47,52	47,52	18	238,01	238,01	28	573,89	573,89
10	74	74	20	293,56	293,56	30	658,52	658,52



Obr. 6-12 Závislosti síl na prúde

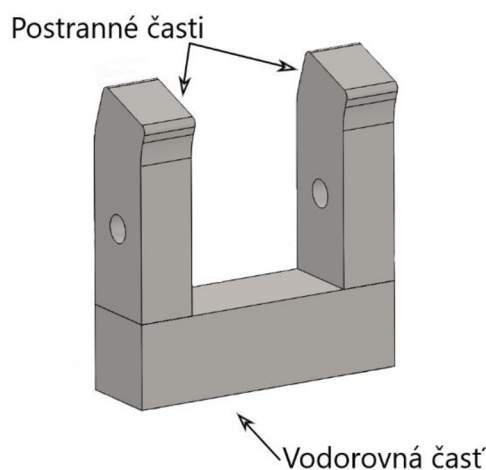
6.7 Zhodnotenie výsledkov

Táto kapitola sa zaoberá výpočtom síl v programe Ansys Maxwell. Na tento výpočet bola použitá Magnetostatická analýza. Pomocou tejto analýzy bol zistený moment na hriadieli otočného mostíka v osi z, ktorý sa vytvorí pri prechode skratového prúdu prúdovodnou dráhou. Moment pri prechode prúdu o veľkosti 30 kA je rovný $-3,89$ Nm. Následne boli pomocou získaných hodnôt momentov vypočítané veľkosti elektrodynamických síl, ktoré pôsobia v kontaktnom styku pri prechode skratových prúdov. V ďalšom kroku boli vypočítané veľkosti síl pôsobiacich v osiach x a y. Veľkosť sily pôsobiacej pri prechode 20 kA v osi x je $F_x = -189,17$ N a v osi y je $F_y = -38,26$ N. Následne v ďalšom kroku bola vypočítaná veľkosť odpudivej sily F_u v prúdovodnej úžine. Pri tomto výpočte bola najdôležitejšia sila F_x , pretože sila F_y je eliminovaná materiálou pevnosťou kontaktného materiálu. A nakoniec bola vypočítaná výsledná odpudivá sila v kontaktnom styku F_{celk} . Veľkosť celkovej odpudivej sily F_{celk} pri prechode 30 kA je rovná 658,52 N. Všetky závislosti síl na prúde pre pravý kontakt sú znázornené na Obr.6-12. Momenty boli namerané na modeli, ktorý neobsahoval žiadne feromagnetické prvky v okolí prúdovodnej dráhy a neobsahoval ani zhášacie komory.

7 STACIONÁRNY VÝPOČET SÍL S UVAŽOVANÍM VPLYVU FEROMAGNETICKÝCH MATERIÁLOV

Pomocou tohto typu výpočtu sme zistili moment a elektrodynamické sily pre ustálený jednosmerný skratový prúd v rozsahu 2 – 30 kA. V tejto kapitole sa rovnako ako predchádzajúcej kapitole zaoberáme výpočtom elektrodynamických síl, ktoré pôsobia v kontaktnom styku s tým rozdielom, že budeme skúmať veľkosť výslednej odpudivej sily F_{celk} , ktorú ovplyvňujú blízke feromagnetické materiály. Simuláciu urobíme pre 4 typy rozmiestnenia feromagnetických materiálov okolo kontaktného styku. Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} bude rovnaký ako v predchádzajúcej kapitole.

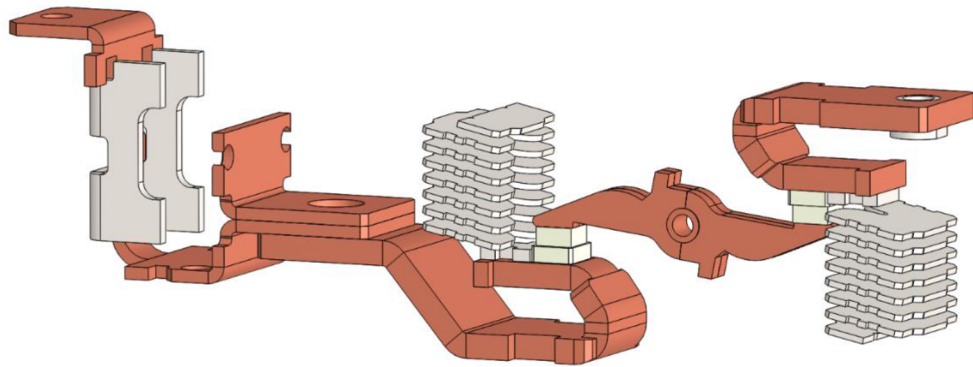
V prvom prípade budeme simulovať situáciu, kedy sa okolo kontaktného styku nenachádzajú žiadne feromagnetické materiály. V druhom prípade budeme simulovať situáciu, kedy bude do veľkého a malého práporca vložená vodorovná časť U-závitu feromagnetika. V treťom prípade budeme simulovať situáciu, kedy vodorovnú časť z práporcov odstránime a pridáme postranné feromagnetiká. Štvrtú simuláciu urobíme pre prípad, keď budú v okolí kontaktných stykov malého a veľkého práporca umiestnené vodorovné a postranné feromagnetické materiály, ktoré tvoria celkový U-závit. Poslednú simuláciu urobíme pre prípad, keď do modelu prúdovodnej dráhy jednej fázy ističa, pridáme model zapínacieho systému, ktorý je prevažne tvorený feromagnetickými materiálmi a z toho dôvodu nás bude zaujímať, do akej miery môže zapínací systém ovplyvniť výslednú odpudivú silu F_{celk} v kontaktnom styku.



Obr. 7-1 U - závit zložený z (P) postranných častí a (V) vodorovnej časti z feromagnetického materiálu

7.1 Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} pre 1. prípad

V tomto prípade je výsledná odpudivá sila F_{celk} vypočítaná za predpokladu, že sa v okolí kontaktných stykov nenachádzajú žiadne prvky z feromagnetického materiálu.



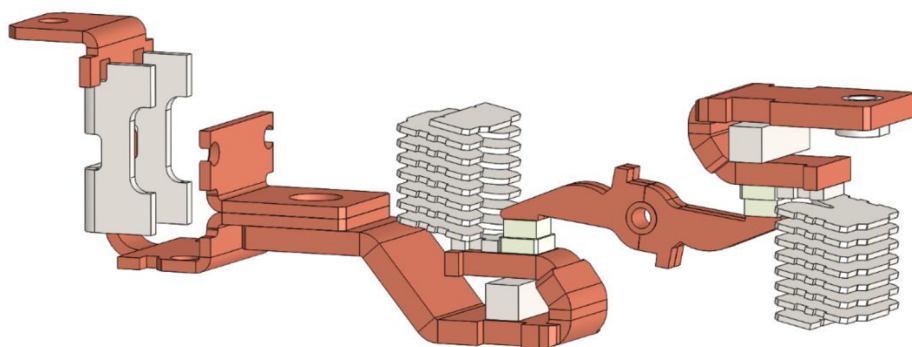
Obr. 7-2 Prúdovodná dráha bez feromagnetických prvkov

Tabuľka 9 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch pre 1. prípad

Fáza 1								
Prúd	Sila		Prúd	Sila		Prúd	Sila	
I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]
2	2,63	2,63	12	94,12	94,12	22	311,87	311,87
4	10,53	10,53	14	127,71	127,71	24	370,35	370,35
6	23,68	23,68	16	166,30	166,30	26	433,68	433,68
8	42,04	42,04	18	209,87	209,87	28	501,91	501,91
10	65,56	65,56	20	258,40	258,40	30	575,14	575,14

7.2 Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} pre 2. prípad (V)

V tomto prípade je výsledná odpudivá sila F_{celk} vypočítaná za predpokladu, že do malého a veľkého práporca je vložená vodorovná časť U-závitú z feromagnetického materiálu.



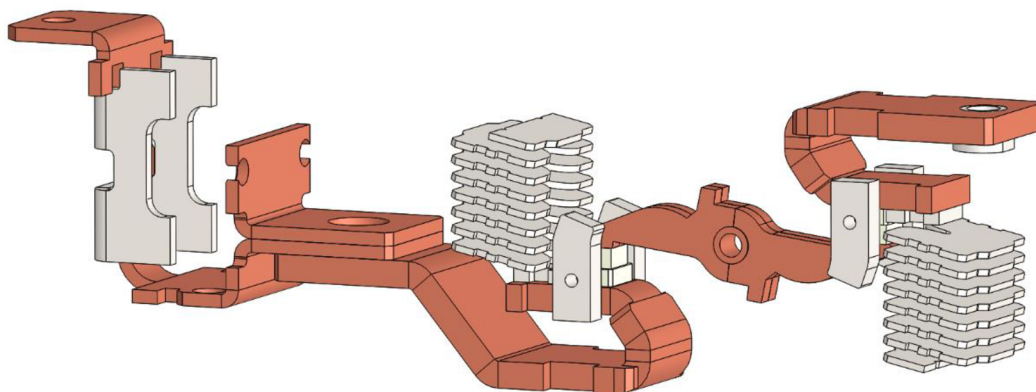
Obr. 7-3 Prúdovodná dráha s vodorovnými prvkami U-závitú

Tabuľka 10 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch pre 2. prípad

Fáza 1								
Prúd	Sila		Prúd	Sila		Prúd	Sila	
I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]
2	2,72	2,72	12	95,73	95,73	22	314,92	314,92
4	10,88	10,88	14	129,67	129,67	24	373,61	373,61
6	24,36	24,36	16	168,48	168,48	26	437,30	437,30
8	43,02	43,02	18	212,37	212,37	28	505,94	505,94
10	66,82	66,82	20	261,11	261,11	30	579,33	579,33

7.3 Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} pre 3. prípad (P)

V tomto prípade je výsledná odpudivá sila F_{celk} vypočítaná za predpokladu, že sa v okolí kontaktných stykov nachádzajú postranné prvky U-závitú z feromagnetického materiálu.



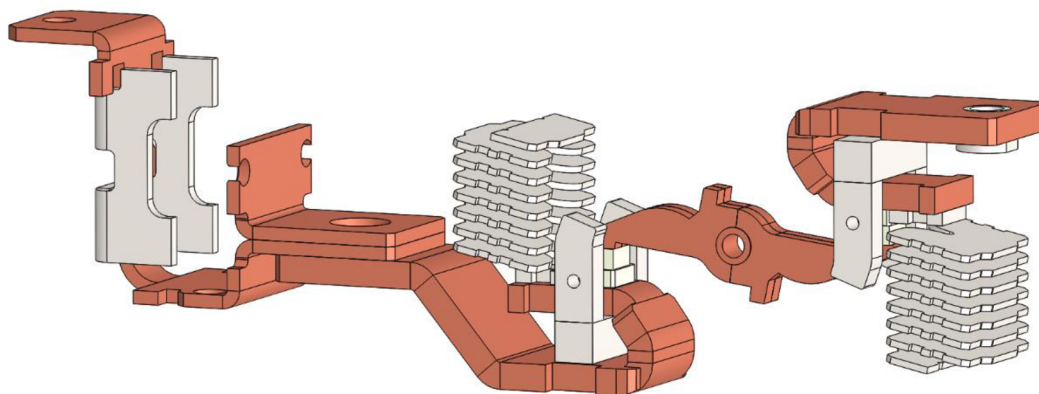
Obr. 7-4 Prúdovodná dráha s postrannými prvkami U-závitú

Tabuľka 11 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch pre 3. prípad

Fáza 1								
Prúd	Sila		Prúd	Sila		Prúd	Sila	
I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]
2	2,68	2,68	12	95,25	95,25	22	315,30	315,30
4	10,72	10,72	14	129,16	129,16	24	374,29	374,29
6	24,07	24,07	16	168,18	168,18	26	438,22	438,22
8	42,68	42,68	18	212,23	212,23	28	507,10	507,10
10	66,44	66,44	20	261,28	261,28	30	580,92	580,92

7.4 Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} pre 4. prípad (P+V)

V tomto prípade je výsledná odpudivá sila F_{celk} vypočítaná za predpokladu, že sa v okolí kontaktných stykov nachádzajú postranné a vodorovné prvky U-závitu z feromagnetického materiálu (teda kompletný U-závit).



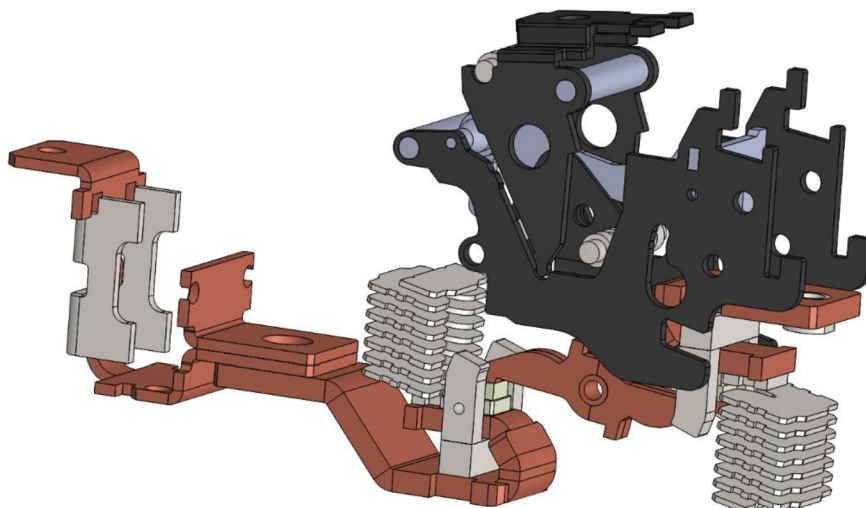
Obr. 7-5 Prúdovodná dráha s postrannými a vodorovnými prvkami U-závitu

Tabuľka 12 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch pre 4. prípad

Fáza 1								
Prúd	Sila		Prúd	Sila		Prúd	Sila	
I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]
2	3,17	3,17	12	102,08	102,08	22	320,53	320,53
4	12,20	12,20	14	137,48	137,48	24	379,99	379,99
6	26,54	26,54	16	178,68	178,68	26	444,44	444,44
8	46,24	46,24	18	216,86	216,86	28	513,78	513,78
10	71,39	71,39	20	266,14	266,14	30	588,37	588,37

7.5 Výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} pre 5. prípad (P+V+SS)

V tomto prípade je výsledná odpudivá sila F_{celk} vypočítaná za predpokladu, že sa v okolí kontaktných stykov nachádzajú postranné a vodorovné prvky U-závitu z feromagnetického materiálu a do modelu prúdovodnej dráhy jednej fázy ističa je pridaný model zapínacieho systému, ktorý je prevažne tvorený feromagnetickými materiálmi a z toho dôvodu nás bude zaujímať, do akej miery môže zapínací systém ovplyvniť výslednú odpudivú silu F_{celk} v kontaktnom styku.



Obr. 7-6 Prúdovodná dráha s postrannými a vodorovnými prvkami U-závitú a zapínacím systémom

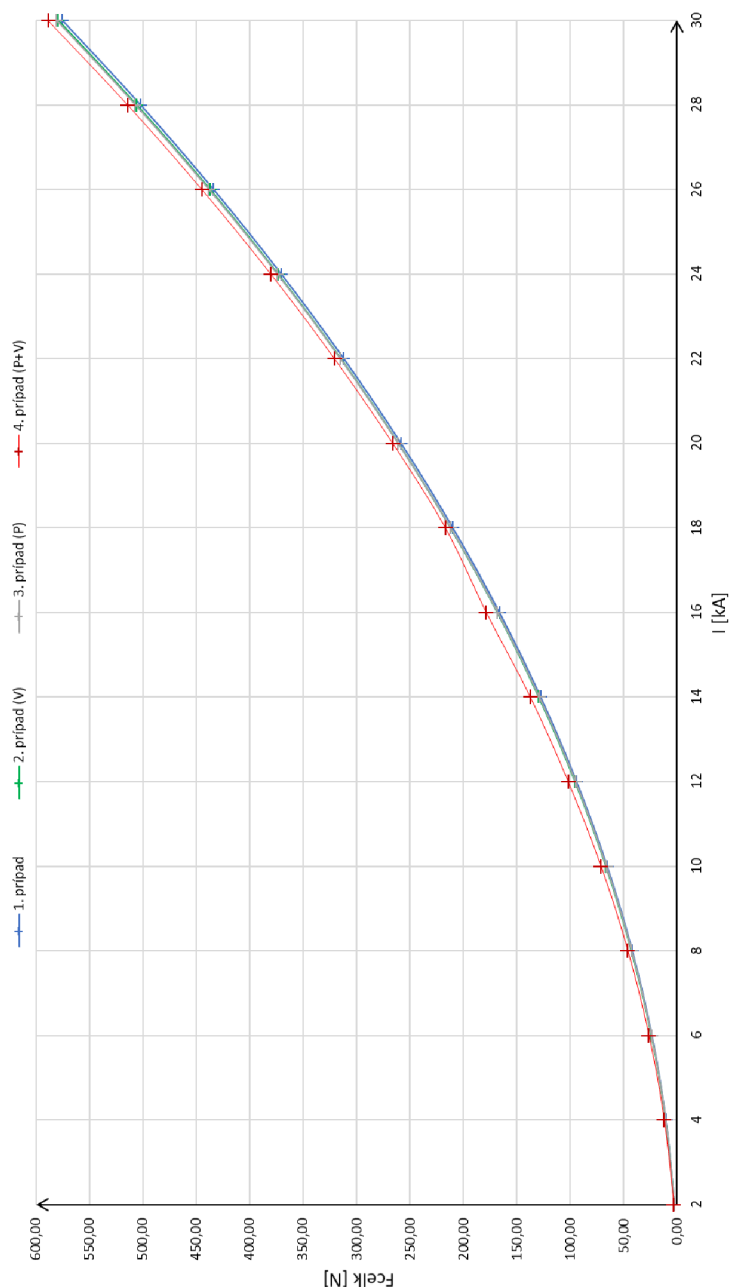
Tabuľka 13 Výsledná odpudivá sila F_{celk} v kontaktoch pre 5. prípad

Fáza 1								
Prúd	Sila		Prúd	Sila		Prúd	Sila	
I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]	I [kA]	F_{celk_L} [N]	F_{celk_P} [N]
2	3,05	3,05	12	96,26	96,26	22	314,76	314,76
4	11,60	11,60	14	129,97	129,97	24	364,72	364,72
6	25,35	25,35	16	168,62	168,62	26	426,66	426,66
8	43,82	43,82	18	212,30	212,30	28	498,66	498,66
10	67,53	67,53	20	254,72	254,72	30	581,53	581,53

7.6 Zhodnotenie výsledkov

Táto kapitola sa zaoberala stacionárnym výpočtom síl s uvažovaním vplyvu blízkych feromagnetických materiálov v okolí prúdovodnej dráhy a kontaktných stykov. Tento výpočet bol urobený pre päť rôznych prípadov, kde sa v prvom rade zmerali hodnoty momentu pri prechode skratového prúdu 2 – 30 kA a z ktorého sa následne vypočítala celková odpudivá sila F_{celk} . Keďže táto sila bola vypočítaná z momentu, ktorý pôsobí na celý rotačný spínací mostík, tak výsledná odpudivá sila je rovnomerne rozdelená do ľavého a pravého kontaktu. V 1. prípade, kedy sa v okolí prúdovodnej dráhy a kontaktných stykov nachádzajú len zhášacie komory, je výsledná odpudivá sila v pravom kontakte pri hodnote prúd $I = 30$ kA rovná $F_{celk_p} = 575,14$ N. V 2. prípade sa do práporcov vložili vodorovné časti U-závitú a výsledná odpudivá sila v pravom kontakte pri 30 kA je rovná $F_{celk_p} = 579,33$ N, čo je oproti 1. prípadu nárast odpudivej sily o 4,19 N (0,72%). V 3. prípade sa v okolí prúdovodnej dráhy a kontaktných stykov nachádzali len postranné časti U-závitú a výsledná odpudivá sila v pravom kontakte pri 30 kA je rovná $F_{celk_p} = 580,92$ N, čo je oproti 1. prípadu nárast odpudivej sily o 5,78 N (1%). V 4. prípade sa v okolí prúdovodnej dráhy a kontaktných stykov nachádzal kompletný U-závit a výsledná odpudivá sila v pravom kontakte pri 30 kA je rovná $F_{celk_p} = 588,37$ N, čo je oproti 1. prípadu nárast odpudivej sily o 13,23 N (2,3%).

V poslednom 5. prípade sa do modelu, ktorý obsahuje U-závity v pravom aj ľavom prápore, doplnili zapínací systém, ktorý sa nachádza nad prúdovodnou dráhou. Výsledná odpudivá sila v pravom kontakte pre tento prípad pri 30 kA je rovná $F_{\text{celk}_p} = 581,53 \text{ N}$, čo je oproti 1. prípadu nárast odpudivej sily o 6,39 N (1,11%) ale oproti 4. prípadu pokles o 6,84 N. Podľa výsledkov z tejto kapitoly je možné usúdiť, že vplyv jednotlivých feromagnetických prvkov v okolí kontaktného styku nemá veľký vplyv na výslednú odpudivú silu v kontaktných stykoch.



Obr. 7-7 Výsledné odpudivé sily pôsobiace v kontaktných stykoch pre všetky prípady v závislosti na prúde

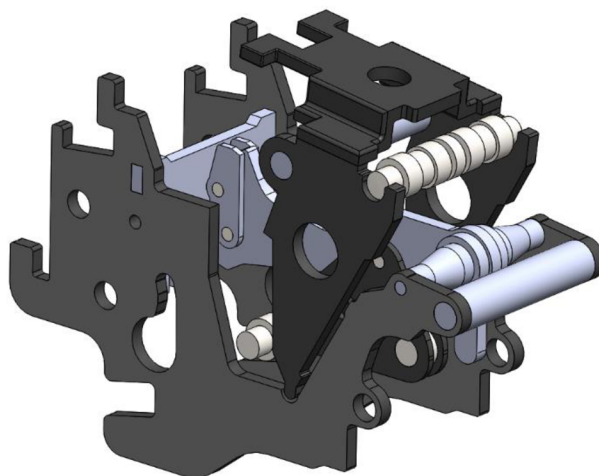
8 STACIONÁRNY VÝPOČET SÍL PRI ELEKTRICKOM OBLÚKU

V tejto kapitole sa budeme zaoberať simulovaním vypínania skratového prúdu 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26 a 30 kA. Z teórie o vypínaní elektrického obvodu vieme, že pri vypínaní vzniká medzi pevným a pohyblivým kontaktom elektrický oblúk, ktorý je pomocou vhodne tvarovanej prúdovodnej dráhy a blízkych feromagnetických materiálov vŕhaný do zhášacej komory, kde je následne uhasený. Pri týchto simuláciách sa budeme zaoberať momentom, ktorý pôsobí v osi z na otočný mostík prúdovodnej dráhy a silami, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr. Simulácie sú urobené pre prípady, kedy sú kontakty rozpojené a nachádzajú sa medzi nimi elektrické oblúky.

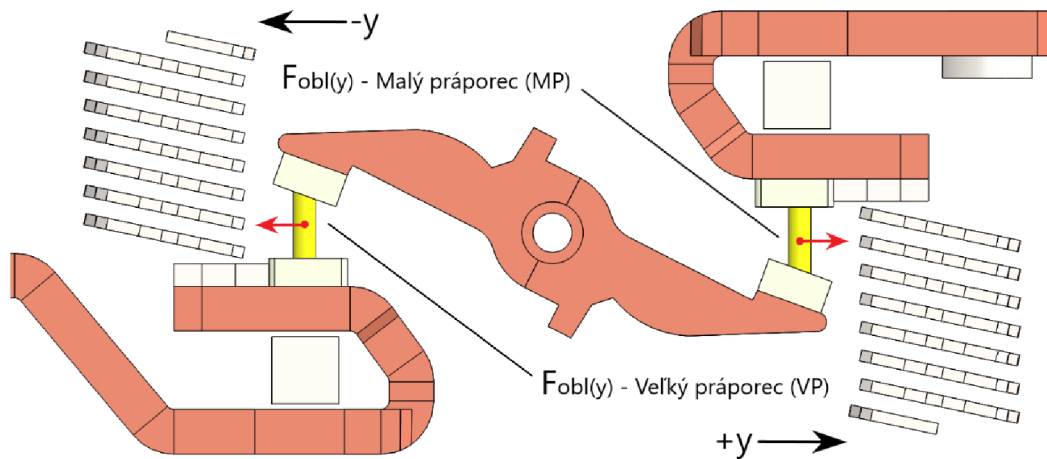
8.1 Moment a sily pôsobiace pri elektrickom oblúku

Pri týchto simuláciách sa budeme zaoberať momentom, ktorý pôsobí v osi z na otočný mostík prúdovodnej dráhy a silami, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr. Simulácie sú urobené pre prípady, kedy sú kontakty rozpojené a nachádzajú sa medzi nimi elektrické oblúky. Celkovo urobíme päť simulácií pre rôzne prípady rozmiestnenia feromagnetických materiálov v okolí kontaktných stykov a prúdovodnej dráhy.

V prvom prípade budeme simulovať situáciu, kedy sa okolo kontaktného styku nenachádzajú žiadne feromagnetické materiály. V druhom prípade budeme simulovať situáciu, kedy bude do veľkého a malého práporca vložená vodorovná časť U-závitú feromagnetika. V tretom prípade budeme simulovať situáciu, kedy vodorovnú časť z práporcov odstránime a pridáme postranné feromagnetiká. Štvrtú simuláciu urobíme pre prípad, keď budú v okolí kontaktných stykov malého a veľkého práporca umiestnené vodorovné a postranné feromagnetické materiály, ktoré tvoria celkový U-závit. Poslednú simuláciu urobíme pre prípad, že do modelu prúdovodnej dráhy jednej fázy ističa pridáme model spínacieho systému, ktorý je prevažne tvorený feromagnetickými materiálmi a z toho dôvodu nás bude zaujímať, do akej miery môže zapínací systém ovplyvniť moment a sily, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr.



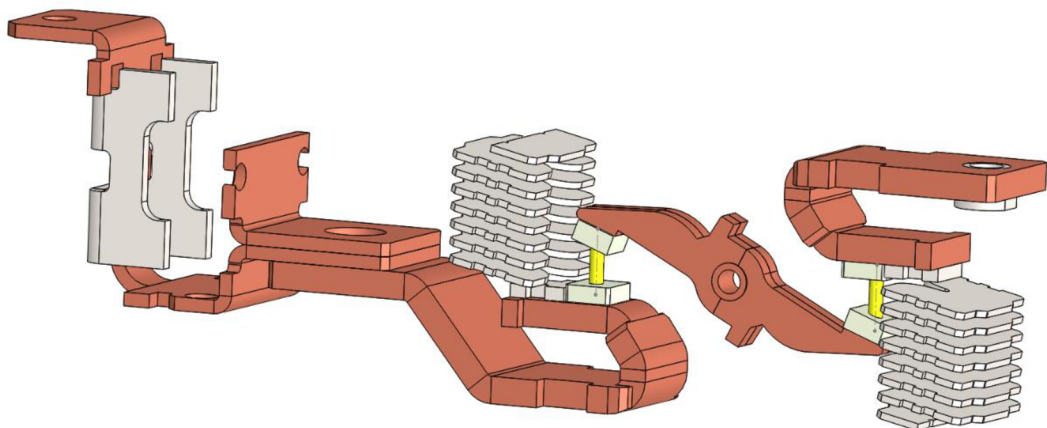
Obr. 8-1 Zapínací systém ističa Siemens 3VA5



Obr. 8-2 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v osi y

8.1.1 Výpočet momentu a síl pre 1. prípad

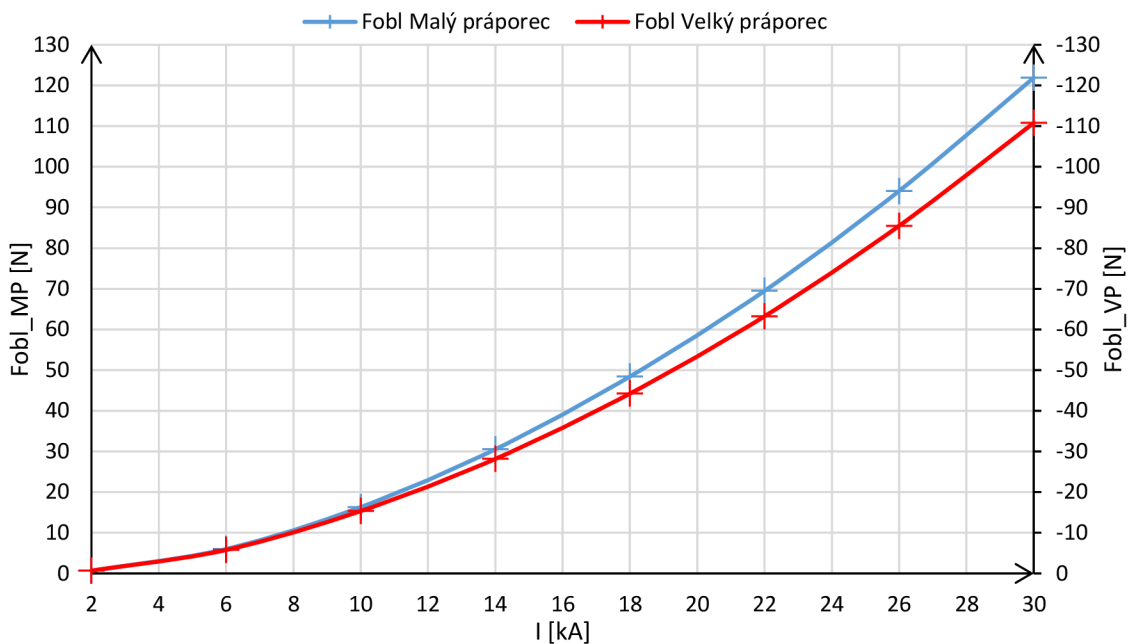
V tomto prípade bude našou úlohou zistiť veľkosť síl, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr a hodnotu momentu, ktorý pôsobí na otočný mostík v osi z za predpokladu, že sa v okolí kontaktných stykov nebudú nachádzať žiadne prvky z feromagnetického materiálu.



Obr. 8-3 Prúdovodná dráha bez feromagnetických prvkov

Tabuľka 14 Moment a sily pôsobiace v osi y na elektrické oblúky pre 1. prípad

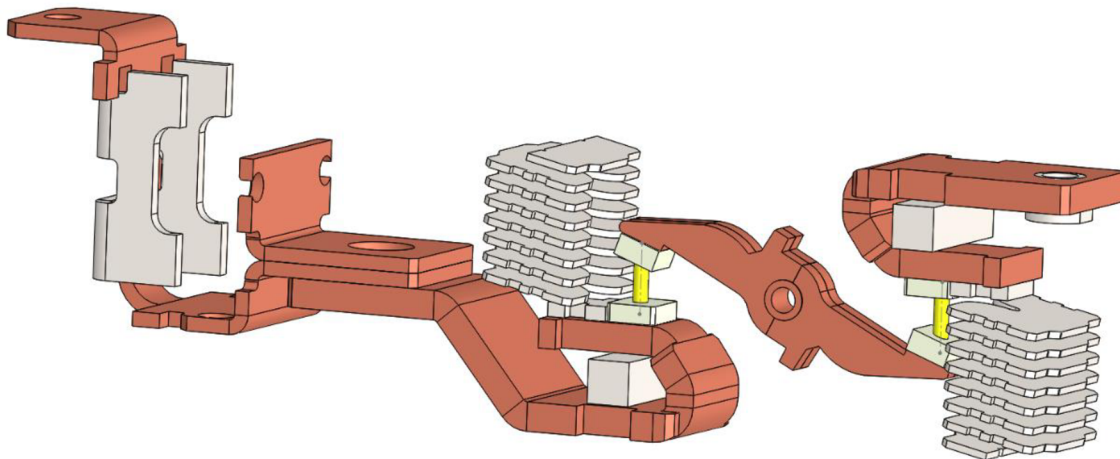
Fáza 1							
Prúd	Moment	Sila		Prúd	Moment	Sila	
I [kA]	M [Nm]	F_{obl_MP} [N]	F_{obl_VP} [N]	I [kA]	M [Nm]	F_{obl_MP} [N]	F_{obl_VP} [N]
2	-0,0498	0,671	-0,651	18	-3,9170	48,425	-44,226
6	-0,4480	6,005	-5,769	22	-5,7828	69,487	-63,229
10	-1,2370	16,302	-15,339	26	-8,0007	94,057	-85,484
14	-2,3972	30,527	-28,161	30	-10,563	121,88	-110,781



Obr. 8-4 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 1. prípad

8.1.2 Výpočet momentu a síl pre 2. prípad (V)

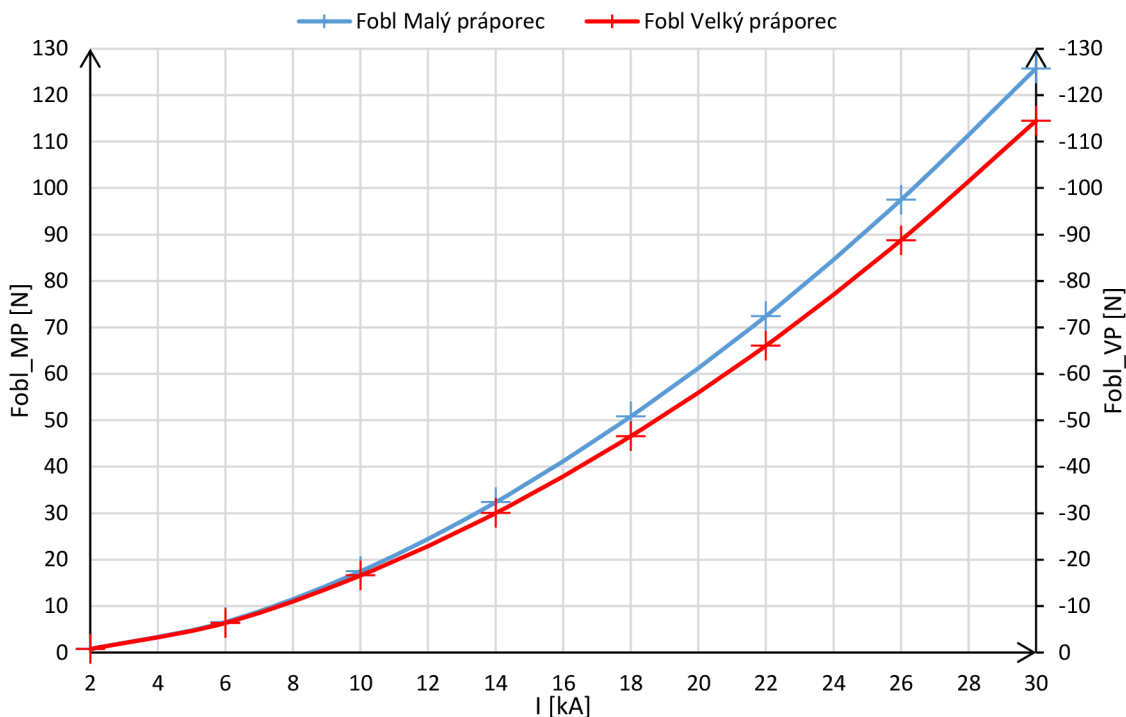
V tomto prípade bude našou úlohou zistiť veľkosť síl, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr a hodnotu momentu, ktorý pôsobí na otočný mostík v osi z za predpokladu, že bude do malého a veľkého práporeca vložená vodorovná časť U-závitú z feromagnetického materiálu.



Obr. 8-5 Prúdovodná dráha s vodorovnými prvkami U-závitú

Tabuľka 15 Moment a sily pôsobiace v osi y na elektrické oblúky pre 2. prípad

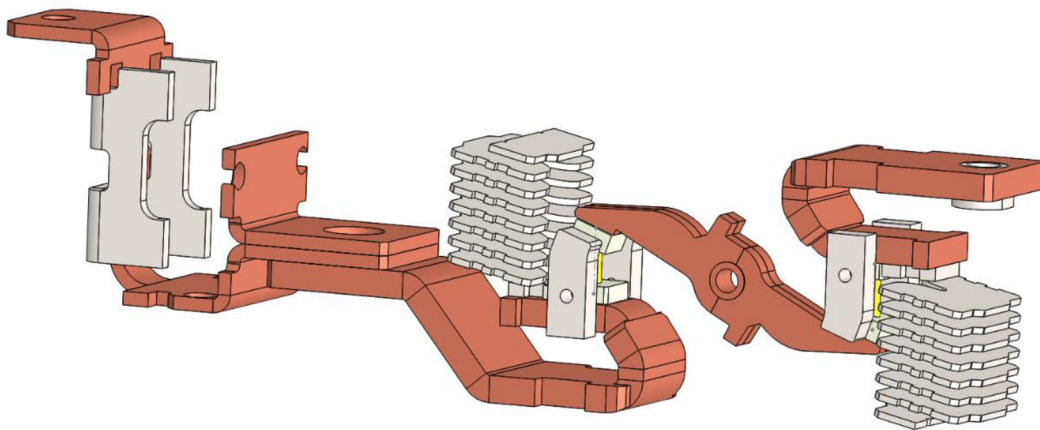
Fáza 1							
Prúd	Moment	Sila		Prúd	Moment	Sila	
I [kA]	M [Nm]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]	I [kA]	M [Nm]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]
2	-0,0518	0,747	-0,732	18	-3,9784	50,834	-46,582
6	-0,4631	6,576	-6,355	22	-5,8594	72,425	-66,061
10	-1,2672	17,485	-16,575	26	-8,0909	97,482	-88,763
14	-2,4432	32,351	-30,014	30	-10,667	125,762	-114,49



Obr. 8-6 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 2. prípad

8.1.3 Výpočet momentu a síl pre 3. prípad (P)

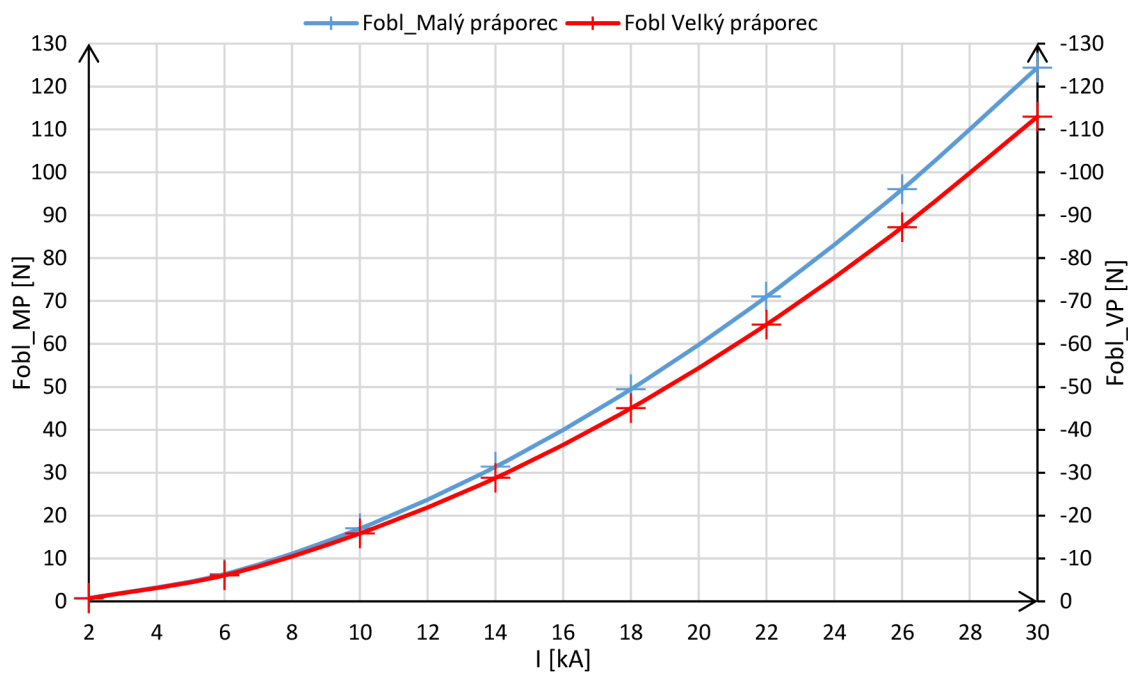
V tomto prípade bude našou úlohou zistiť veľkosť síl, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr a hodnotu momentu, ktorý pôsobí na otočný mostík v osi z za predpokladu, že sa budú v okolí kontaktných stykov nachádzať postranné prvky U-závitú z feromagnetického materiálu.



Obr. 8-7 Prúdovodná dráha s postrannými prvkami U-závitú

Tabuľka 16 Moment a sily pôsobiace v osi y na elektrické oblúky pre 3. prípad

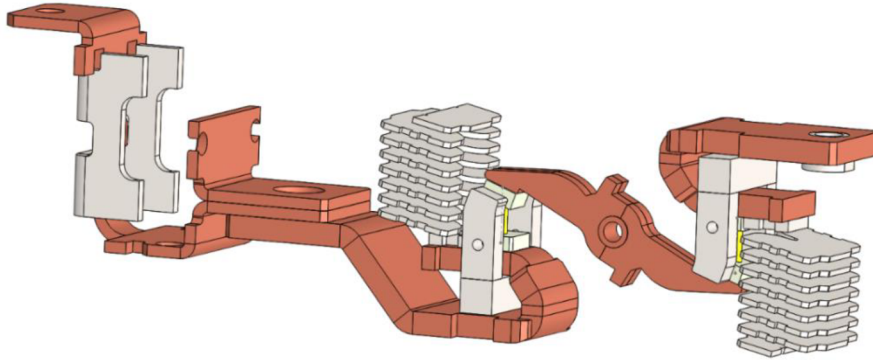
Fáza 1							
Prúd	Moment	Sila		Prúd	Moment	Sila	
I [kA]	M [Nm]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]	I [kA]	M [Nm]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]
2	-0,0517	0,712	-0,689	18	-3,9741	49,445	-45,023
6	-0,4631	6,352	-6,065	22	-5,8682	71,023	-64,533
10	-1,2692	16,971	-15,839	26	-8,1165	96,024	-87,174
14	-2,4401	31,369	-28,756	30	-10,715	124,421	-112,971



Obr. 8-8 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 3. prípad

8.1.4 Výpočet momentu a síl pre 4. prípad (P+V)

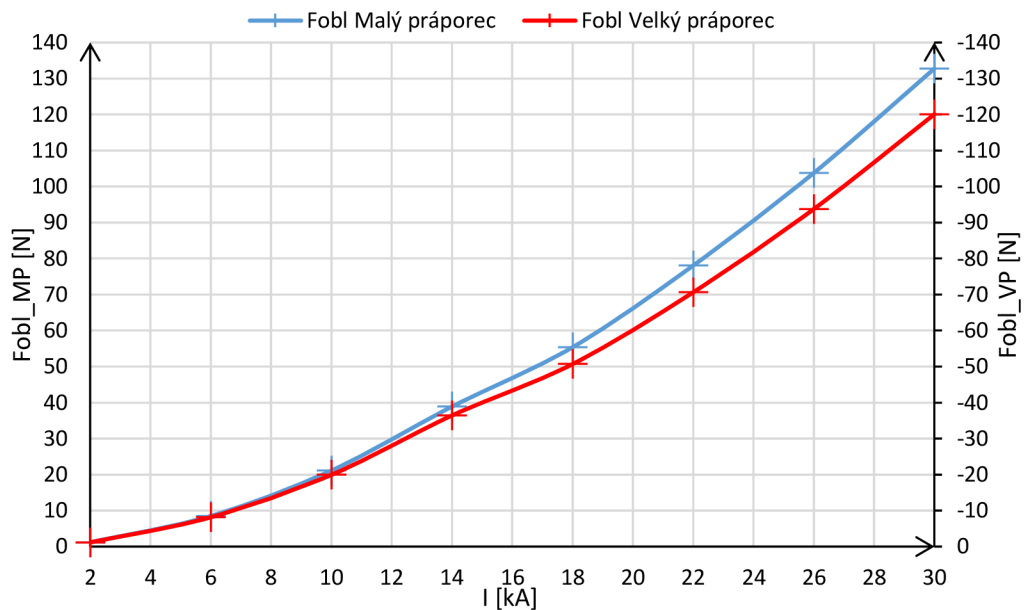
V tomto prípade bude našou úlohou zistiť veľkosť síl, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr a hodnotu momentu, ktorý pôsobí na otočný mostík v osi z za predpokladu, že sa budú v okolí kontaktných stykov nachádzať postranné a vodorovné prvky U-závitú z feromagnetického materiálu.



Obr. 8-9 Prúdovodná dráha s postrannými a vodorovnými prvkami U-závitú

Tabuľka 17 Moment a sily pôsobiace v osi y na elektrické oblúky pre 4. prípad

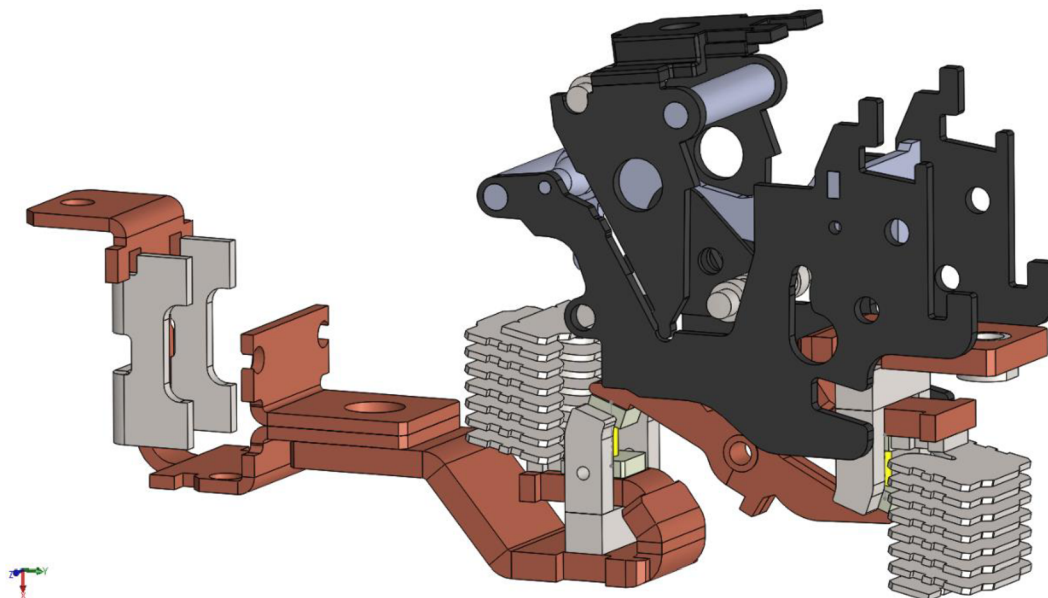
Fáza 1							
Prúd	Moment	Sila		Prúd	Moment	Sila	
I [kA]	M [Nm]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]	I [kA]	M [Nm]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]
2	-0,0679	1,167	-1,147	18	-4,1517	55,371	-50,692
6	-0,5395	8,494	-8,142	22	-6,0629	78,046	-70,631
10	-1,4087	21,119	-19,929	26	-8,3256	103,772	-93,751
14	-2,6766	38,869	-36,405	30	-10,9391	132,743	-120,061



Obr. 8-10 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 4. prípad

8.1.5 Výpočet momentu a síl pre 5. prípad (P+V+SS)

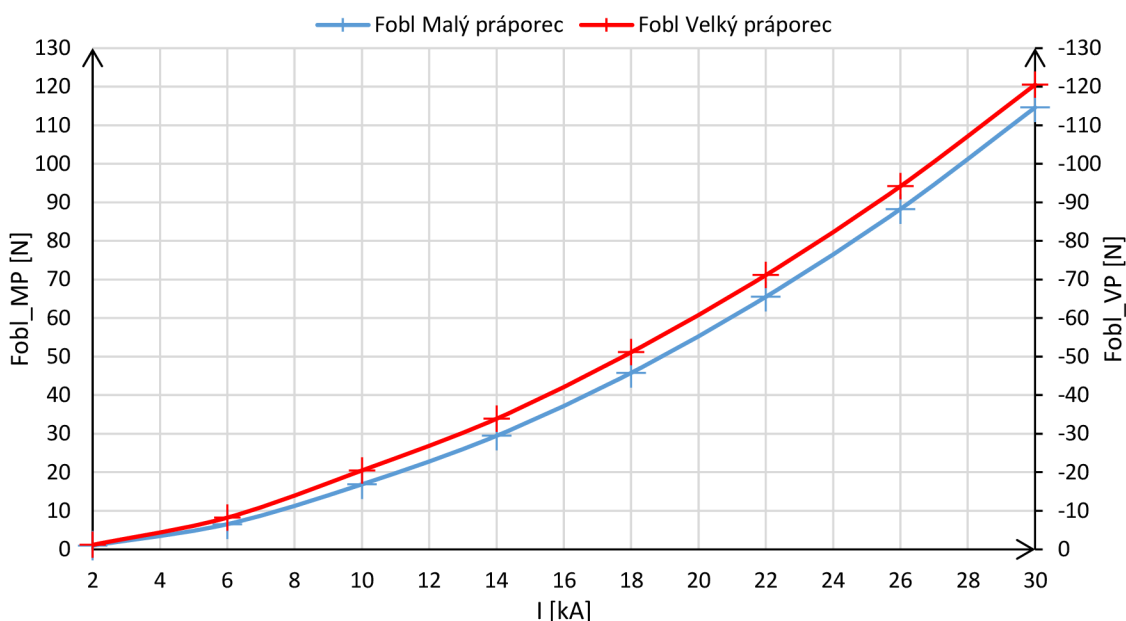
V tomto prípade bude našou úlohou zistiť veľkosť síl, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr a hodnotu momentu, ktorý pôsobí na otočný mostík v osi z za predpokladu, že sa budú v okolí kontaktných stykov nachádzať postranné a vodorovné prvky U-závitú z feromagnetického materiálu a do modelu prúdovodnej dráhy jednej fázy ističa bude pridaný model spínacieho systému, ktorý je prevažne tvorený feromagnetickými materiálmi a z toho dôvodu nás bude zaujímať, do akej miery môže spínací systém ovplyvniť výslednú odpudivú silu F_{celk} v kontaktnom styku.



Obr. 8-11 Prúdovodná dráha s postrannými a vodorovnými prvkami U-závitú a spínacím systémom

Tabuľka 18 Moment a sily pôsobiace v osi y na elektrické oblúky pre 5. prípad

Fáza 1							
Prúd	Moment	Sila		Prúd	Moment	Sila	
I [kA]	M [Nm]	F_{obl_MP} [N]	F_{obl_VP} [N]	I [kA]	M [Nm]	F_{obl_MP} [N]	F_{obl_VP} [N]
2	-0,0639	0,9771	-1,1608	18	-4,0423	45,7952	-51,1324
6	-0,5092	6,5432	-8,2341	22	-5,9121	65,5041	-71,1345
10	-1,3572	16,8731	-20,4623	26	-8,1218	88,2863	-94,1864
14	-2,5151	29,4621	-33,8863	30	-10,698	114,6011	-120,512



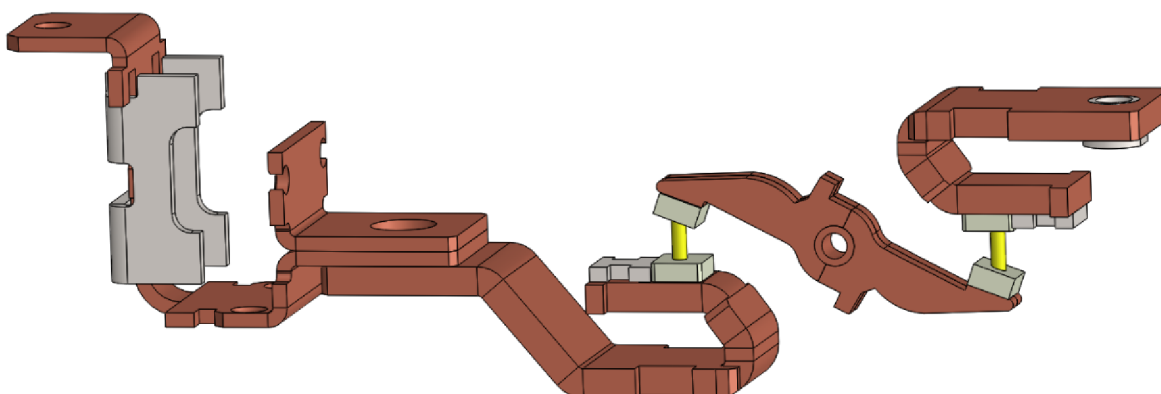
Obr. 8-12 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 5. prípad

8.2 Vplyv zhášacej komory na elektrický oblúk

V tejto podkapitole sa budeme zaoberať silami, ktoré pôsobia na elektrické oblúky, pri prechode skratového prúdu 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26 a 30 kA. Ak chceme určiť vplyv zhášacích komôr na elektrické oblúky, je potrebné urobiť simulácie pre prípad so zhášacími komorami a bez nich. V našom prípade urobíme simulácie pre tri prípady. V prvom prípade urobíme simuláciu bez zhášacích komôr a feromagnetických prvkov v okolí kontaktných stykov a prúdovodnej dráhy. V druhom prípade urobíme simuláciu s pridaním feromagnetických prvkov v okolí prúdovodnej dráhy. V tomto prípade zhášacie komory zanedbáme. V poslednom tretom prípade urobíme simuláciu so všetkými feromagnetickými prvkami a zhášacími komorami. Nás bude hlavne zaujímať sila F_y , ktorá vŕhá elektrické oblúky do zhášacích komôr. Jednou z najužitočnejších vlastností zhášacej komory je tá, že urýchľuje premiestnenie elektrického oblúku z oblasti kontaktného priestoru a tým nedochádza k nadmernému tepelnému namáhaniu kontaktov, čím predlžuje ich životnosť.

8.2.1 Výpočet síl pôsobiacich na el. oblúky pre 1. prípad

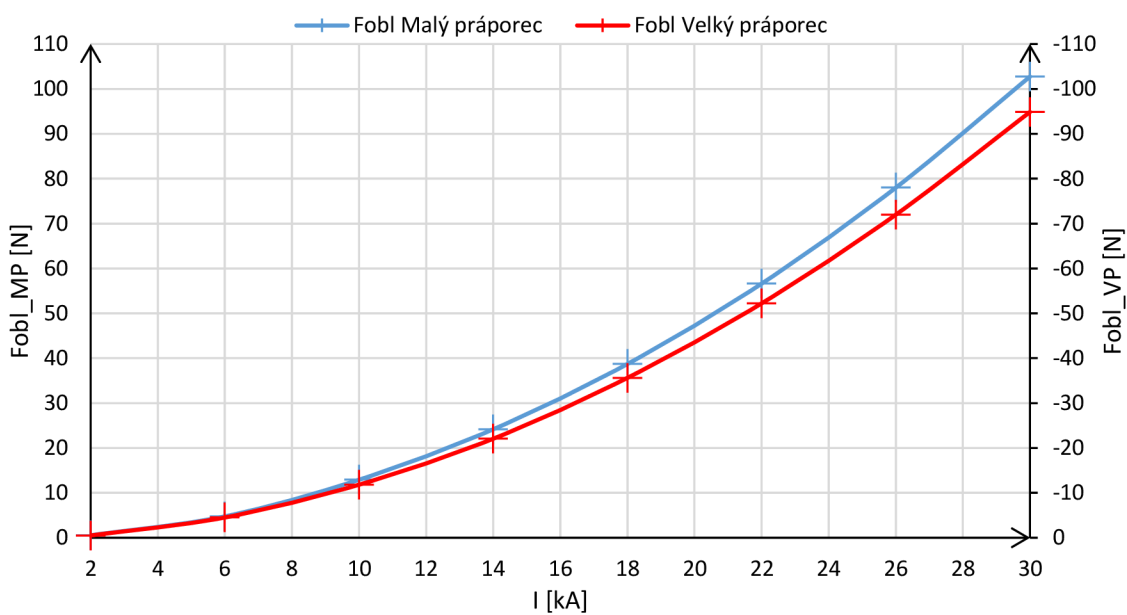
V tomto prípade bude našou úlohou zistiť veľkosť síl, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr za predpokladu, že sa v okolí kontaktných stykov a prúdovodnej dráhy nebudú nachádzať žiadne prvky z feromagnetického materiálu a zhášacie komory nebudú použité.



Obr. 8-13 Prúdovodná dráha bez feromagnetických prvkov a zhášacích komôr pre 1. prípad

Tabuľka 19 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v osi y pre 1. prípad

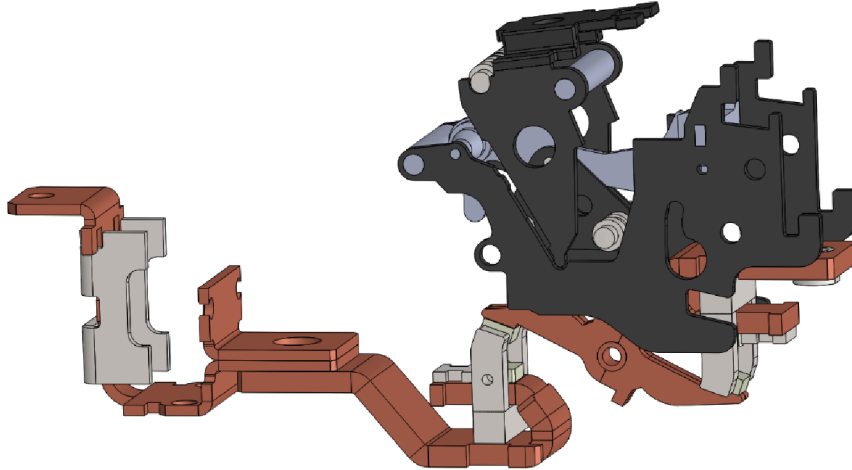
Fáza 1					
Prúd	Sila		Prúd	Sila	
I [kA]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]	I [kA]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]
2	0,545	-0,499	18	38,715	-35,623
6	4,761	-4,515	22	56,612	-52,215
10	12,923	-11,824	26	77,993	-71,974
14	24,165	-22,064	30	102,731	-94,851



Obr. 8-14 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 1. prípad

8.2.2 Výpočet síl pôsobiacich na el. oblúky pre 2. prípad

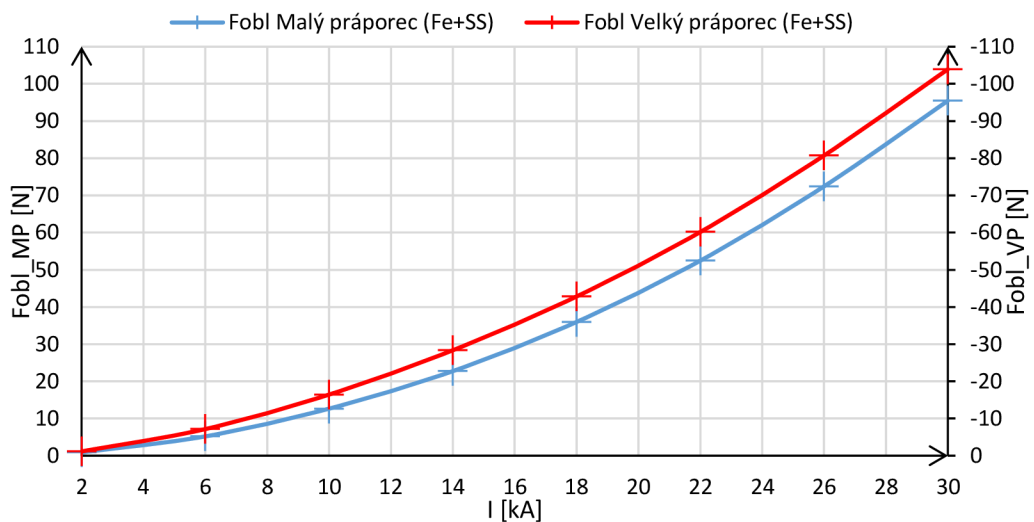
V tomto prípade bude našou úlohou zistiť veľkosť síl, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr za predpokladu, že sa v okolí kontaktných stykov a prúdovodnej dráhy budú nachádzať prvky z feromagnetického materiálu a zhášacie komory nebudú použité.



Obr. 8-15 Prúdovodná dráha s feromagnetickými prvkami bez zhášacích komôr pre 2. prípad

Tabuľka 20 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v osi y pre 2. prípad

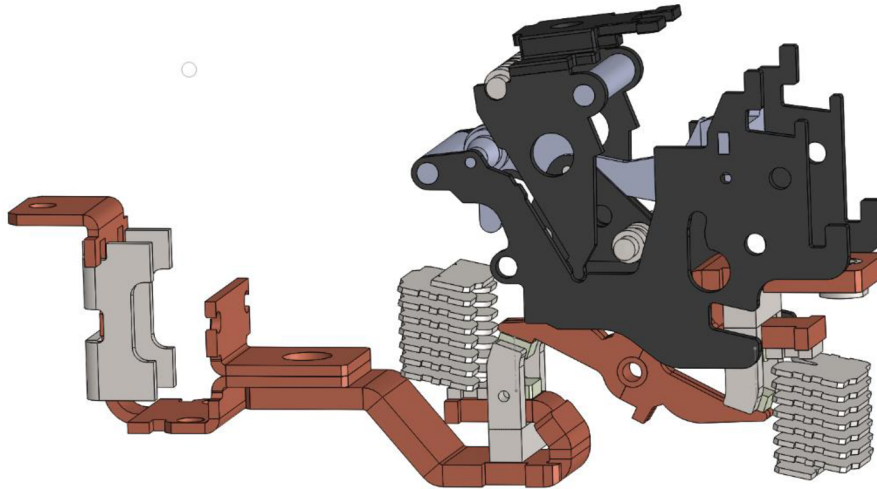
Fáza 1					
Prúd	Sila		Prúd	Sila	
I [kA]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]	I [kA]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]
2	0,878	-1,137	18	35,972	-42,818
6	5,192	-7,153	22	52,453	-60,162
10	12,651	-16,432	26	72,438	-80,739
14	22,745	-28,363	30	95,449	-103,912



Obr. 8-16 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 2. prípad

8.2.3 Výpočet síl pôsobiacich na el. oblúky pre 3. prípad

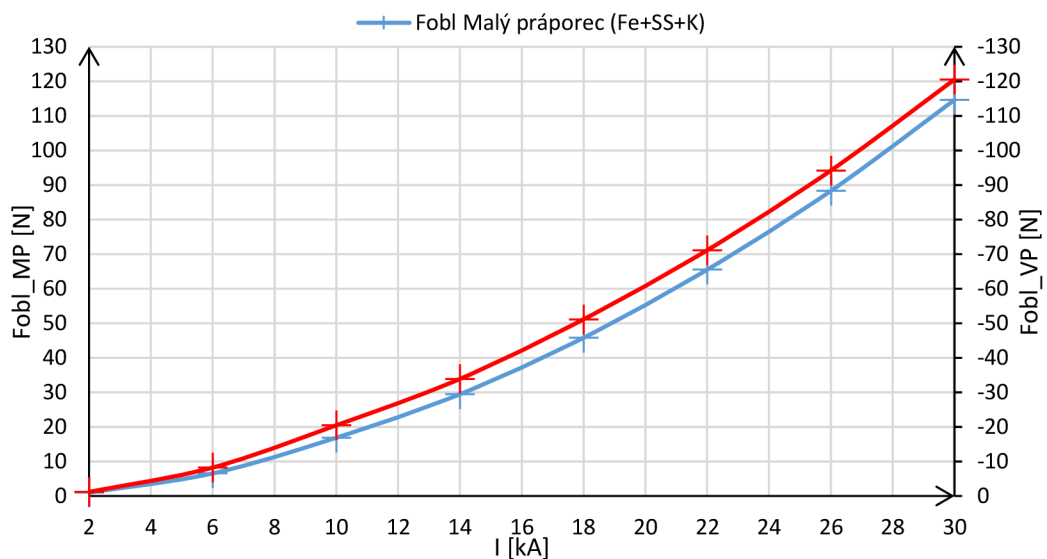
V tomto prípade bude našou úlohou zistiť veľkosť síl, ktoré vŕhajú elektrické oblúky do zhášacích komôr za predpokladu, že sa v okolí kontaktných stykov a prúdovodnej dráhy budú nachádzať prvky z feromagnetického materiálu a do výpočtu budú zahrnuté aj zhášacie komory.



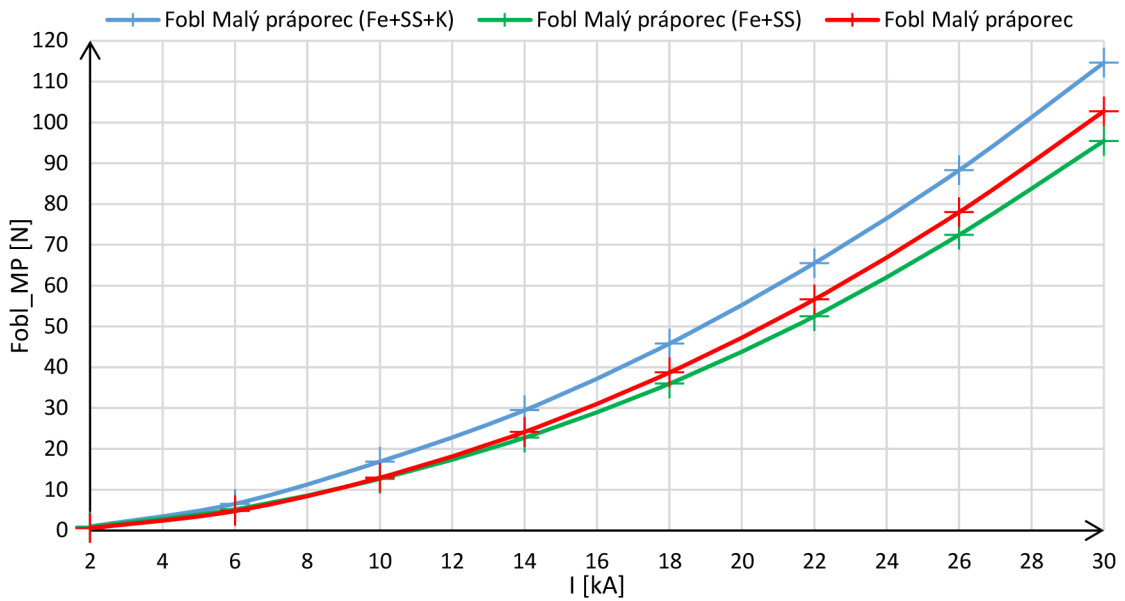
Obr. 8-17 Prúdovodná dráha s feromagnetickými prvkami a zhášacími komorami pre 3. prípad

Tabuľka 21 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v osi y pre 3. prípad

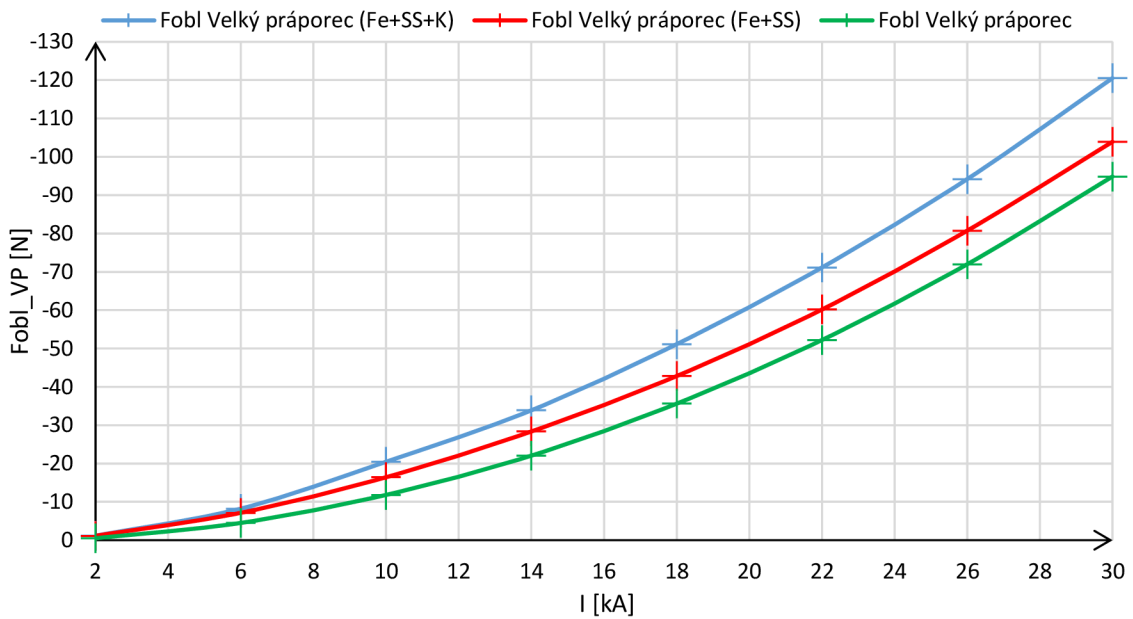
Fáza 1					
Prúd	Sila		Prúd	Sila	
I [kA]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]	I [kA]	F _{obl_MP} [N]	F _{obl_VP} [N]
2	0,977	-1,161	18	45,795	-51,132
6	6,543	-8,234	22	65,504	-71,134
10	16,873	-20,462	26	88,286	-94,186
14	29,462	-33,886	30	114,601	-120,512



Obr. 8-18 Sily pôsobiace na elektrické oblúky v závislosti na prúde pre 3. prípad



Obr. 8-19 Sila pôsobiaca na elektrický oblúk MP v závislosti na prúde pre všetky tri prípady



Obr. 8-20 Sila pôsobiaca na elektrický oblúk VP v závislosti na prúde pre všetky tri prípady

8.3 Zhodnotenie výsledkov

V prvej časti tejto kapitoly sme sa zaoberali simulovaním vypínania skratového prúdu v rozsahu 2 -30 kA. Cieľom tejto prvej časti bolo zistiť, do akej miery majú vplyv feromagnetické prvky v okolí prúdovodnej dráhy a v blízkosti kontaktných stykov pri procese vypínania obvodu, tzn. kontakty sú rozpojené a medzi nimi sa nachádzajú vpravo

aj vľavo elektrické oblúky. Bolo urobených 5 simulácií, kde sme zisťovali hodnotu momentu, ktorý pôsobí na rotačný spínací mostík a hodnoty síl, ktoré vťahujú elektrické oblúky do zhášacích komôr v osi y. Keďže veľký a malý práporec sú geometricky rozdielne, tak aj hodnoty síl F_{obl_MP} a F_{obl_VP} budú rozdielne.

V 1. prípade bola simulovaná situácia, kedy sa medzi kontaktmi nachádzali elektrické oblúky a v okolí kontaktných stykov sa nachádzali len zhášacie komory. Výsledný moment pre tento prípad pri 30 kA má hodnotu $M = -10,563$ Nm a hodnoty síl, ktoré vytlačujú elektrické oblúky do zhášacích komôr majú hodnoty $F_{obl_MP} = 121,88$ N a $F_{obl_VP} = -110,78$ N.

V 2. prípade bola simulovaná situácia, kedy sa medzi kontaktmi nachádzali elektrické oblúky a v okolí kontaktných stykov sa nachádzali zhášacie komory a vodorovné časti U-závitu. Výsledný moment pre tento prípad pri 30 kA má hodnotu $M = -10,667$ Nm a hodnoty síl, ktoré vytlačujú elektrické oblúky do zhášacích komôr majú hodnoty $F_{obl_MP} = 125,76$ N a $F_{obl_VP} = -114,49$ N čo je oproti 1. prípadu nárast momentu o 0,104 Nm (0,98%), F_{obl_MP} o 3,88 N (3,18%) a F_{obl_VP} o 3,71 N (3,34%).

V 3. prípade bola simulovaná situácia, kedy sa medzi kontaktmi nachádzali elektrické oblúky a v okolí kontaktných stykov sa nachádzali zhášacie komory a postranné časti U-závitu. Výsledný moment pre tento prípad pri 30 kA má hodnotu $M = -10,715$ Nm a hodnoty síl, ktoré vytlačujú elektrické oblúky do zhášacích komôr majú hodnoty $F_{obl_MP} = 124,42$ N a $F_{obl_VP} = -112,97$ N čo je oproti 1. prípadu nárast momentu o 0,152 Nm (1,43%), F_{obl_MP} o 2,54 N (2,1%) a F_{obl_VP} o 2,19 N (1,97%).

V 4. prípade bola simulovaná situácia, kedy sa medzi kontaktmi nachádzali elektrické oblúky a v okolí kontaktných stykov sa nachádzali zhášacie komory a kompletne U-závity. Výsledný moment pre tento prípad pri 30 kA má hodnotu $M = -10,939$ Nm a hodnoty síl, ktoré vytlačujú elektrické oblúky do zhášacích komôr majú hodnoty $F_{obl_MP} = 132,74$ N a $F_{obl_VP} = -120,06$ N čo je oproti 1. prípadu nárast momentu o 0,376 Nm (3,55%), F_{obl_MP} o 10,86 N (8,91%) a F_{obl_VP} o 9,28 N (8,37%).

V 5. prípade bola simulovaná situácia, kedy sa medzi kontaktmi nachádzali elektrické oblúky a v okolí kontaktných stykov sa nachádzali zhášacie komory, kompletne U-závity a zapínací systém. Výsledný moment pre tento prípad pri 30 kA má hodnotu $M = -10,698$ Nm a hodnoty síl, ktoré vytlačujú elektrické oblúky do zhášacích komôr majú hodnoty $F_{obl_MP} = 114,6$ N a $F_{obl_VP} = -120,52$ N čo je oproti 1. prípadu nárast momentu o 0,136 Nm (1,27%), pokles F_{obl_MP} o 7,28 N (6,35%) a nárast F_{obl_VP} o 9,74 N (8,79%).

Podľa výsledkov z prvej časti tejto kapitoly je možné povedať, že najväčší vplyv na silu, ktorá vháňa elektrické oblúky do zhášacích komôr, má celkový U-závit v okolí kontaktných stykov (4. prípad). V 5. prípade, kedy sa nad prúdovodnou dráhou ističa nachádza zapínací systém a v okolí kontaktných stykov sa nachádzajú celkové U-závity, je situácia iná. Podľa výsledkov z 5. prípadu je možné povedať, že prítomnosť zapínacieho systému zlepšuje F_{obl_VP} o 0,46 N a zároveň zhoršuje F_{obl_MP} o 18,14 N oproti 4. prípadu.

V druhej časti tejto kapitoly sme sa zaoberali simulovaním vypínania skratového prúdu v rozsahu 2 -30 kA. Cieľom tejto druhej časti bolo zistiť, do akej miery majú vplyv zhášacie komory pri procese vypínania obvodu, tzn. kontakty sú rozpojené a medzi nimi sa nachádzajú vpravo aj vľavo elektrické oblúky. Boli urobené 3 simulácie kde sme zisťovali hodnoty síl, ktoré vťahujú elektrické oblúky do zhášacích komôr v osi y.

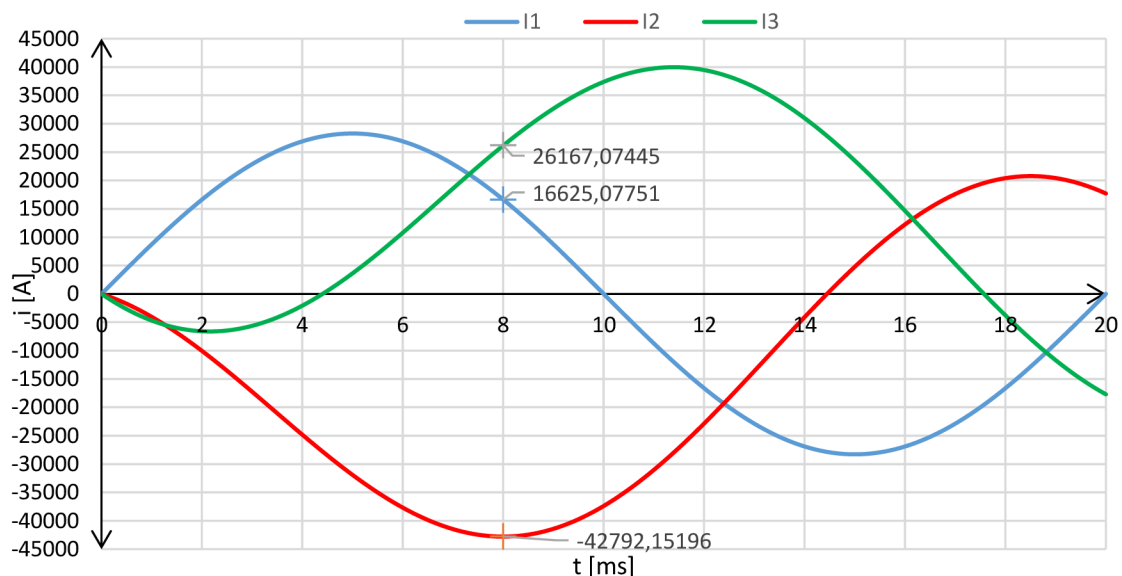
V 1. prípade bola simulovaná situácia, kedy sa v okolí prúdovodnej dráhy a kontaktných stykov nenachádzali žiadne feromagnetické prvky a zhášacie komory. Sily, ktoré vháňajú elektrické oblúky do zhášacích komôr, sú $F_{obl_MP} = 102,73$ N a

$F_{obl_VP} = -94,85$ N. V 2. prípade boli do modelu doplnené feromagnetické materiály v okolí prúdovodnej dráhy bez zhášacích komôr $F_{obl_MP} = 95,45$ N a $F_{obl_VP} = -103,91$ N. V 2. prípade nastal pokles sily F_{obl_MP} o 7,28 N (7,62%) a nárast F_{obl_VP} o 9,06 N (9,55%) oproti 1. prípadu. V 3. prípade boli do modelu doplnené zhášacie komory $F_{obl_MP} = 114,61$ N a $F_{obl_VP} = -120,51$ N. V 3. prípade nastal nárast oproti 1. prípadu F_{obl_MP} o 11,88 N (11,56%) a F_{obl_VP} o 25,66 N (27,05%). Podľa výsledkov z druhej časti tejto kapitoly môžeme povedať, že zhášacie komory majú veľký vplyv na sily, ktoré vyťahujú elektrické oblúky z medzikontaktneho priestoru.

9 STACIONÁRNY VÝPOČET MOMENTOV – MAGNETOSTATICKÁ ANALÝZA

V tejto kapitole sa budeme zaoberať statickým výpočtom momentov, ktoré pôsobia na otočné mostíky všetkých troch fáz pri prechode striedavého skratového prúdu v rozsahu 2 – 30 kA. Pri súčasnom spínaní v jednotlivých fázach, sú napätia vo všetkých fázach rovnaké a časovo posunuté o uhol $2/3\pi$. Za predpokladu, že sú všetky fázy rovnako zaťažované, je rovnaká ustálená zložka prúdu a vo všetkých fázach posunutá o rovnaký uhol φ vzhľadom k napätiu. V našom prípade je $\varphi = 0$. Priebehy prechodných zložiek prúdov v každej fázy sú rôzne, pretože ich počiatkové veľkosti nie sú rovnaké. Na Obr. 9-1 vidíme priebehy prúdov v jednotlivých fázach, pre hodnotu prúdu 20 kA efektívnych. Pre náš výpočet bude potrebné poznať hodnoty prúdov v jednotlivých fázach v čase $t = 8$ ms, kedy hodnota prúdu v strednej fáze (L2) dosahuje maximálnu hodnotu. Pri výpočtoch prúdov sme uvažovali $\cos\varphi = 0,2$ (maximálna nesymetria).

Simuláciu urobíme pre dva prípady. V prvom prípade budeme počítať momenty, ktoré pôsobia na rotačné mostíky všetkých troch fáz. V druhom prípade budeme počítať momenty, ktoré pôsobia na rotačné mostíky všetkých troch fáz za podmienky, že sa nad fázou č.2 bude nachádzať zapínací systém ističa. Vo výsledku nás bude zaujímať do akej miery tento zapínací systém ovplyvní momenty, ktoré pôsobia na rotačné mostíky vo všetkých fázach.



Obr. 9-1 Veľkosti prúdov v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 20 kA

Výpočet časovej konštanty τ pre $\cos\varphi = 0.2$ – prúd 20 kA:

$$\tau = \frac{1}{\omega \cdot \tan(\cos^{-1}(\cos \varphi))} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \tan(\cos^{-1}(0,9800665778))}$$

$$\tau = 0,01559$$
(9.1)

Výpočet prúdu v prvej fáze (L1) v čase $t = 8$ ms – prúd 20 kA:

$$i_1 = Im \cdot [\sin(\omega t + \varphi) - \sin(\varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}]$$

$$i_1 = \sqrt{2} \cdot 20000 \cdot \left[\sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,008 + 0) - \sin(0) \cdot e^{-\frac{0,008}{0,01559}} \right]$$

$$i_1 = 16625,077 \text{ A}$$
(9.2)

Výpočet prúdu v druhej fáze (L2) v čase $t = 8$ ms – prúd 20 kA:

$$i_2 = Im \cdot \left[\sin\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]$$

$$i_2 = \sqrt{2} \cdot 20000 \cdot \left[\sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,008 + 0 + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(0 + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot e^{-\frac{0,008}{0,01559}} \right]$$

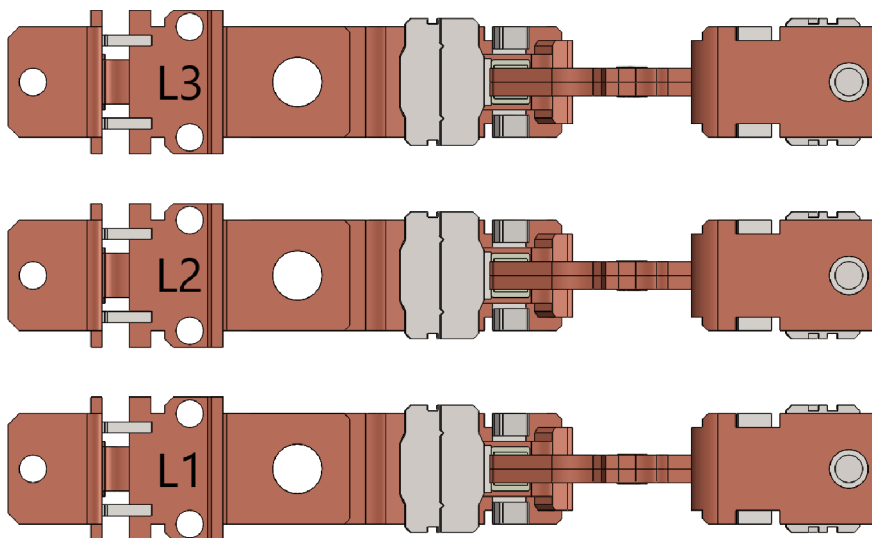
$$i_2 = -42792,152 \text{ A}$$
(9.3)

Výpočet prúdu v tretej fáze (L2) v čase $t = 8$ ms – prúd 20 kA:

$$i_3 = Im \cdot \left[\sin\left(\omega t + \varphi + \frac{4\pi}{3}\right) - \sin\left(\varphi + \frac{4\pi}{3}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]$$

$$i_3 = \sqrt{2} \cdot 20000 \cdot \left[\sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,008 + 0 + \frac{4\pi}{3}\right) - \sin\left(0 + \frac{4\pi}{3}\right) \cdot e^{-\frac{0,008}{0,01559}} \right]$$

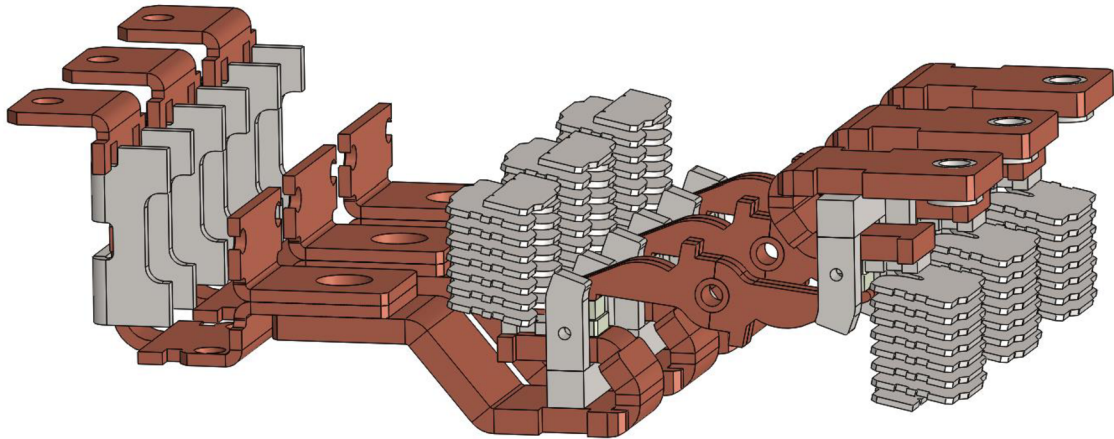
$$i_3 = 26167,074 \text{ A}$$
(9.3)



Obr. 9-2 Usporiadanie fáz v trojfázovom modeli

9.1 Výpočet momentov pre 1. prípad

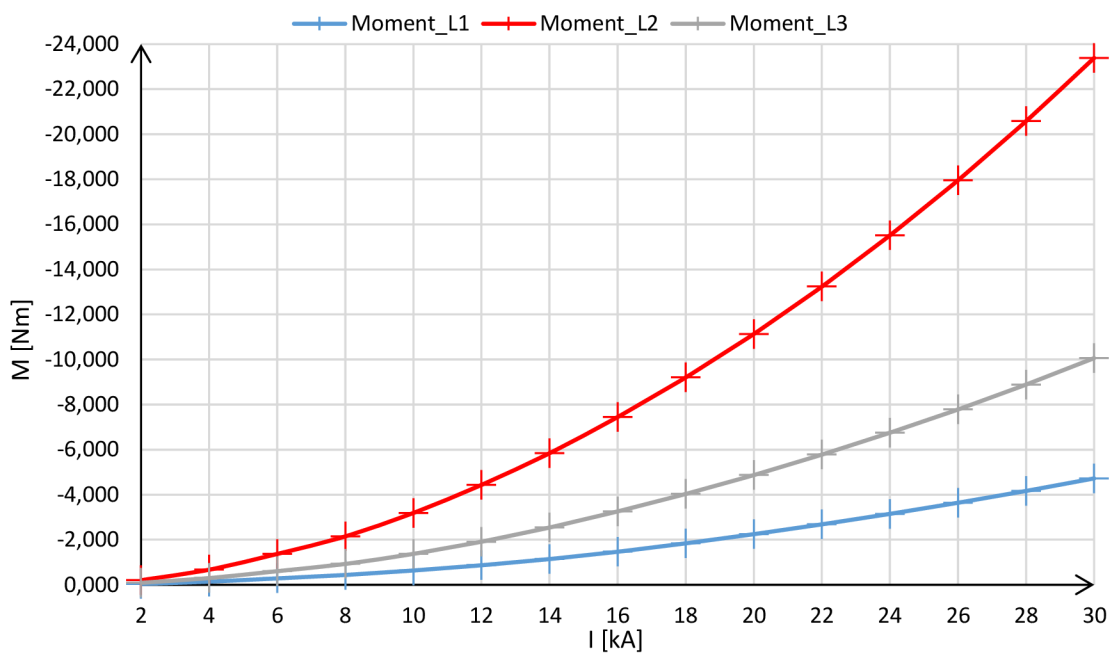
V tomto prípade budeme počítať momenty, ktoré pôsobia na jednotlivé rotačné mostíky v osi z všetkých troch fáz pre prúdy 2 – 30 kA.



Obr. 9-3 Model prúdovodných dráh pre 1. prípad

Tabuľka 22 Výsledné momenty vypočítané pre 1. prípad

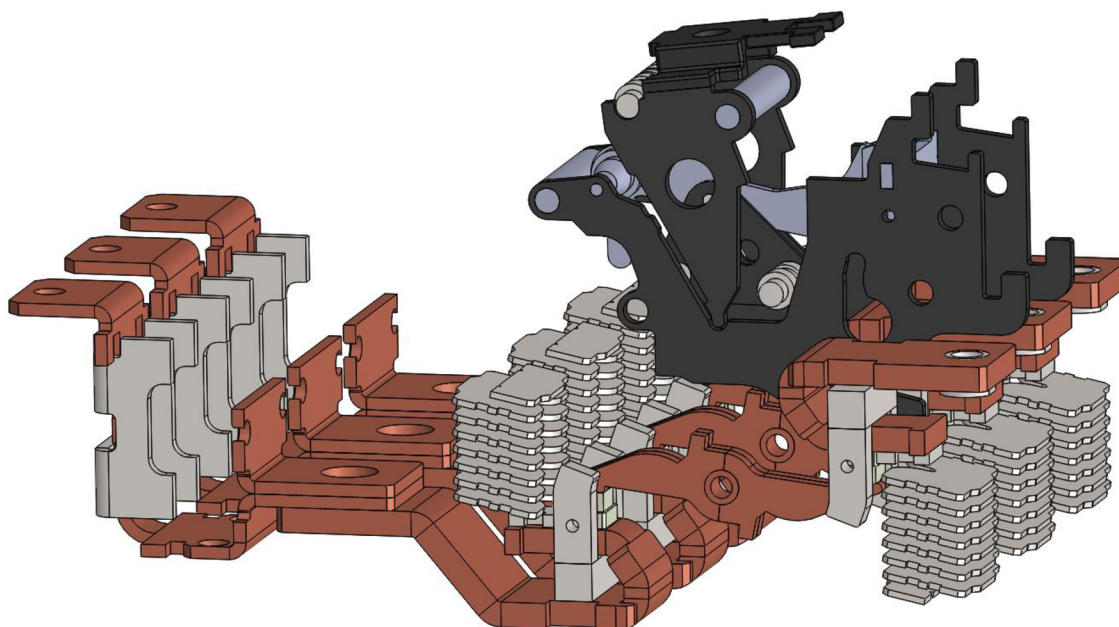
Prúd	Fáza 1		Fáza 2		Fáza 3	
	Prúd	Moment	Prúd	Moment	Prúd	Moment
I_{ef} [A]	I_1 [A]	M_{L1} [Nm]	I_2 [A]	M_{L2} [Nm]	I_3 [A]	M_{L3} [Nm]
2000	1662,508	-0,036	-4279,215	-0,202	2616,707	-0,086
4000	3325,016	-0,137	-8558,430	-0,669	5233,415	-0,298
6000	4987,523	-0,283	-12837,646	-1,368	7850,122	-0,603
8000	6650,031	-0,436	-17116,861	-2,147	10466,829	-0,926
10000	8312,538	-0,635	-21396,076	-3,189	13083,537	-1,372
12000	9975,046	-0,866	-25675,291	-4,433	15700,244	-1,912
14000	11637,554	-1,142	-29954,506	-5,841	18316,952	-2,542
16000	13300,062	-1,466	-34233,722	-7,445	20933,659	-3,257
18000	14962,569	-1,840	-38512,937	-9,203	23550,367	-4,032
20000	16625,077	-2,247	-42792,152	-11,131	26167,074	-4,869
22000	18287,585	-2,683	-47071,367	-13,235	28783,781	-5,778
24000	19950,093	-3,148	-51350,582	-15,512	31400,489	-6,751
26000	21612,601	-3,641	-55629,798	-17,955	34017,196	-7,782
28000	23275,108	-4,166	-59909,013	-20,581	36633,904	-8,887
30000	24937,616	-4,722	-64188,228	-23,385	39250,611	-10,061



Obr. 9-4 Momenty pôsobiace v jednotlivých fázach v závislosti na prúde 1. prípad

9.2 Výpočet momentov pre 2. prípad

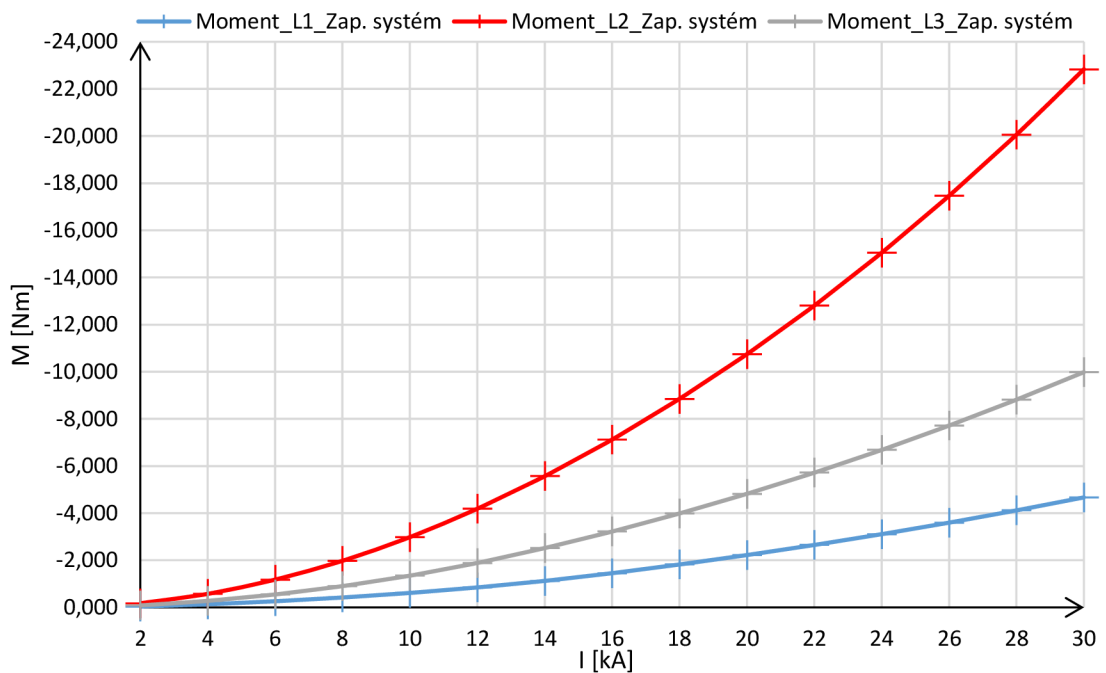
V tomto prípade budeme počítať momenty, ktoré pôsobia na jednotlivé rotačné mostíky v osi z všetkých troch fáz pre prúdy 2 – 30 kA za podmienky, že sa nad fázou č.2 bude nachádzať zapínací systém ističa.



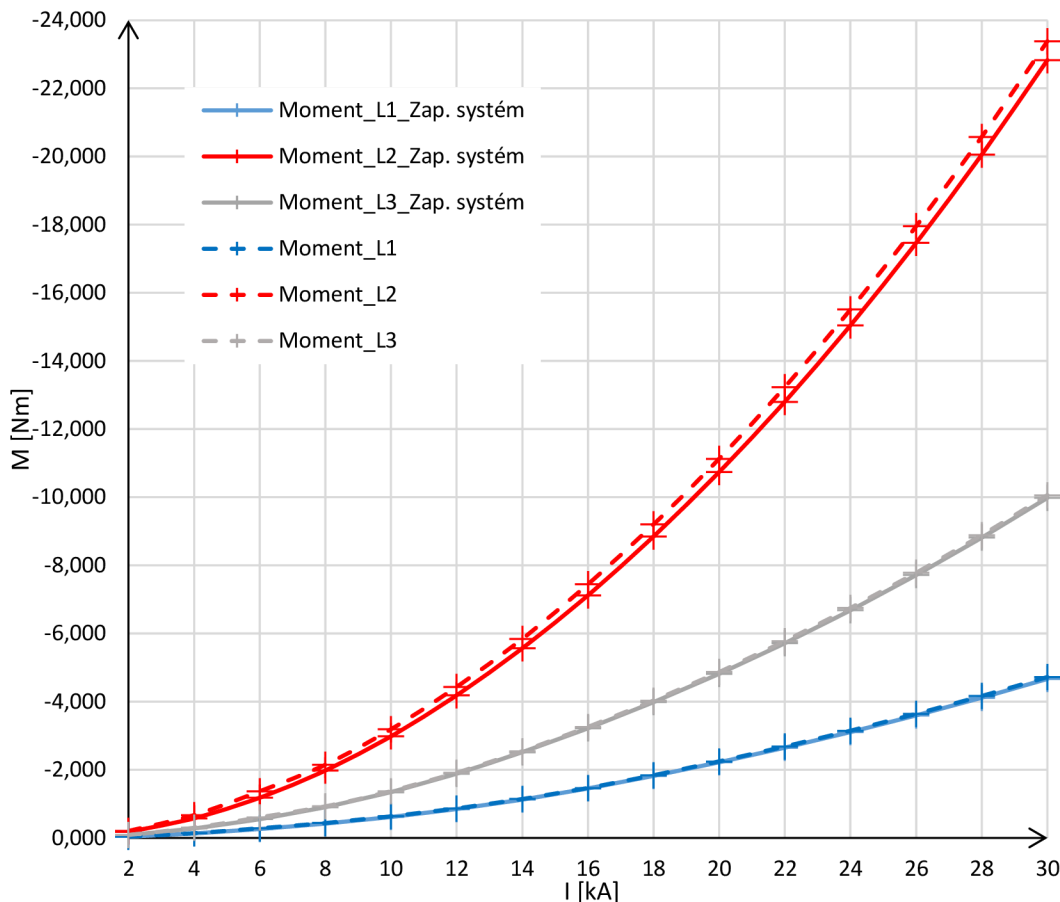
Obr. 9-5 Model prúdovodných dráh so zapínacím systémom pre 2. prípad

Tabuľka 23 Výsledné momenty vypočítané pre 2. prípad

Prúd	Fáza 1		Fáza 2		Fáza 3	
	Prúd	Moment	Prúd	Moment	Prúd	Moment
I_{ef} [A]	i_1 [A]	M_{L1} [Nm]	i_2 [A]	M_{L2} [Nm]	i_3 [A]	M_{L3} [Nm]
2000	1662,508	-0,035	-4279,215	-0,175	2616,707	-0,084
4000	3325,016	-0,132	-8558,430	-0,574	5233,415	-0,279
6000	4987,523	-0,261	-12837,646	-1,180	7850,122	-0,550
8000	6650,031	-0,421	-17116,861	-1,978	10466,829	-0,904
10000	8312,538	-0,615	-21396,076	-2,982	13083,537	-1,347
12000	9975,046	-0,848	-25675,291	-4,186	15700,244	-1,886
14000	11637,554	-1,124	-29954,506	-5,566	18316,952	-2,518
16000	13300,062	-1,453	-34233,722	-7,120	20933,659	-3,218
18000	14962,569	-1,821	-38512,937	-8,850	23550,367	-3,987
20000	16625,077	-2,221	-42792,152	-10,743	26167,074	-4,819
22000	18287,585	-2,649	-47071,367	-12,805	28783,781	-5,715
24000	19950,093	-3,108	-51350,582	-15,048	31400,489	-6,682
26000	21612,601	-3,597	-55629,798	-17,466	34017,196	-7,715
28000	23275,108	-4,117	-59909,013	-20,059	36633,904	-8,815
30000	24937,616	-4,667	-64188,228	-22,831	39250,611	-9,982



Obr. 9-6 Momenty pôsobiace v jednotlivých fázach v závislosti na prúde 2. prípad



Obr. 9-7 Momenty pôsobiace v jednotlivých fázach v závislosti na prúde pre 1. a 2. prípad

9.3 Zhodnotenie výsledkov

V tejto kapitole sme sa zaoberali statickým výpočtom momentov na 3f modeli pri prechode striedavého nesymetrického skratového prúdu v rozsahu 2 – 30 kA. Do tohto výpočtu sme zahrnuli situáciu, kedy je obvod maximálne induktívny ($\cos\varphi = 0,2$). Tento výpočet sme urobili pre dva prípady.

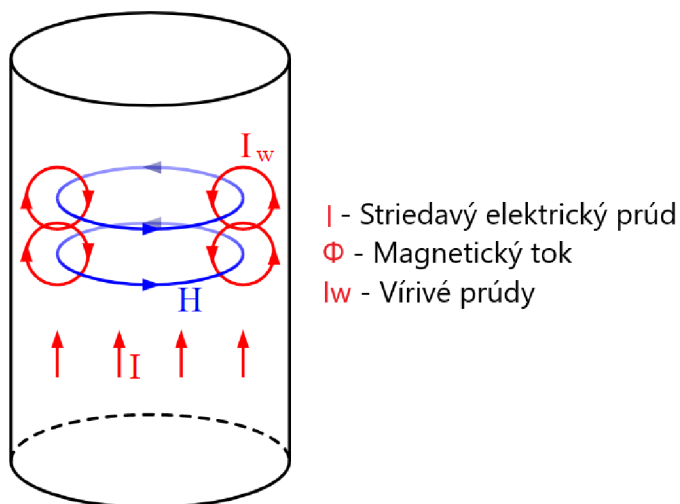
V 1.případe sme simulovali situáciu, kedy sa v okolí prúdovodných dráh a kontaktných stykov nachádzali zhášacie komory a feromagnetické prvky U-závitov. Výsledné momenty v jednotlivých fázach boli namerané pre prúdy, ktorých hodnoty odpovedajú veľkosti v čase $t = 8$ ms, kedy je hodnota prúdu vo Fáze 2 v maximálnej hodnote, ako je znázornené na Obr. 9-1. Výsledné momenty pri prechode prúdu $I_{ef} = 30000A$ v čase $t = 8$ ms odpovedajú hodnotám $M_{L1} = - 4,722$ Nm, $M_{L2} = - 23,385$ Nm a $M_{L3} = - 10,061$ Nm.

V 2.případe sme do modelu doplnili zapínací systém. Výsledné momenty pri prechode prúdu $I_{ef} = 30000A$ v čase $t = 8$ ms odpovedajú hodnotám $M_{L1} = - 4,667$ Nm, $M_{L2} = - 22,831$ Nm a $M_{L3} = - 9,982$ Nm čo je oproti 1. prípadu pokles momentov v M_{L1} o 0,055 Nm (1,17%), v M_{L2} o 0,554 Nm (2,42%) a v M_{L3} o 0,079 Nm (0,79%). Podľa výsledkov z tejto kapitoly je zrejmé, že zapínací systém spôsobí pokles momentu výraznejšie len vo Fáze 2, ako je vidieť na Obr. 9-7.

10 DYNAMICKÝ VÝPOČET MOMENTOV A SÍL – TRANZIENTNÁ ANALÝZA

Ako už z názvu vyplýva, jedná sa o časovú analýzu. Pri dynamickom výpočte zisťujeme momenty a elektrodynamické sily pre ustálený striedavý skratový prúd v rozsahu hodnôt 3 – 30 kA efektívnych. Tento výpočet nám umožňuje sledovať meniace sa momenty, ktoré pôsobia na rotačné spínacie mostíky jednotlivých fáz a sily pôsobiace na prúdovodné dráhy v určitom časovom intervale. V našom prípade sa bude jednať o jednu periódu čiže 0 – 20 ms pri frekvencii siete 50 Hz. Pri tomto type analýzy sa už nezanedbávajú javy spojené so vznikom vírivých prúdov a povrchového javu nazývaného Skin efekt.

Skin efekt je fyzikálny dej, pri ktorom dochádza k vytlačaniu elektrického prúdu smerom k povrchu vodiča. Elektrický striedavý prúd I prechádzajúci vodičom uzaviera okolo seba siločiaru magnetického toku Φ . Časť tohto toku prechádza aj tým istým vodičom a indukuje v ňom uzavreté vírivé prúdy I_w . Tieto vírivé prúdy majú bližšie k stredu vodiča opačný smer ako je smer prúdu, a preto sa od seba odčítajú. Avšak bližšie k povrchu vodiča sú smery rovnaké a vírivé prúdy sa sčítajú. Najviac sa Skin efekt prejavuje v prípade plného kruhového prierezu vodiča. Lanko (spletenie viacerých tenkých vodičov), alebo plochý prierez vodiča (medená pásovina) vplyv vírivých prúdov obmedzuje. Pri kmitočte prenosovej sústavy 50 Hz, pri medených vodičoch skin efekt nespôsobí straty väčšie ako 1%.

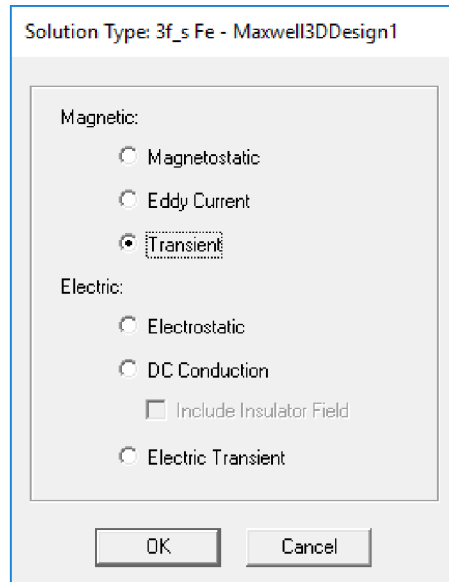


Obr. 10-1 Princíp Skin efektu

Celkový postup, pomocou ktorého sme vypočítali celkové odpudivé sily F_{celk} , je popísaný v kapitole 6. V tejto kapitole sa teda nebudeme zaoberať výpočtom, ale budeme sa zaoberať už priamo vypočítaným hodnotám a ich grafickému spracovaniu. V tejto kapitole sú spracované namerané a vypočítané hodnoty momentov a elektrodynamických síl pri prechode striedavého skratového prúdu o veľkosti 9, 21 a 30 kA. Tabuľky a grafické závislosti pre prúdy 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 a 27 je možné nájsť v prílohách A – I tejto práce.

10.1 Postup simulácie

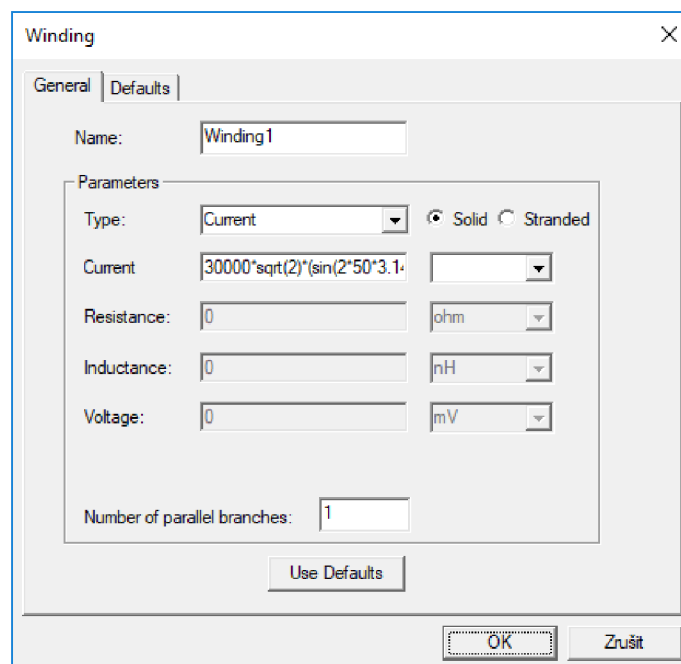
Pri dynamickom výpočte je potrebné nastaviť typ analýzy na Transient (Obr. 10-2). Materiály jednotlivých dielov modelu a hustota meshovacej siete zostali rovnaké ako v prípade magnetostatickej analýzy.



Obr. 10-2 Voľba analýzy

Nastavenie prúdov:

Predtým než sa nastaví prúdy v jednotlivých fázach, je potrebné v každej fáze vytvoriť vinutie s jedným závitom, ktoré predstavuje prúdovodnú dráhu, do ktorej je z ľavej strany vložený vstupný prúd a z pravej strany zase výstupný prúd s rovnakou veľkosťou, avšak s opačnou orientáciou (Excitations → AddWinding).



Obr. 10-3 Nastavenie prúdov

Nastavenie prúdov v jednotlivých fázach:

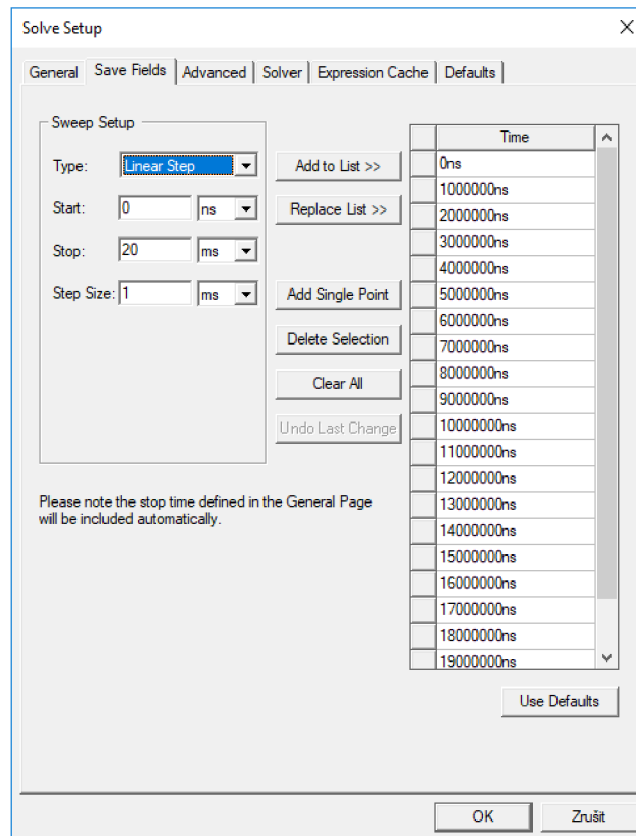
$$\text{Fáza 1:} \quad i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \text{TIME}) \quad (10.1)$$

$$\text{Fáza 2:} \quad i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \text{TIME} + \frac{2}{3} \cdot \pi\right) - \sin\left[\left(\frac{2}{3} \cdot f\right) \cdot e^{-\frac{\text{TIME}}{0.015}}\right] \quad (10.2)$$

$$\text{Fáza 3:} \quad i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot \text{TIME} + \frac{2}{3} \cdot \pi\right) - \sin\left[\left(\frac{4}{3} \cdot f\right) \cdot e^{-\frac{\text{TIME}}{0.015}}\right] \quad (10.3)$$

Nastavenie výpočtu:

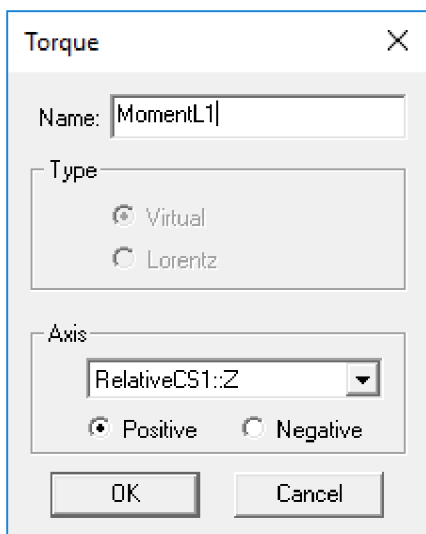
Keďže sa jedná o dynamickú (časovú) analýzu, je potrebné nastaviť časový interval, v ktorom bude urobený výpočet (Analysis → AddSolutionSetup). Čas výpočtu bol zvolený na 20 ms s krokom výpočtu po 1 ms. Nastavenie dĺžky výpočtu odpovedá jednej perióde pri sieťovej frekvencii 50 Hz.



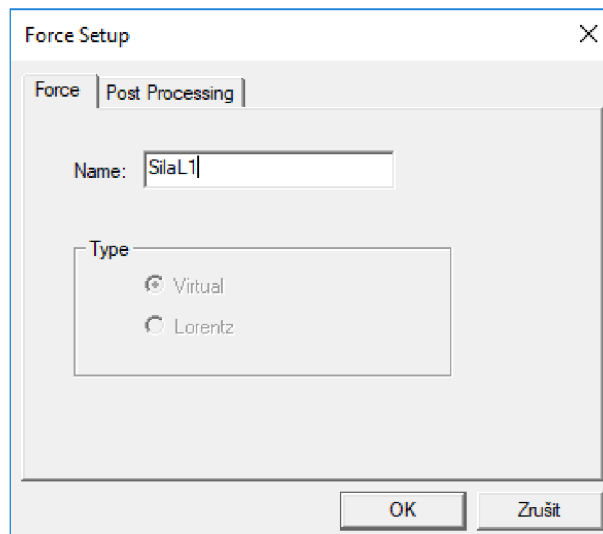
Obr. 10-4 Nastavenie časového intervalu výpočtu

Nastavenie parametrov:

Keďže cieľom tejto kapitoly je zistiť hodnoty momentov pôsobiacich na rotačné spínacie mostíky v jednotlivých fázach v časovom intervale, bolo potrebné vytvoriť pomocnú súradnicovú sústavu a následne vytvoriť 3x parameter momentu – pre každú fázu jeden (Parameters → Assign → Torque) a 3x parameter sily, ktorý sa využije pri skúmaní vzájomného silového pôsobenia jednotlivých fáz (Parameters → Assign → Force).

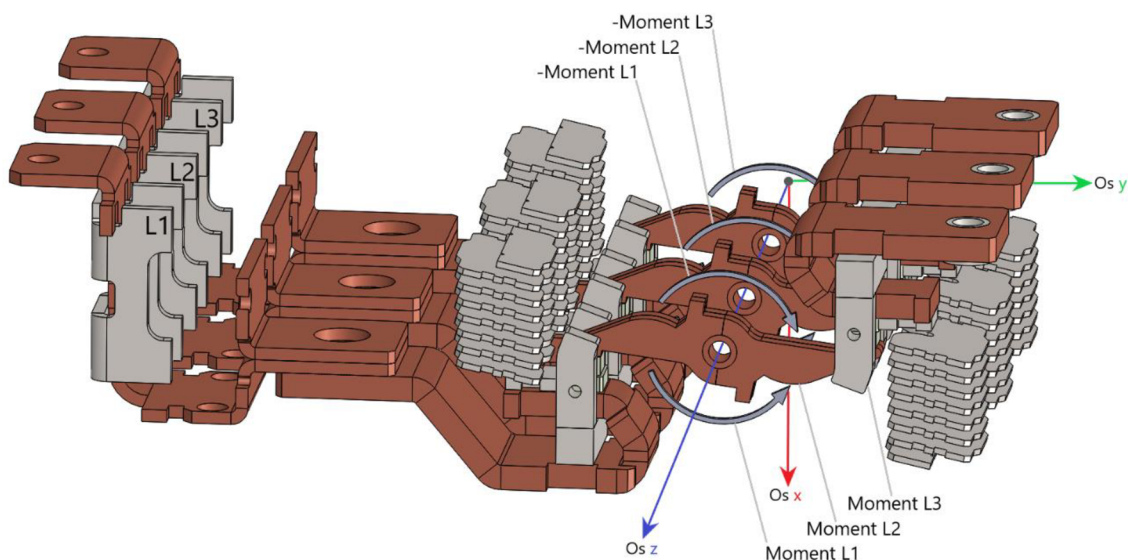


Obr. 10-5 Parameter - Moment



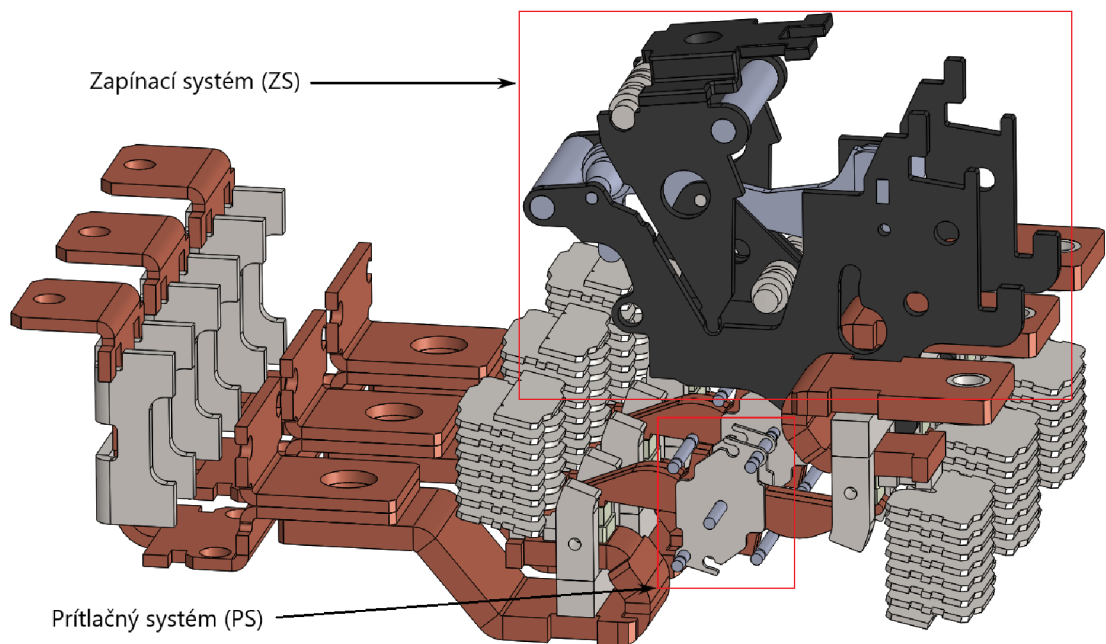
Obr. 10-6 Parameter - Sila

V tejto kapitole sa budeme zaoberať skúmaním momentov, ktoré pôsobia na rotačné spínacie mostíky v jednotlivých fázach a vzájomným silovým pôsobením prúdovodných dráh jednotlivých fáz pri prechode striedavého skratového prúdu v rozsahu 3 – 30 kA. K tomu bolo potrebné vytvoriť dva modely. Prvý model je znázornený na Obr. 10-7. Na tomto obrázku je znázornený model prúdovodných dráh vrátane všetkých feromagnetických prvkov v okolí prúdovodnej dráhy. Ďalej je tu znázornený pomocný súradnicový systém, ktorý je umiestnený v osi s osou, na ktorej sa jednotlivé mostíky otáčajú. Na tomto obrázku sú ďalej znázornené šípky, ktoré znázorňujú akým smerom sa mostíky otáčajú ak na nich pôsobí kladný alebo záporný moment.



Obr. 10-7 3F Model č.1

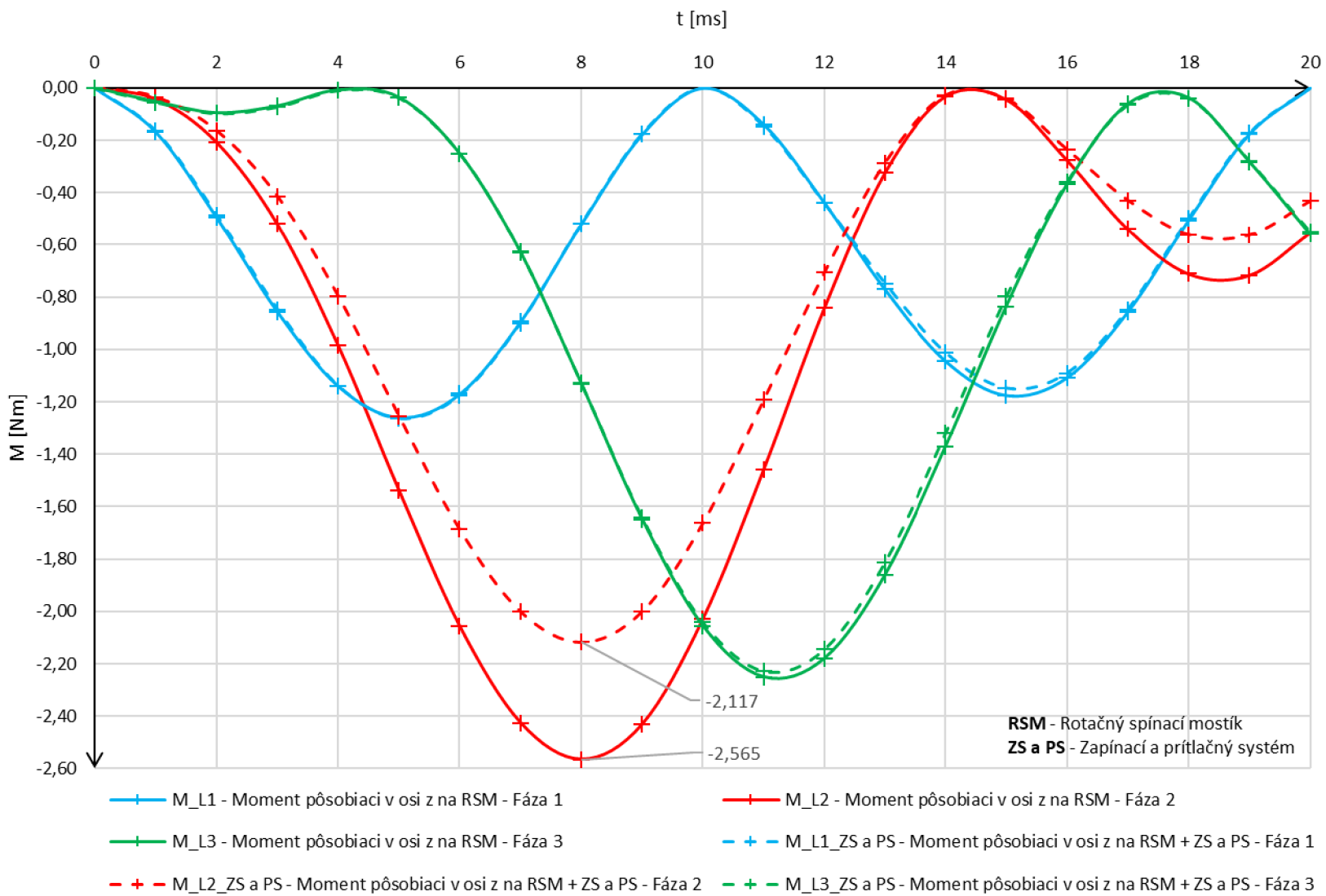
Druhý model je znázornený na Obr. 10-8. Tento model sa od prvého líši tým, že sú doňho pridané feromagnetické prvky prítlačného systému (slúži ako ochrana pred nadsakovaním kontaktov) a zapínacieho systému. Tento druhý model bol vytvorený z dôvodu skúmania, do akej miery tieto feromagnetické prvky ovplyvnia moment a tým pádom aj celkovú výslednú odpudivú silu a do akej miery ovplyvnia vzájomné silové pôsobenie jednotlivých prúdovodných dráh v osi z.



Obr. 10-8 Model č. 2 rozšírený o zapínací a prítlačný systém

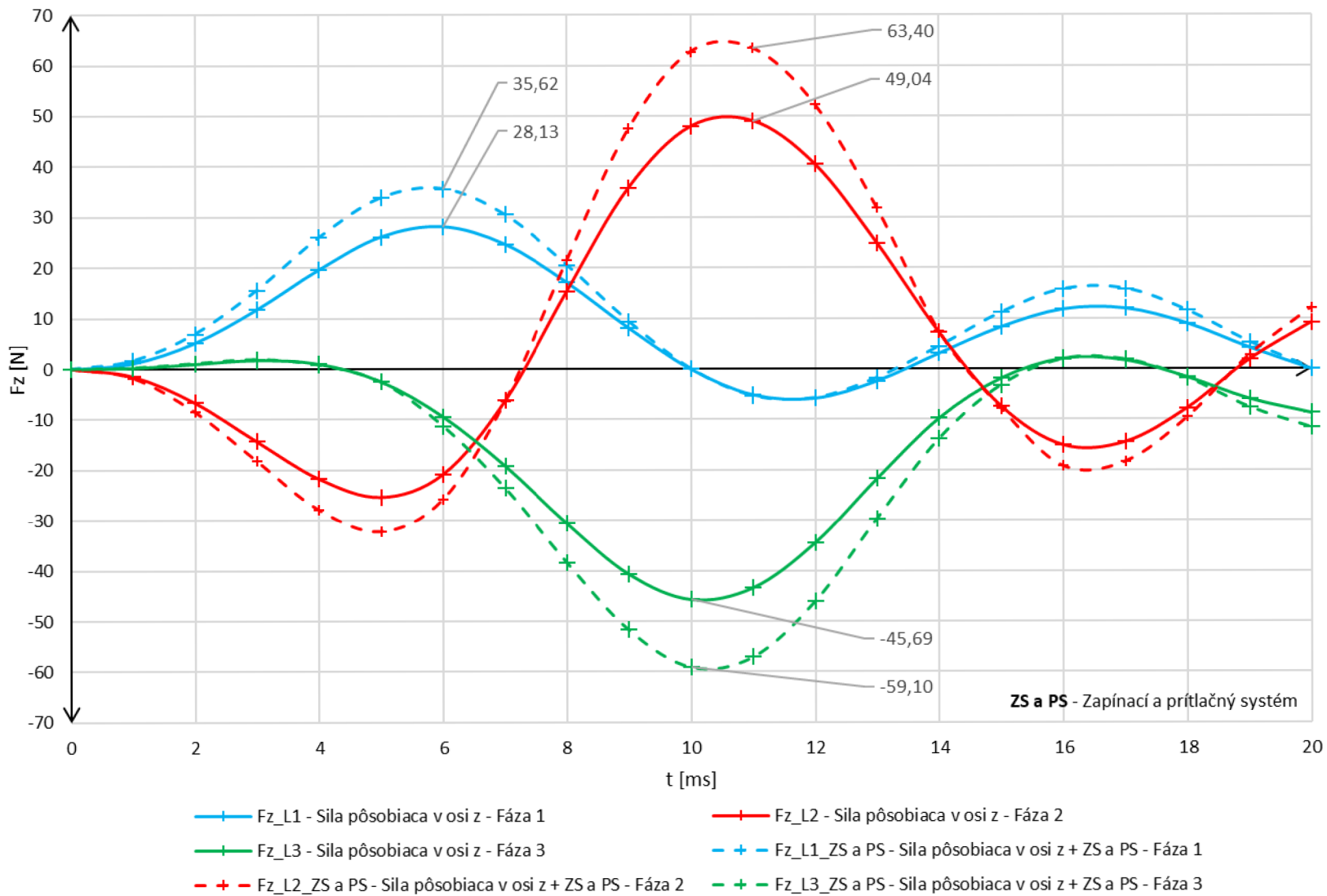
V nasledujúcich podkapitolách 10.2, 10.3 a 10.4 sa nachádzajú tabuľky a grafické závislosti nameraných a vypočítaných hodnôt pre prúdy 9, 21 a 30 kA. Tieto tabuľky obsahujú hodnoty momentov pôsobiacich na rotačné spínacie mostíky, celkové odpudivé sily, úžinové sily a sily pôsobiace v osi z. Všetky tabuľky obsahujú hodnoty, ktoré boli namerané a následne dopočítané z modelu č.1 ale taktiež z modelu č.2. V týchto podkapitolách sa taktiež nachádzajú grafické závislosti z nameraných a vypočítaných hodnôt, ktoré sú spracované v piatich typoch grafov.

10.2 Striedavý prúd 9 kA

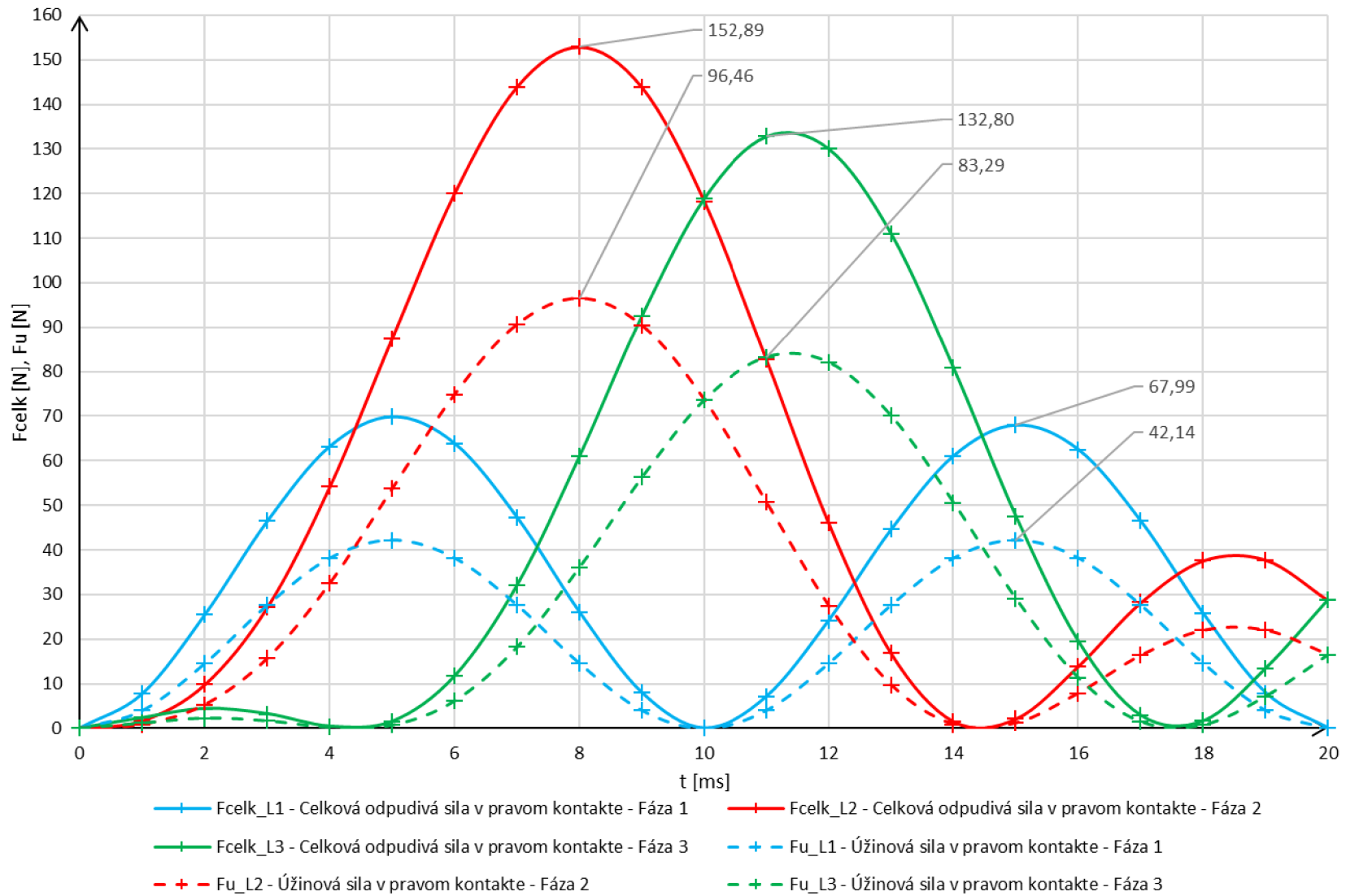


Obr. 10-9 Momenty pôsobiace na RSM v závislosti na čase - 9 kA

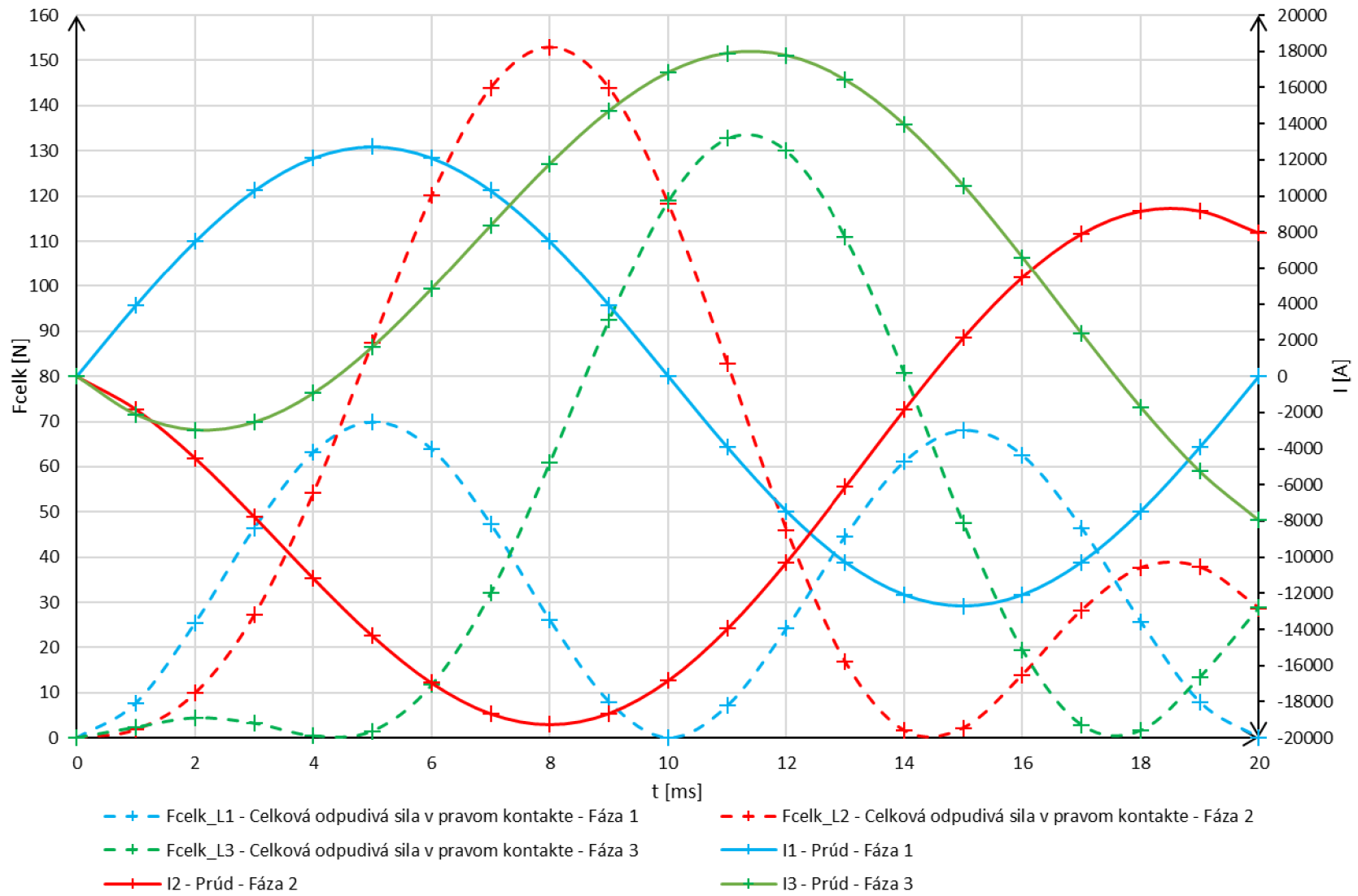
Obr. 10-10 Sily pôsobiace v osi z na jednotlivé fázy v závislosti na čase - 9 kA

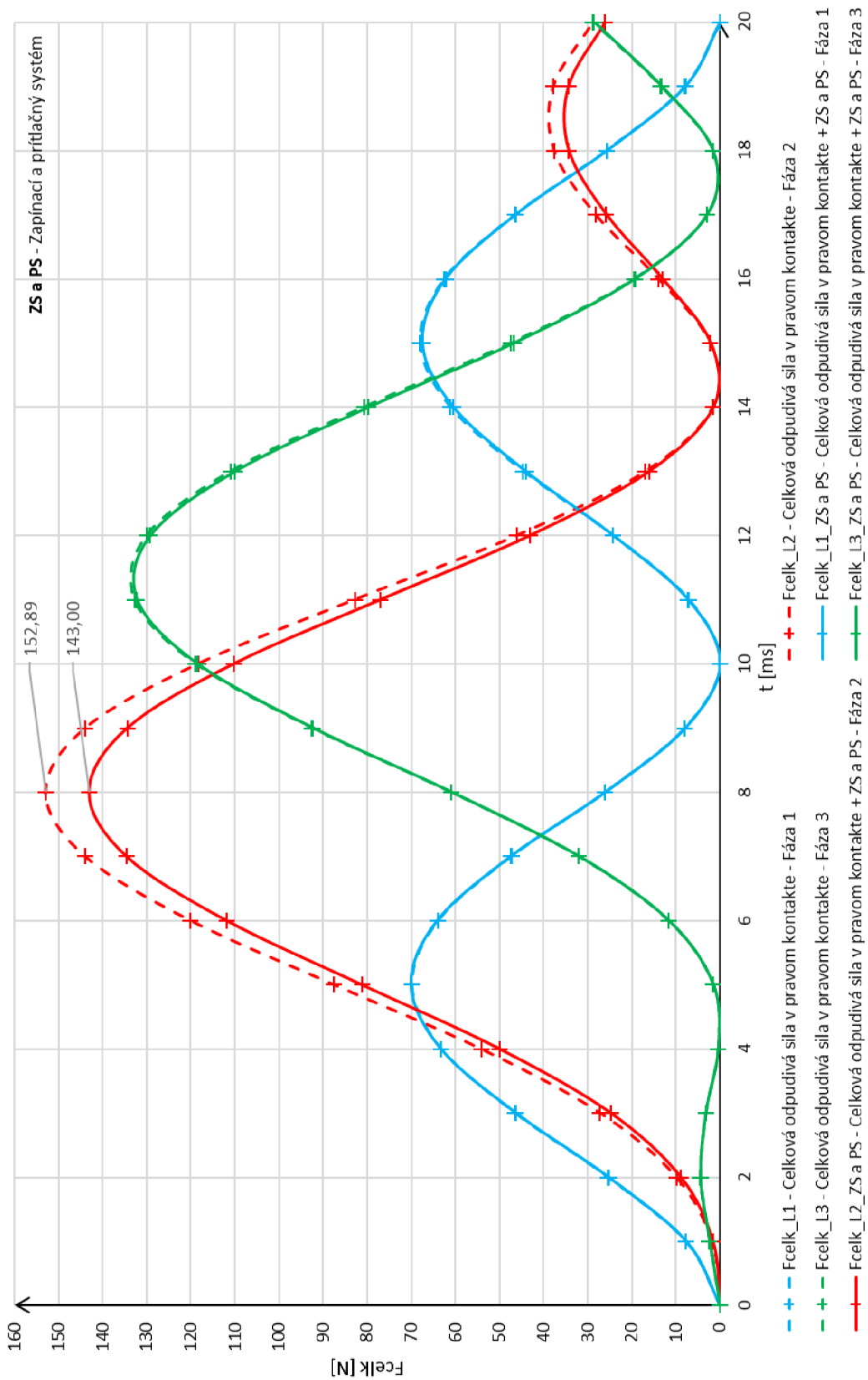


Obr. 10-11 Celkové odpudivé síly F_{celk} a úžinové síly F_u v závislosti na čase - 9 kA

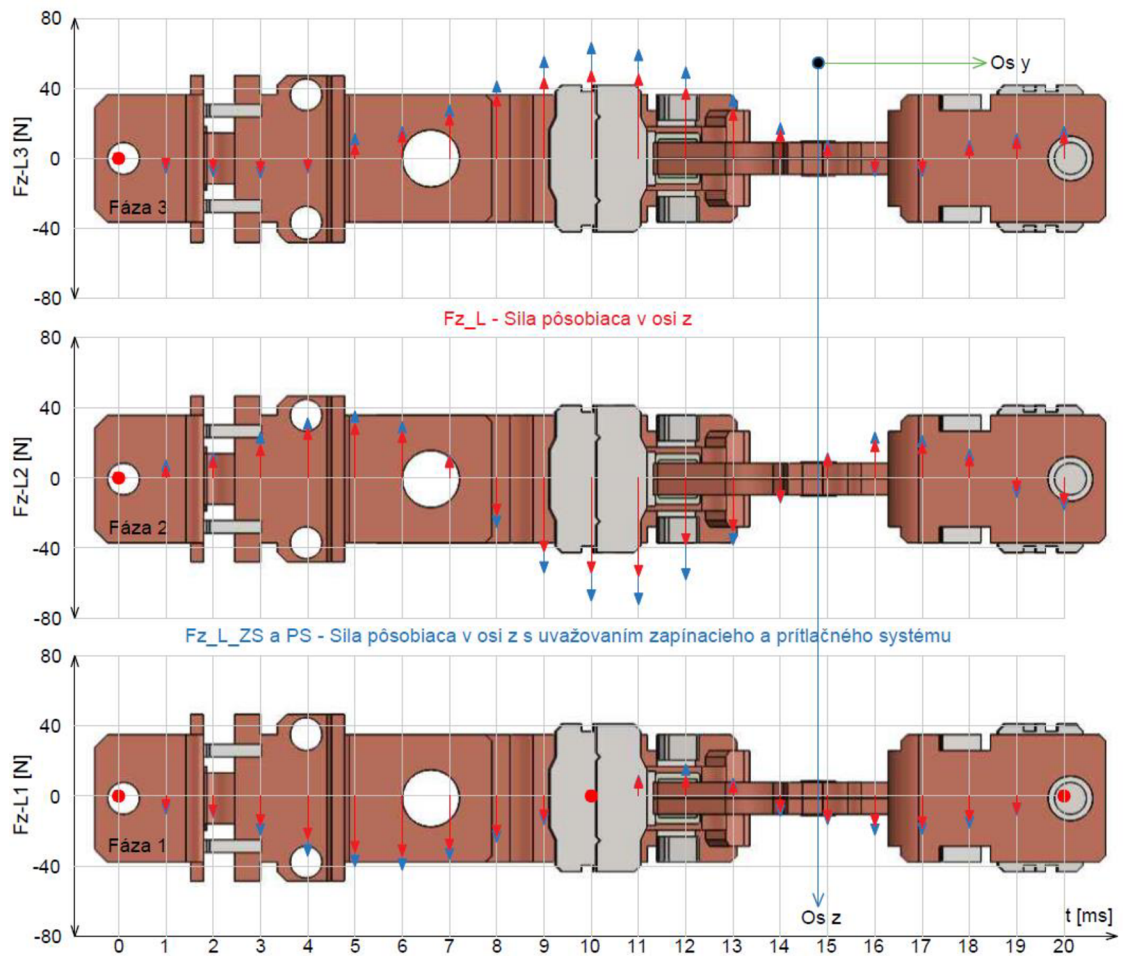


Obr. 10-12 Celkové odpudivé sily F_{celk} a priebehy prúdov I v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 9 kA



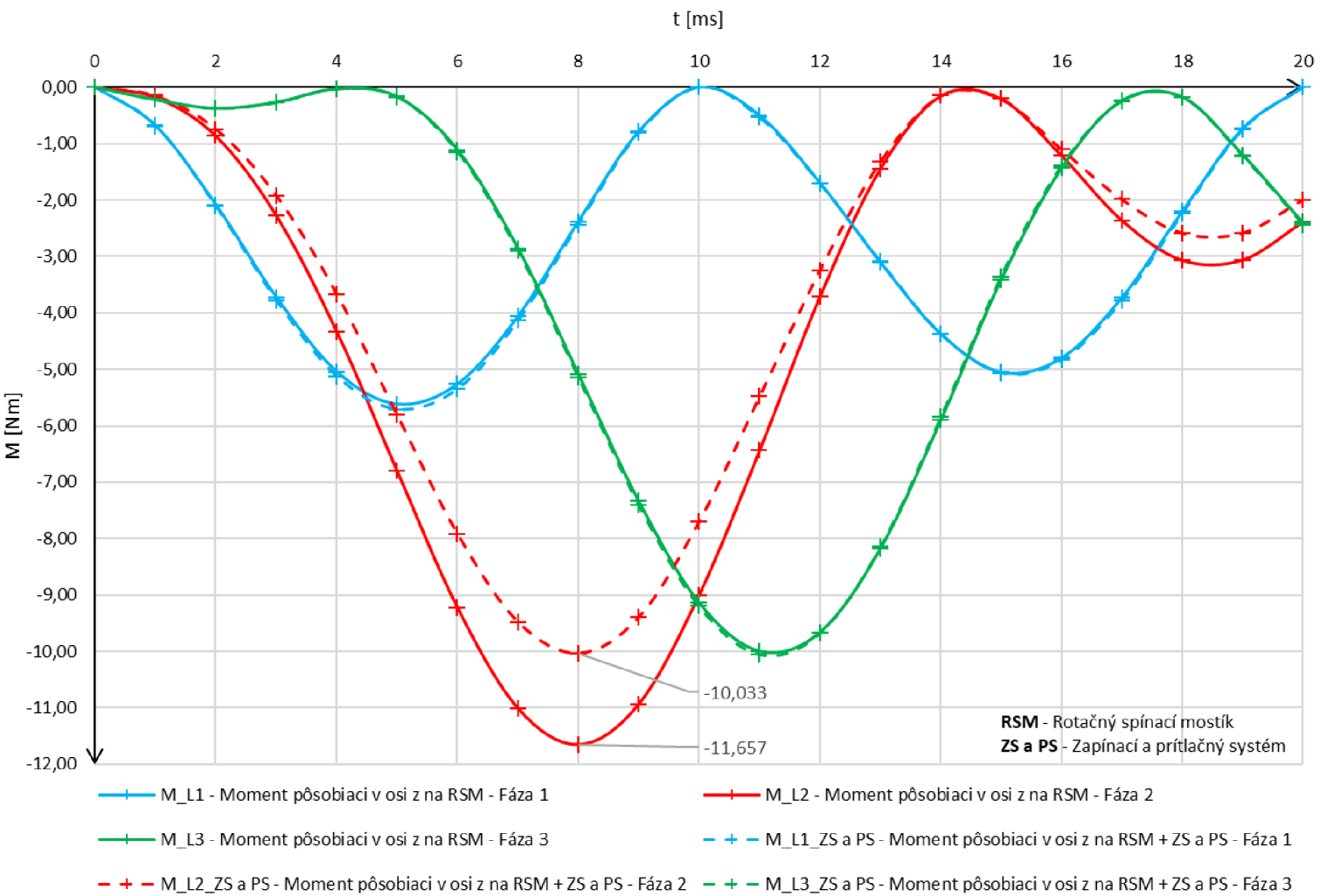


Obr. 10-13 Celkové odpudivé síly F_{celk} / F_{celk_ZS} a PS v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 9 kA

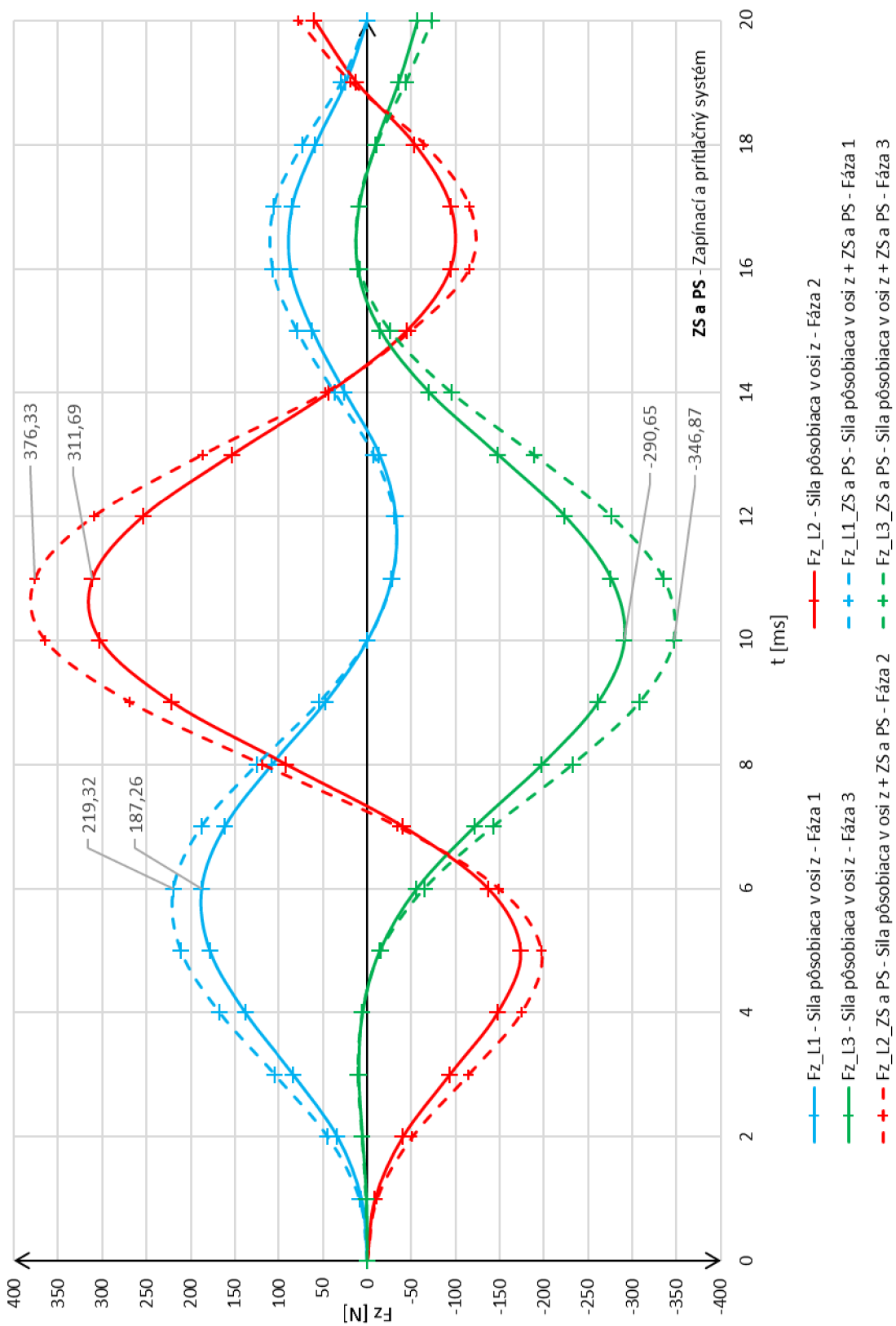


Obr. 10-14 Grafické znázornenie vzájomného silového pôsobenia fáz v osi z - 9 kA

10.3 Striedavý prúd 21 kA

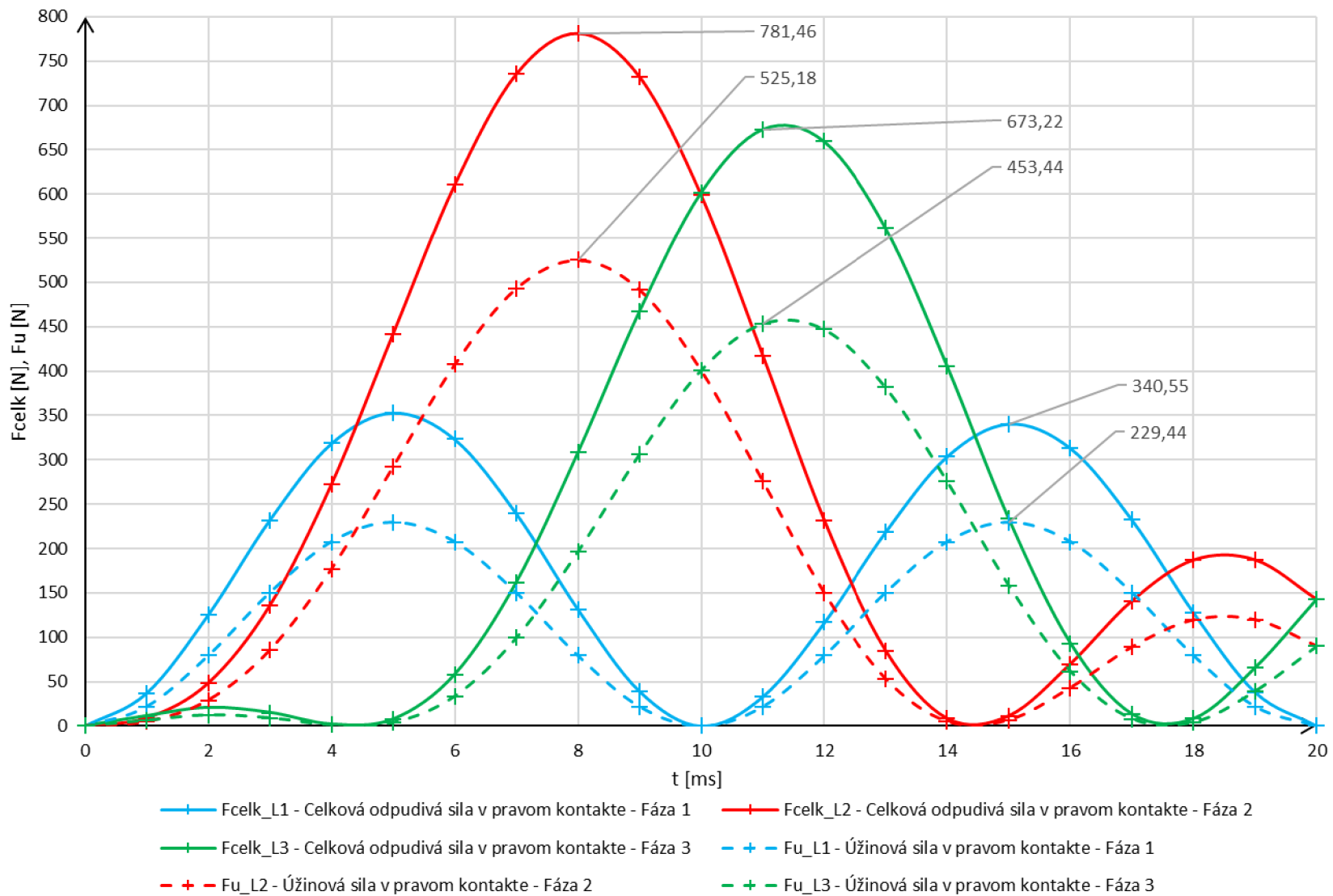


Obr. 10-15 Momenty pôsobiace na RSM v závislosti na čase - 21 kA

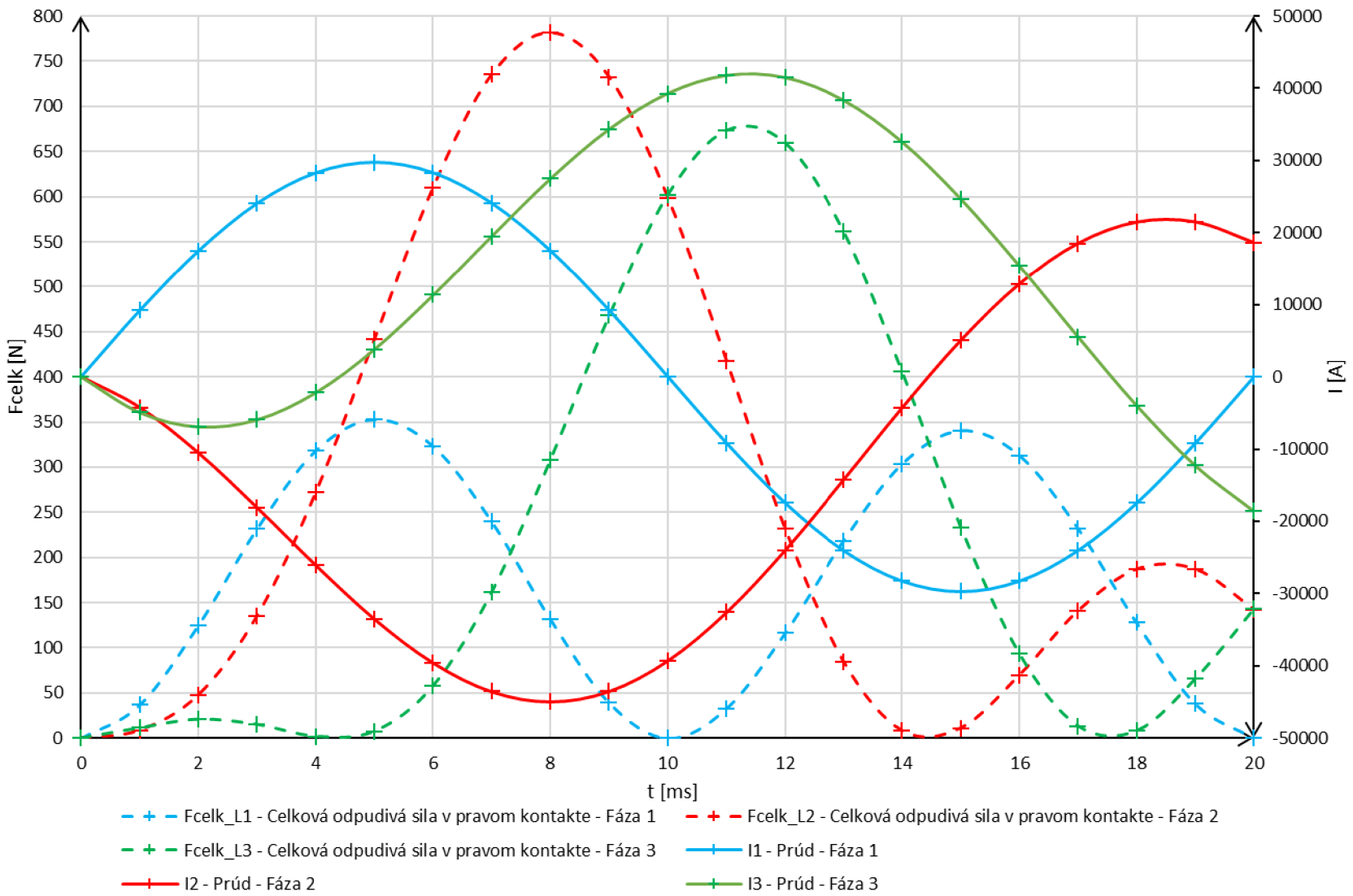


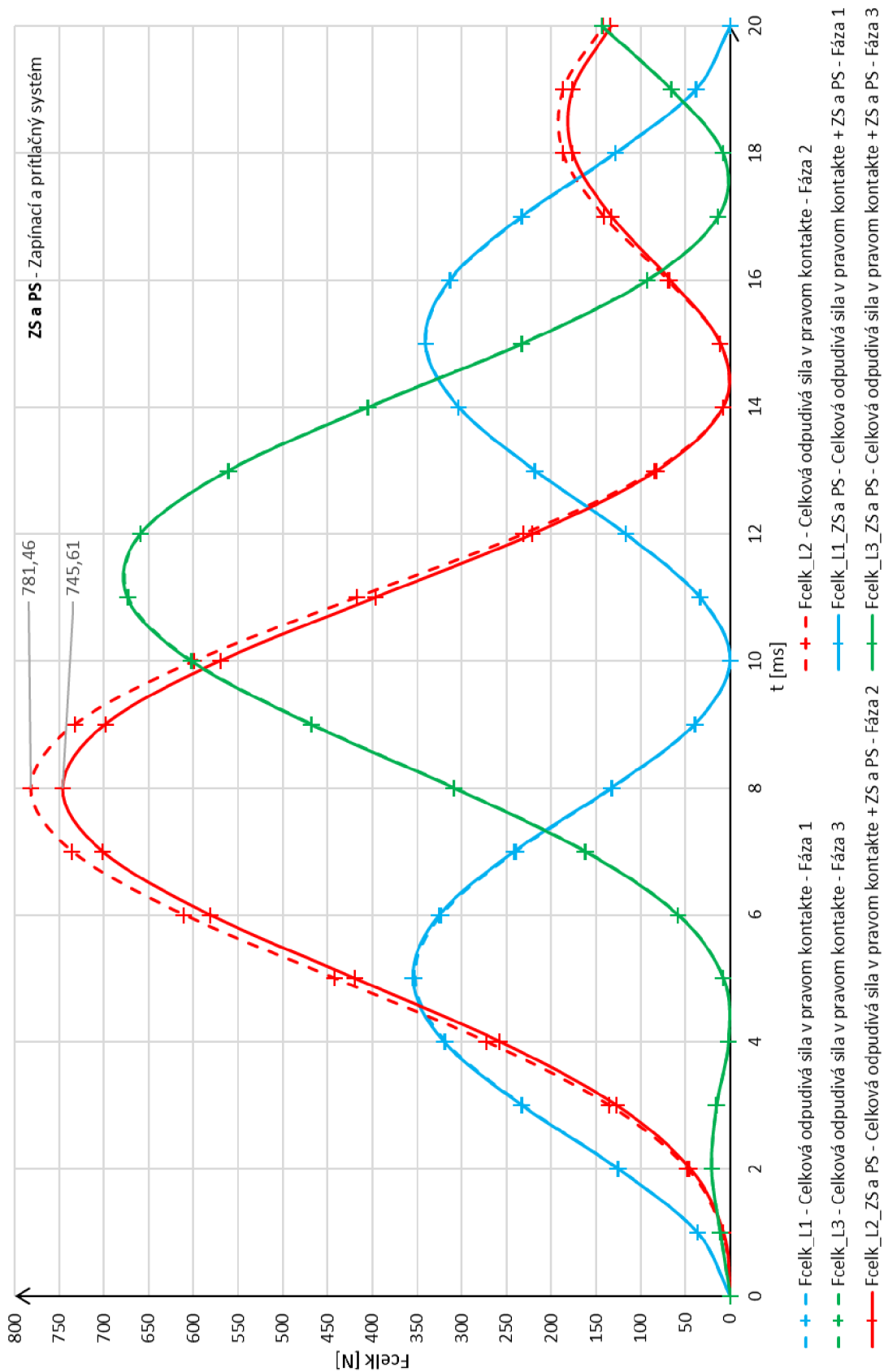
Obr. 10-16 Sily pôsobiace v osi z na jednotlivé fázy v závislosti na čase - 21 kA

Obr. 10-17 Celkové odpudivé síly F_{celk} a úžinové síly F_u v závislosti na čase - 21 kA

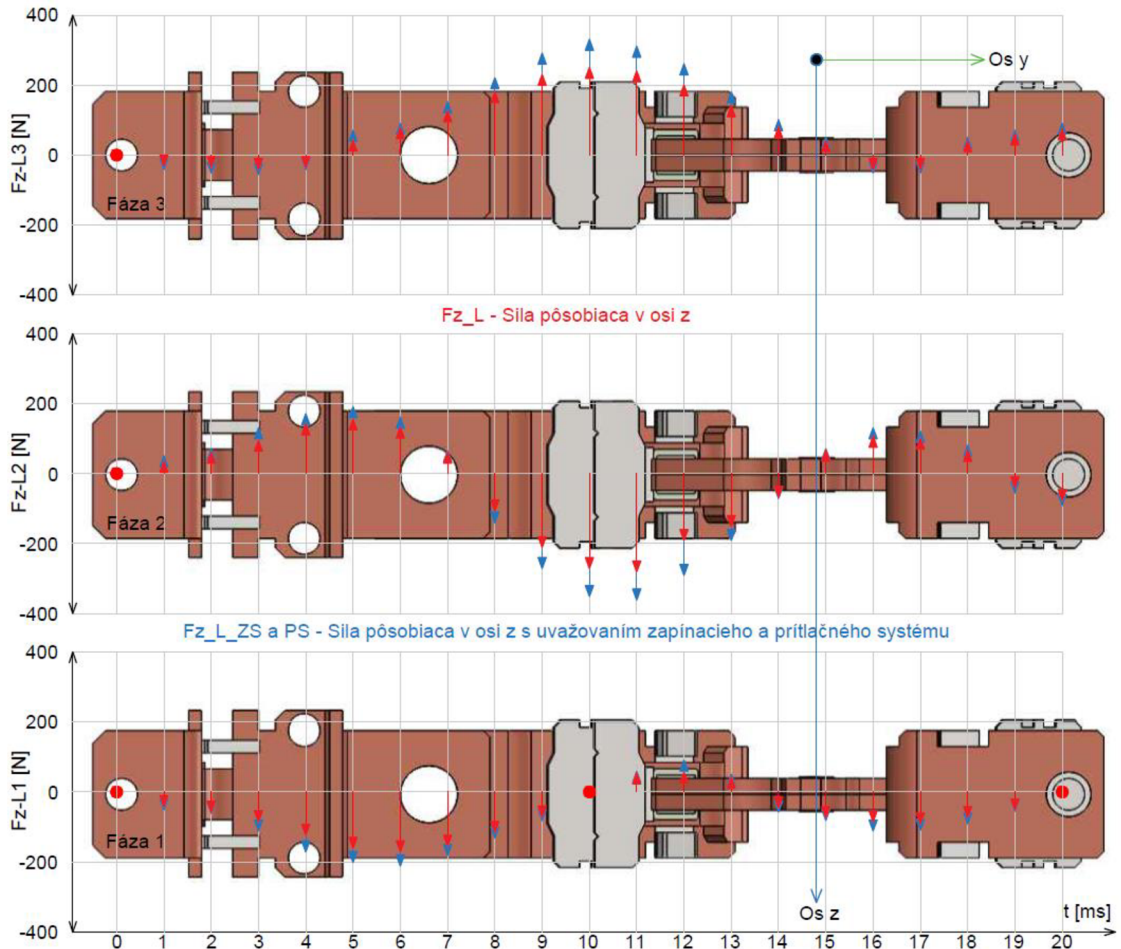


Obr. 10-18 Celkové odpudivé sily F_{celk} a priebehy prúdov I v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 21 kA





Obr. 10-19 Celkové odpudivé síly $F_{celk} / F_{celk_ZS a PS}$ v jednotlivých fázích v závislosti na čase - 21 kA



Obr. 10-20 Grafické znázornenie vzájomného silového pôsobenia fáz v osi z - 21 kA

10.4 Striedavý prúd 30 kA

Tabuľka 24 Momenty pôsobiace vo všetkých fázach bez uvažovania ZS a PS - 30 kA

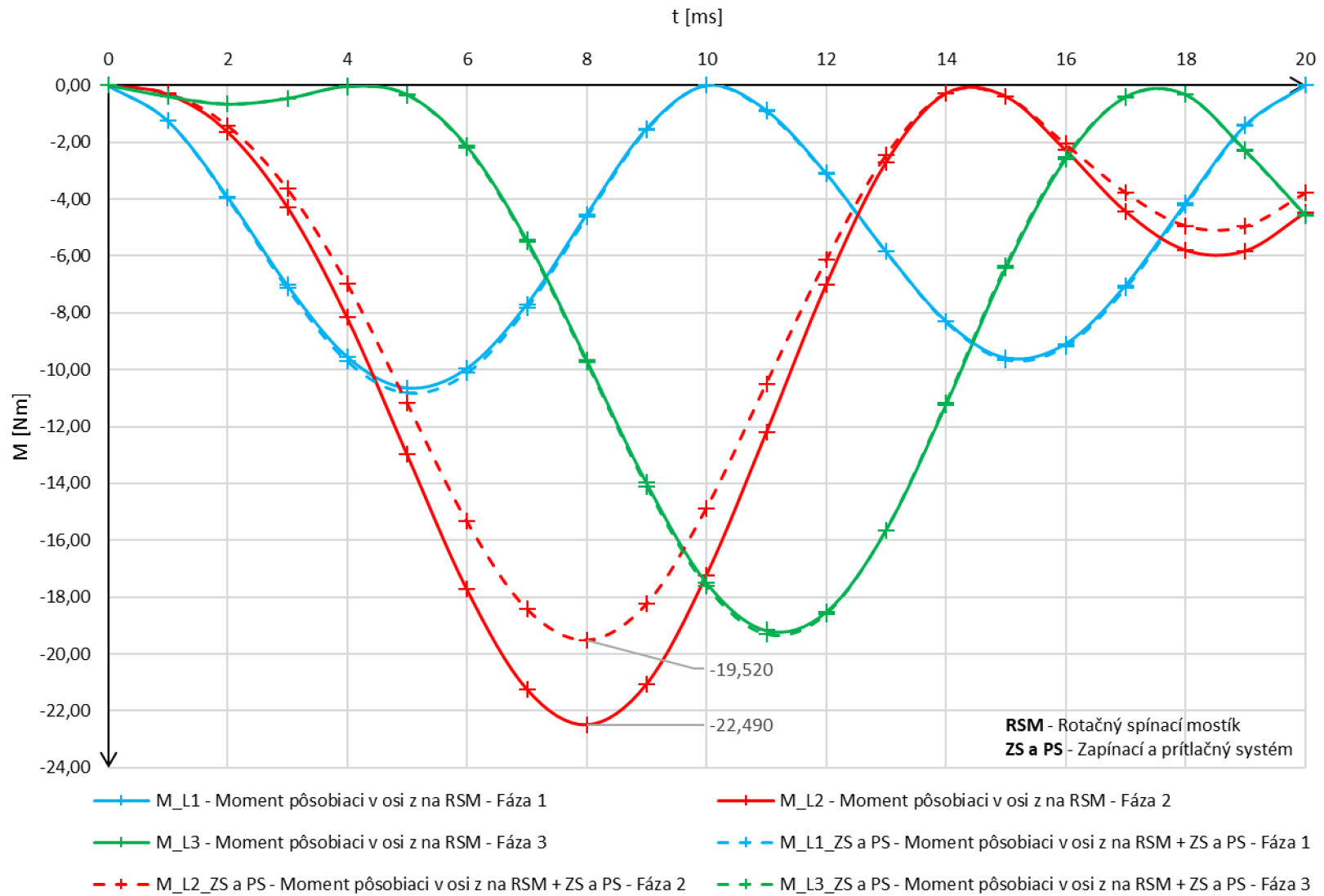
Čas	Fáza 1		Fáza 2		Fáza 3	
	Prúd	Moment	Prúd	Moment	Prúd	Moment
t [ms]	I_L1 [A]	M_L1 [Nm]	I_L2 [A]	M_L2 [Nm]	I_L3 [A]	M_L3 [Nm]
0	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000
1	13110,48	-1,254	-6070,75	-0,320	-7039,74	-0,402
2	24937,62	-3,916	-15062,21	-1,633	-9875,40	-0,670
3	34323,68	-7,026	-25875,88	-4,277	-8447,81	-0,466
4	40349,91	-9,555	-37248,40	-8,170	-3101,52	-0,046
5	42426,41	-10,652	-47874,46	-12,979	5448,06	-0,326
6	40349,91	-9,965	-56533,77	-17,730	16183,85	-2,141
7	34323,68	-7,713	-62209,71	-21,236	27886,03	-5,440
8	24937,62	-4,543	-64188,23	-22,490	39250,61	-9,649
9	13110,48	-1,519	-62127,03	-21,061	49016,55	-13,977
10	0,00	0,000	-56088,49	-17,228	56088,49	-17,484

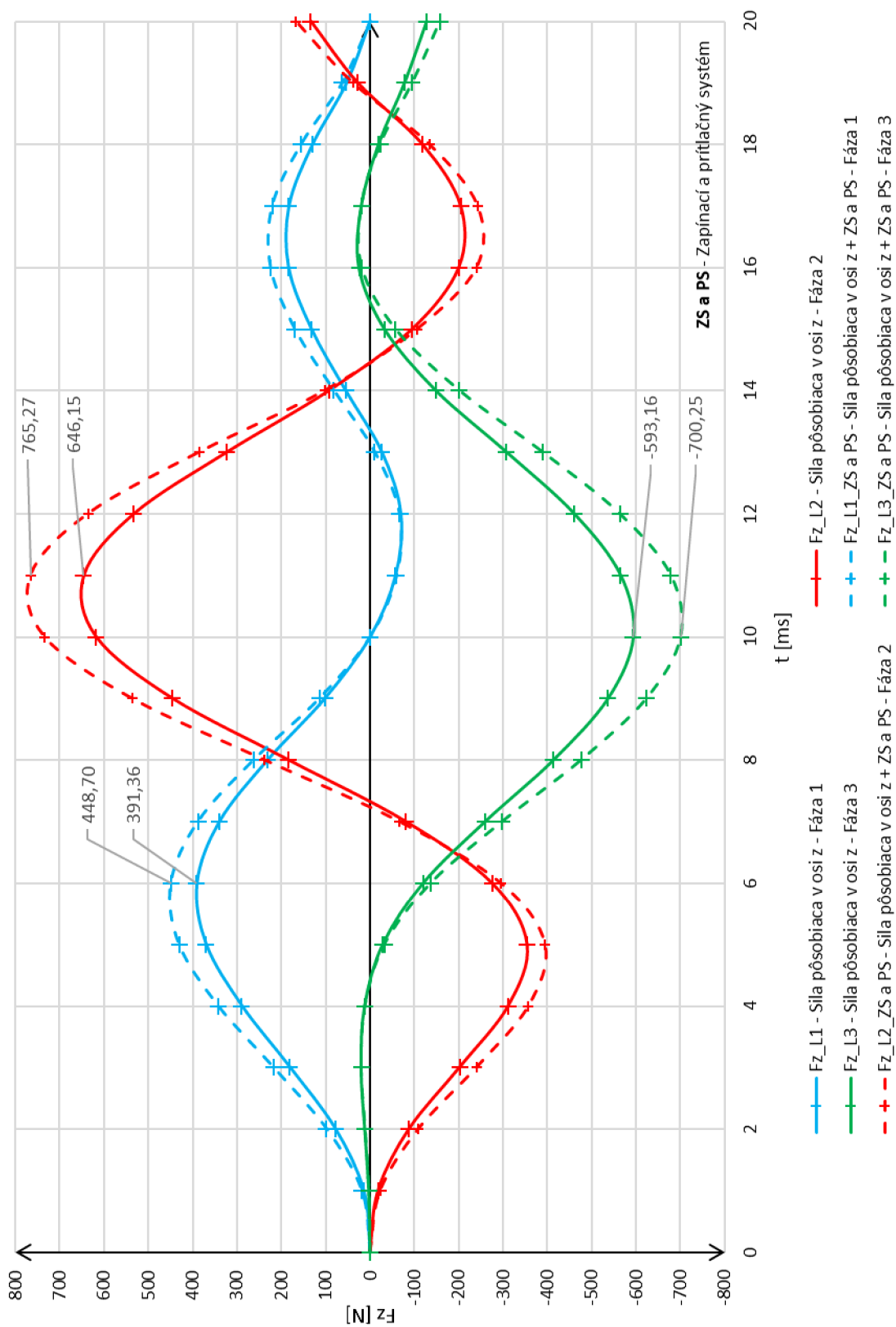
Čas	Fáza 1		Fáza 2		Fáza 3	
	Prúd	Moment	Prúd	Moment	Prúd	Moment
t [ms]	I_L1 [A]	M_L1 [Nm]	I_L2 [A]	M_L2 [Nm]	I_L3 [A]	M_L3 [Nm]
11	-13110,48	-0,876	-46532,98	-12,218	59643,46	-19,170
12	-24937,62	-3,098	-34273,25	-7,012	59210,87	-18,521
13	-34323,68	-5,847	-20394,39	-2,711	54718,08	-15,647
14	-40349,91	-8,293	-6147,11	-0,287	46497,02	-11,242
15	-42426,41	-9,593	7175,11	-0,390	35251,30	-6,437
16	-40349,91	-9,098	18363,05	-2,283	21986,86	-2,599
17	-34323,68	-7,039	26410,53	-4,435	7913,15	-0,412
18	-24937,62	-4,153	30613,25	-5,795	-5675,63	-0,329
19	-13110,48	-1,401	30638,05	-5,822	-17527,57	-2,287
20	0,00	0,000	26555,92	-4,482	-26555,92	-4,554

Tabuľka 25 Momenty pôsobiace vo všetkých fázach s uvažovaním ZS a PS - 30 kA

Čas	Fáza 1		Fáza 2		Fáza 3	
	Prúd	Moment	Prúd	Moment	Prúd	Moment
t [ms]	I_L1_ZS a PS [A]	M_L1_ZS a PS [Nm]	I_L2_ZS a PS [A]	M_L2_ZS a PS [Nm]	I_L3_ZS a PS [A]	M_L3_ZS a PS [Nm]
0	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000
1	13110,48	-1,254	-6070,75	-0,280	-7039,74	-0,398
2	24937,62	-3,960	-15062,21	-1,408	-9875,40	-0,669
3	34323,68	-7,122	-25875,88	-3,635	-8447,81	-0,482
4	40349,91	-9,694	-37248,40	-6,971	-3101,52	-0,059
5	42426,41	-10,814	-47874,46	-11,176	5448,06	-0,343
6	40349,91	-10,119	-56533,77	-15,344	16183,85	-2,197
7	34323,68	-7,836	-62209,71	-18,424	27886,03	-5,520
8	24937,62	-4,637	-64188,23	-19,520	39250,61	-9,743
9	13110,48	-1,564	-62127,03	-18,250	49016,55	-14,100
10	0,00	0,002	-56088,49	-14,876	56088,49	-17,619
11	-13110,48	-0,928	-46532,98	-10,495	59643,46	-19,305
12	-24937,62	-3,119	-34273,25	-6,146	59210,87	-18,594
13	-34323,68	-5,845	-20394,39	-2,455	54718,08	-15,645
14	-40349,91	-8,318	-6147,11	-0,274	46497,02	-11,186
15	-42426,41	-9,646	7175,11	-0,380	35251,30	-6,351
16	-40349,91	-9,169	18363,05	-2,067	21986,86	-2,539
17	-34323,68	-7,136	26410,53	-3,768	7913,15	-0,428
18	-24937,62	-4,223	30613,25	-4,938	-5675,63	-0,338
19	-13110,48	-1,434	30638,05	-4,960	-17527,57	-2,321
20	0,00	0,001	26555,92	-3,788	-26555,92	-4,574

Obr. 10-21 Momenty pôsobiace na RSM v závislosti na čase - 30 kA





Obr. 10-22 Síly pôsobiace v osi z na jednotlivé fázy v závislosti na čase - 30 kA

Tabuľka 26 F_z - Sily pôsobiace v osi z na RSM v jednotlivých fázach - 30 kA

Čas	Fáza 1		Fáza 2		Fáza 3	
	Sila	Sila	Sila	Sila	Sila	Sila
t [ms]	F_{z_L1} [N]	F_{z_L1} ZS a PS [N]	F_{z_L2} [N]	F_{z_L2} ZS a PS [N]	F_{z_L3} [N]	F_{z_L3} ZS a PS [N]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	14,50	19,04	-18,27	-23,09	2,53	2,26
2	78,34	98,08	-88,20	-109,17	11,61	10,88
3	180,99	217,84	-202,48	-240,28	19,86	20,02
4	290,00	342,48	-312,58	-357,67	11,72	11,43
5	370,66	430,39	-354,89	-394,69	-29,46	-32,66
6	391,36	448,70	-275,42	-294,76	-120,27	-137,02
7	340,62	387,63	-80,75	-66,07	-259,95	-298,12
8	231,70	262,53	184,07	237,46	-413,58	-475,99
9	102,25	114,39	446,21	536,49	-536,39	-623,24
10	-0,01	0,05	618,36	733,45	-593,16	-700,25
11	-57,54	-59,41	646,15	765,27	-564,43	-678,30
12	-69,38	-65,75	532,94	635,91	-460,02	-563,15
13	-26,59	-10,41	323,12	385,36	-307,44	-389,56
14	55,32	81,60	92,41	102,06	-148,36	-201,87
15	132,57	169,60	-95,43	-106,21	-32,62	-57,62
16	184,30	224,16	-200,64	-240,37	24,73	18,45
17	183,53	220,69	-204,84	-242,58	19,25	19,54
18	130,07	155,71	-118,45	-134,15	-19,57	-22,49
19	53,09	62,92	27,59	38,55	-78,33	-95,09
20	0,02	0,03	133,47	166,77	-128,01	-157,71

Tabuľka 27 F_u - Úžinové sily pôsobiace v kontaktných stykoch - 30 kA

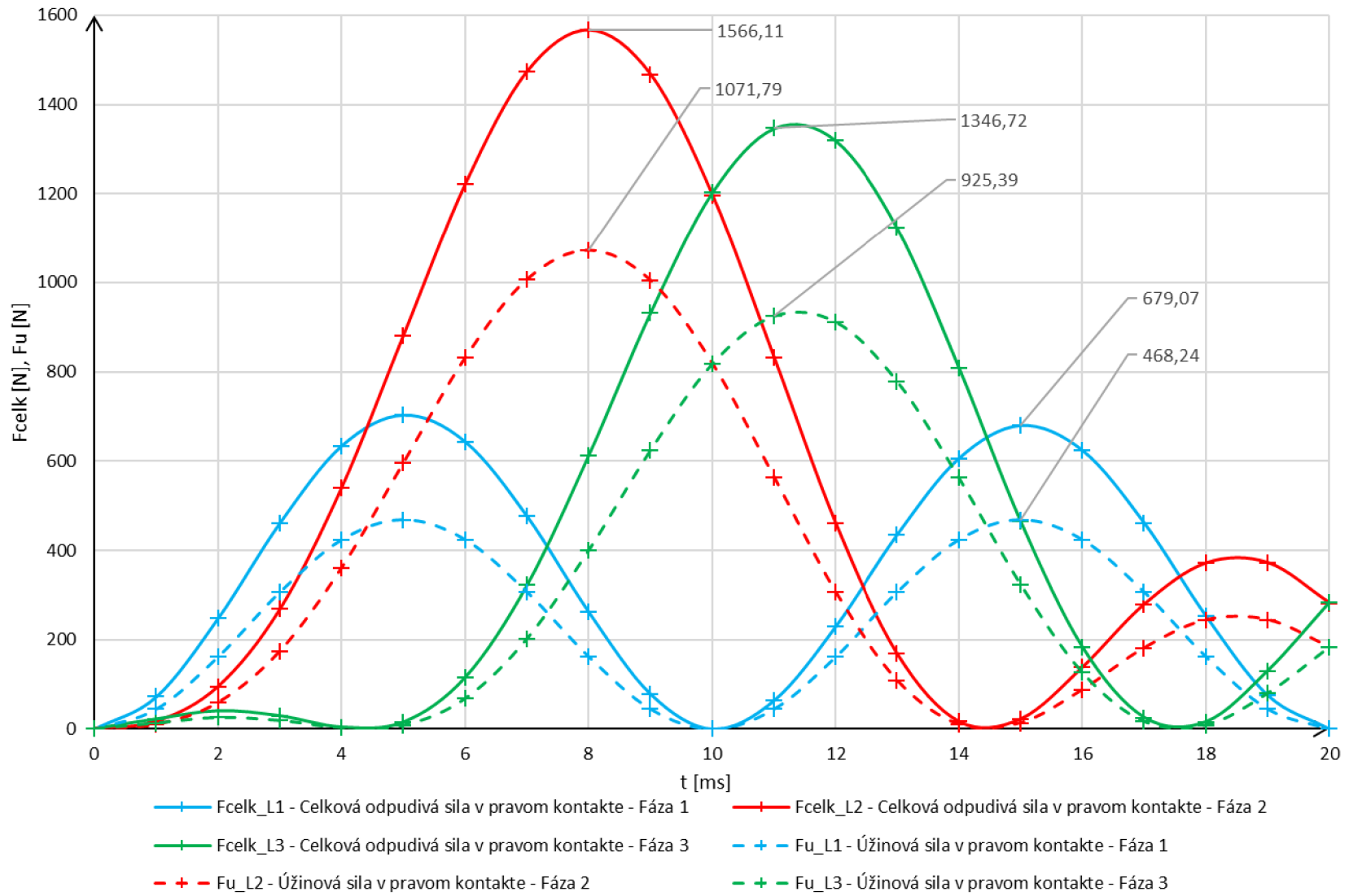
Čas	Fáza 1		Fáza 2		Fáza 3	
	Sila	Sila	Sila	Sila	Sila	Sila
t [ms]	F_{u_L1} [N]	F_{u_L1} ZS a PS [N]	F_{u_L2} [N]	F_{u_L2} ZS a PS [N]	F_{u_L3} [N]	F_{u_L3} ZS a PS [N]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	44,71	44,71	9,59	9,59	12,89	12,89
2	161,77	161,77	59,02	59,02	25,37	25,37
3	306,47	306,47	174,18	174,18	18,56	18,56
4	423,53	423,53	360,92	360,92	2,50	2,50
5	468,24	468,24	596,22	596,22	7,72	7,72
6	423,53	423,53	831,41	831,41	68,13	68,13
7	306,47	306,47	1006,74	1006,74	202,29	202,29
8	161,77	161,77	1071,79	1071,79	400,77	400,77
9	44,71	44,71	1004,06	1004,06	625,01	625,01

Čas	Fáza 1		Fáza 2		Fáza 3	
	Sila	Sila	Sila	Sila	Sila	Sila
t [ms]	Fu_L1 [N]	Fu_L1 ZS a PS [N]	Fu_L2 [N]	Fu_L2 ZS a PS [N]	Fu_L3 [N]	Fu_L3 ZS a PS [N]
10	0,00	0,00	818,36	818,36	818,36	818,36
11	44,71	44,71	563,28	563,28	925,39	925,39
12	161,77	161,77	305,57	305,57	912,02	912,02
13	306,47	306,47	108,20	108,20	778,86	778,86
14	423,53	423,53	9,83	9,83	562,41	562,41
15	468,24	468,24	13,39	13,39	323,26	323,26
16	423,53	423,53	87,72	87,72	125,76	125,76
17	306,47	306,47	181,45	181,45	16,29	16,29
18	161,77	161,77	243,79	243,79	8,38	8,38
19	44,71	44,71	244,19	244,19	79,92	79,92
20	0,00	0,00	183,45	183,45	183,45	183,45

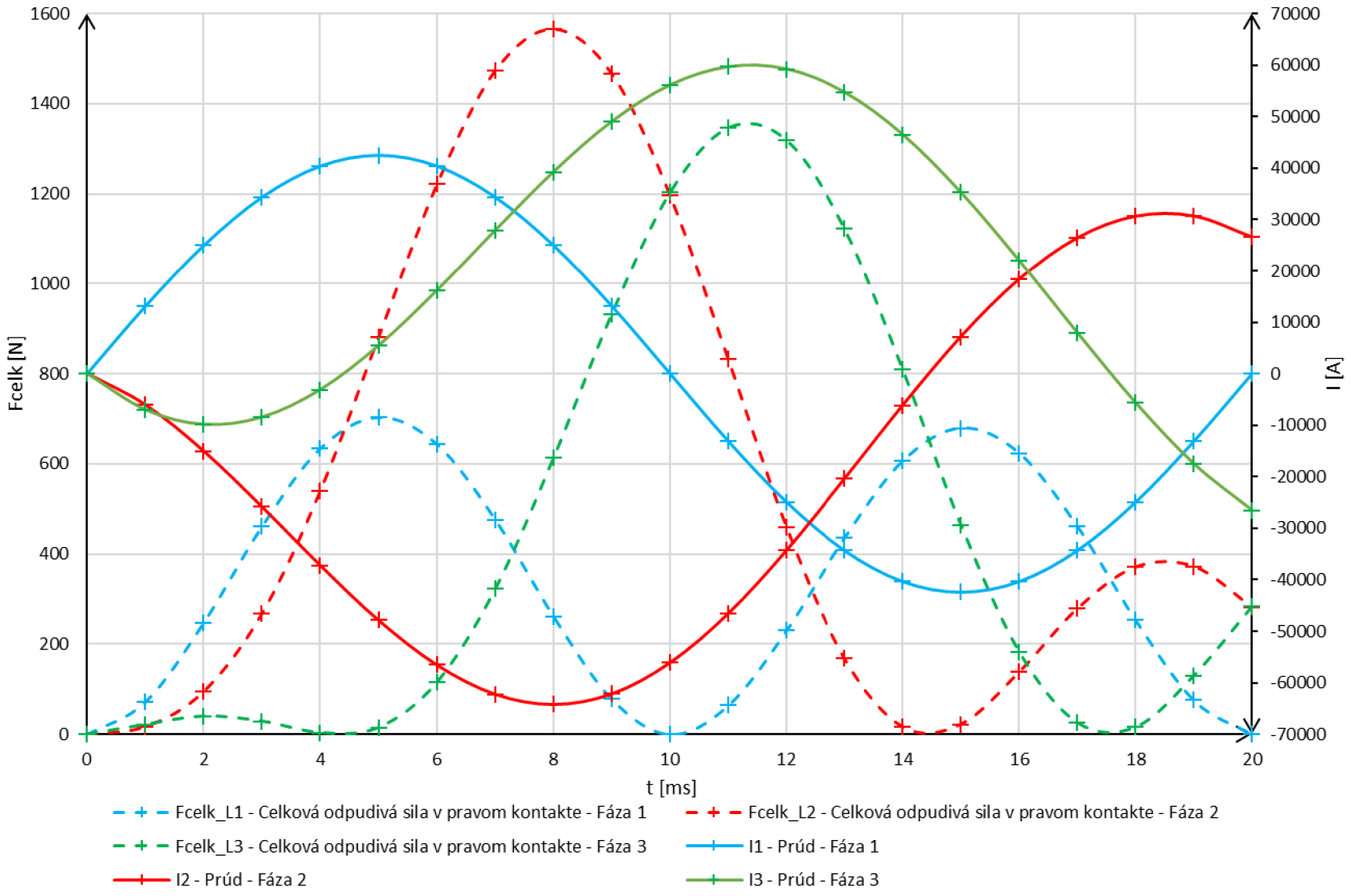
Tabuľka 28 F_{celk} - Výsledné odporivé sily - 30 kA

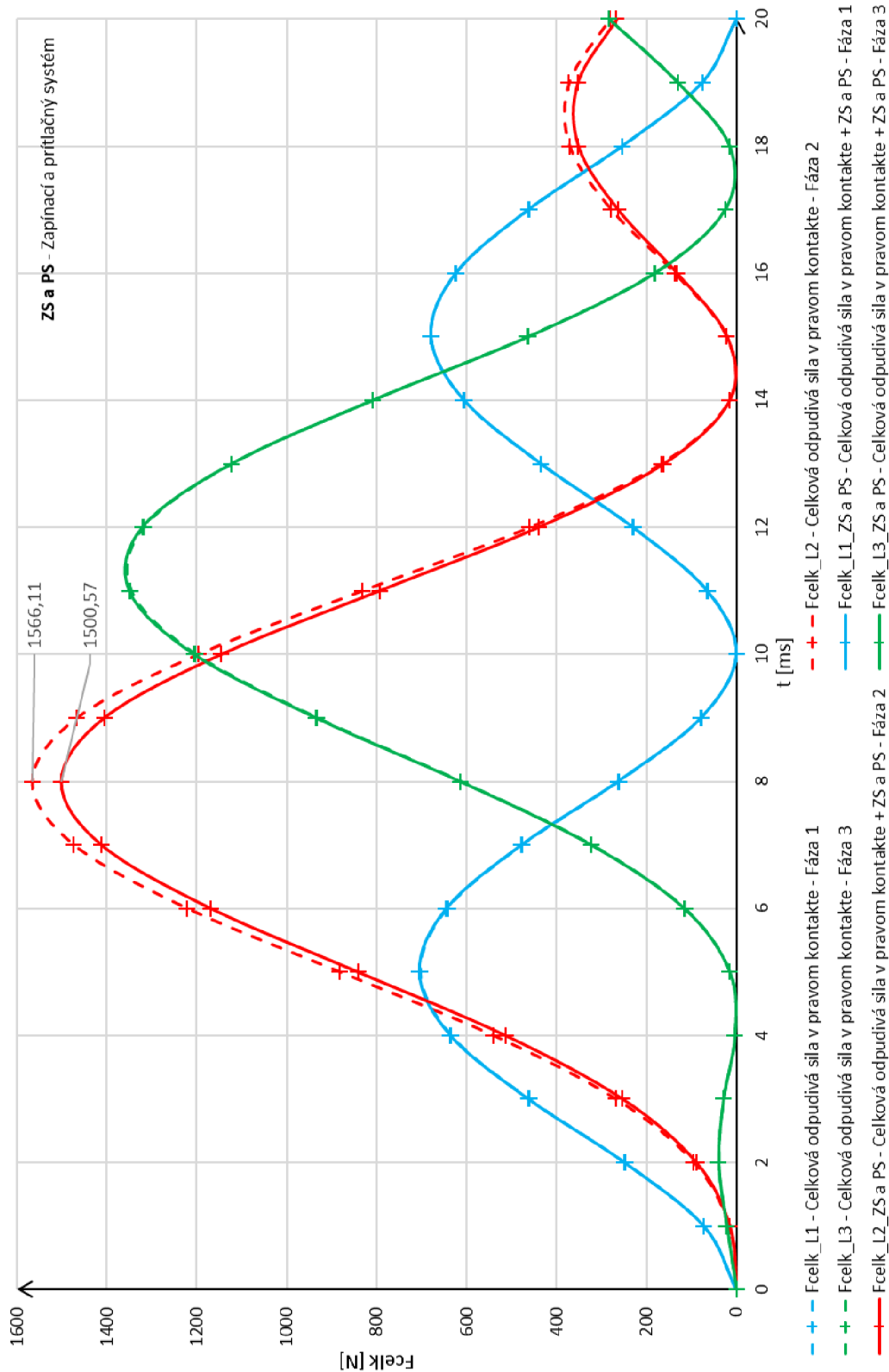
Čas	Fáza 1		Fáza 2		Fáza 3	
	Sila	Sila	Sila	Sila	Sila	Sila
t [ms]	Fcelk_L1 [N]	Fcelk_L1 ZS a PS [N]	Fcelk_L2 [N]	Fcelk_L2 ZS a PS [N]	Fcelk_L3 [N]	Fcelk_L3 ZS a PS [N]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	72,31	72,31	16,63	15,76	21,74	21,66
2	247,90	248,88	94,96	89,98	40,11	40,09
3	460,97	463,08	268,24	254,06	28,81	29,18
4	633,61	636,69	540,57	514,09	3,50	3,80
5	702,45	706,03	881,54	841,75	14,91	15,28
6	642,67	646,07	1221,14	1168,48	115,28	116,52
7	476,14	478,86	1473,51	1411,45	322,00	323,75
8	261,75	263,84	1566,11	1500,57	612,98	615,05
9	78,17	79,17	1466,97	1404,94	932,30	935,02
10	0,00	0,05	1197,03	1145,13	1202,69	1205,67
11	63,96	65,12	831,86	793,83	1346,72	1349,70
12	229,83	230,30	459,76	440,64	1319,04	1320,65
13	434,93	434,89	167,82	162,17	1122,71	1122,67
14	605,75	606,31	16,14	15,86	809,45	808,21
15	679,07	680,24	21,97	21,75	464,71	462,82
16	623,51	625,09	137,94	133,16	182,87	181,55
17	461,25	463,39	278,99	264,26	25,35	25,72
18	253,14	254,68	371,24	352,31	15,63	15,84
19	75,56	76,29	372,23	353,19	130,26	131,01
20	0,00	0,02	282,02	266,71	283,61	284,06

Obr. 10-23 Celkové odpudivé síly F_{celk} a úžinové síly F_u v závislosti na čase - 30 kA

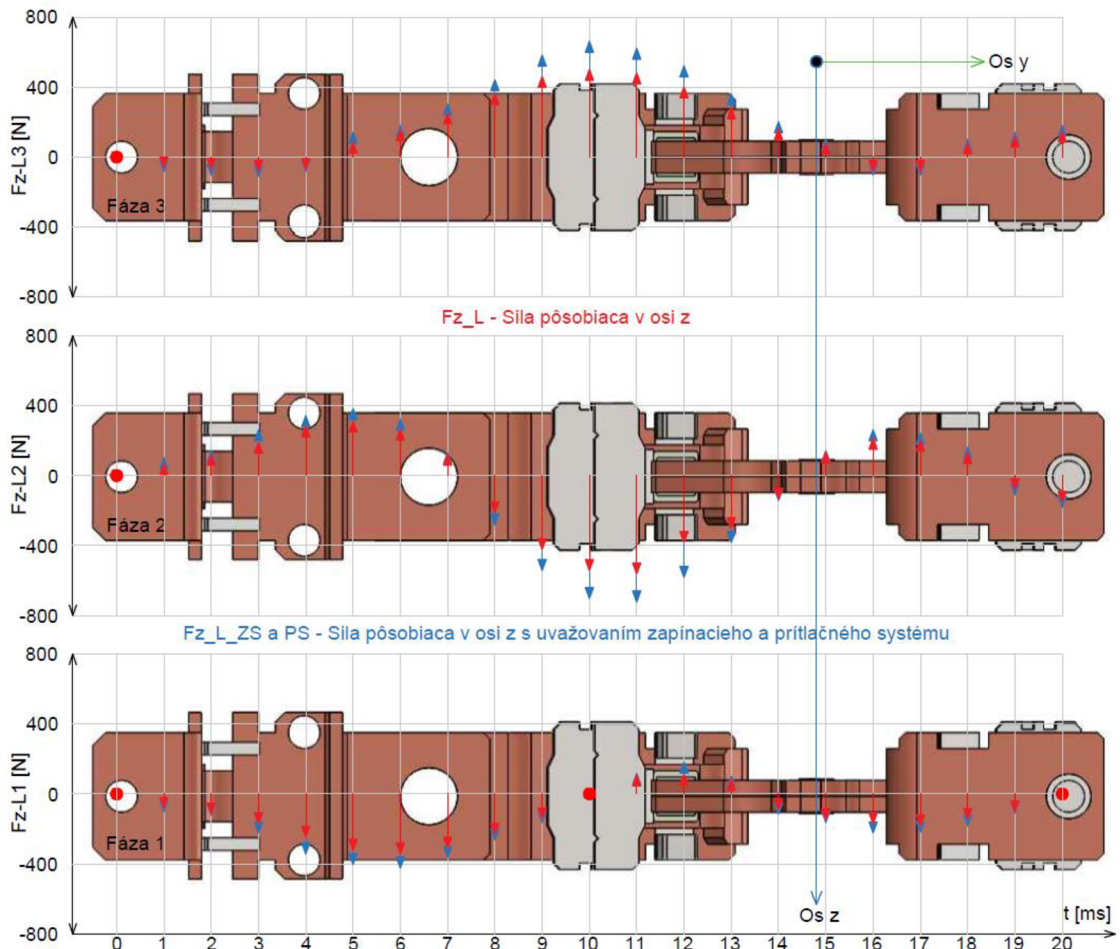


Obr. 10-24 Celkové odpudivé sily F_{celk} a priebehy prúdov I v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 30 kA





Obr. 10-25 Celkové odpudivé sily F_{celk} / F_{celk_ZS} a PS v jednotlivých fázach v závislosti na čase - 30 kA



Obr. 10-26 Grafické znázornenie vzájomného silového pôsobenia fáz v osi z - 30 kA

10.5 Výsledky z Tranzientnej analýzy

V tejto podkapitole sa budeme zaoberať grafickým znázornením výsledkov z tranzientnej analýzy, pomocou ktorej sme získali hodnoty momentov a síl pôsobiacich na prúdovodné dráhy ističa Siemens 3VA5. Výsledky sú vynesené do 4 grafov:

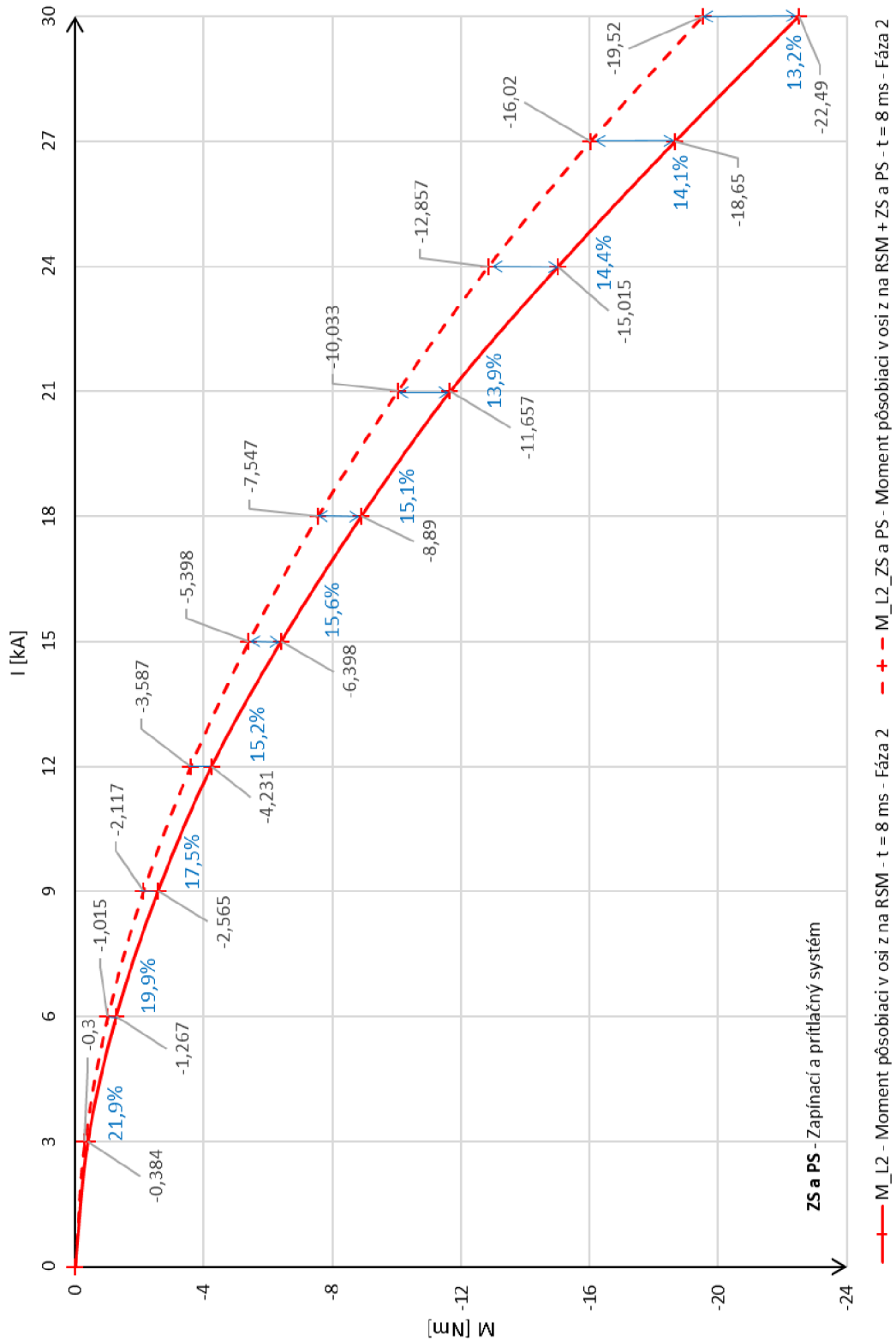
V prvom grafe, ktorý je znázornený na Obr. 10-27, sú znázornené percentuálne rozdiely medzi momentom, ktorý bol nameraný na modeli č.1 (bez ZS a PS) a momentom, ktorý bol nameraný na modeli č.2 (s ZS a PS) vo Fáze 2 v čase $t = 8$ ms v rozsahu prúdov 3 -30 kA.

V druhom grafe, ktorý je znázornený na Obr. 10-28, sú znázornené percentuálne rozdiely medzi celkovou odpudivou silou v pravom kontakte F_{celk} , ktorá bola nameraná na modeli č.1 (bez ZS a PS) a celkovou odpudivou silou v pravom kontakte $F_{\text{celk_ZS a PS}}$, ktorá bola nameraná na modeli č.2 (s ZS a PS) vo Fáze 2 v čase $t = 8$ ms v rozsahu prúdov 3 -30 kA.

V treťom grafe, ktorý je znázornený na Obr. 10-29, sú znázornené percentuálne rozdiely medzi celkovou odpudivou silou v pravom kontakte F_{celk} a úžinovou silou v pravom kontakte F_u . Obidve sily boli vypočítané z momentu, ktorý bol nameraný na modeli č.2 (s ZS a PS) vo Fáze 2 v čase $t = 8$ ms v rozsahu prúdov 3 -30 kA.

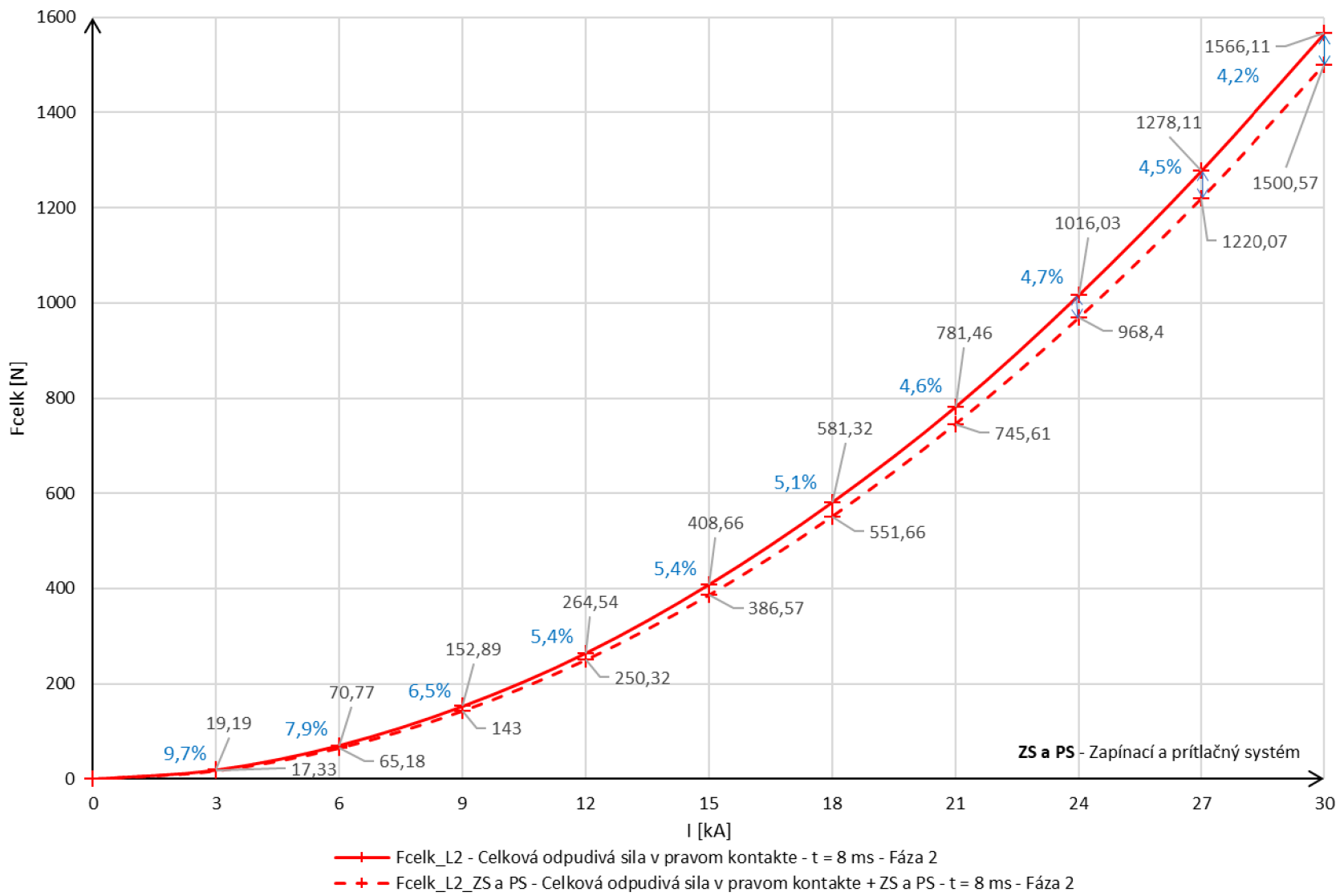
Vo štvrtom grafe, ktorý je znázornený na Obr. 10-30, sú znázornené percentuálne rozdiely medzi silami pôsobiacimi v osi z F_z , ktoré boli namerané na modeli č.1

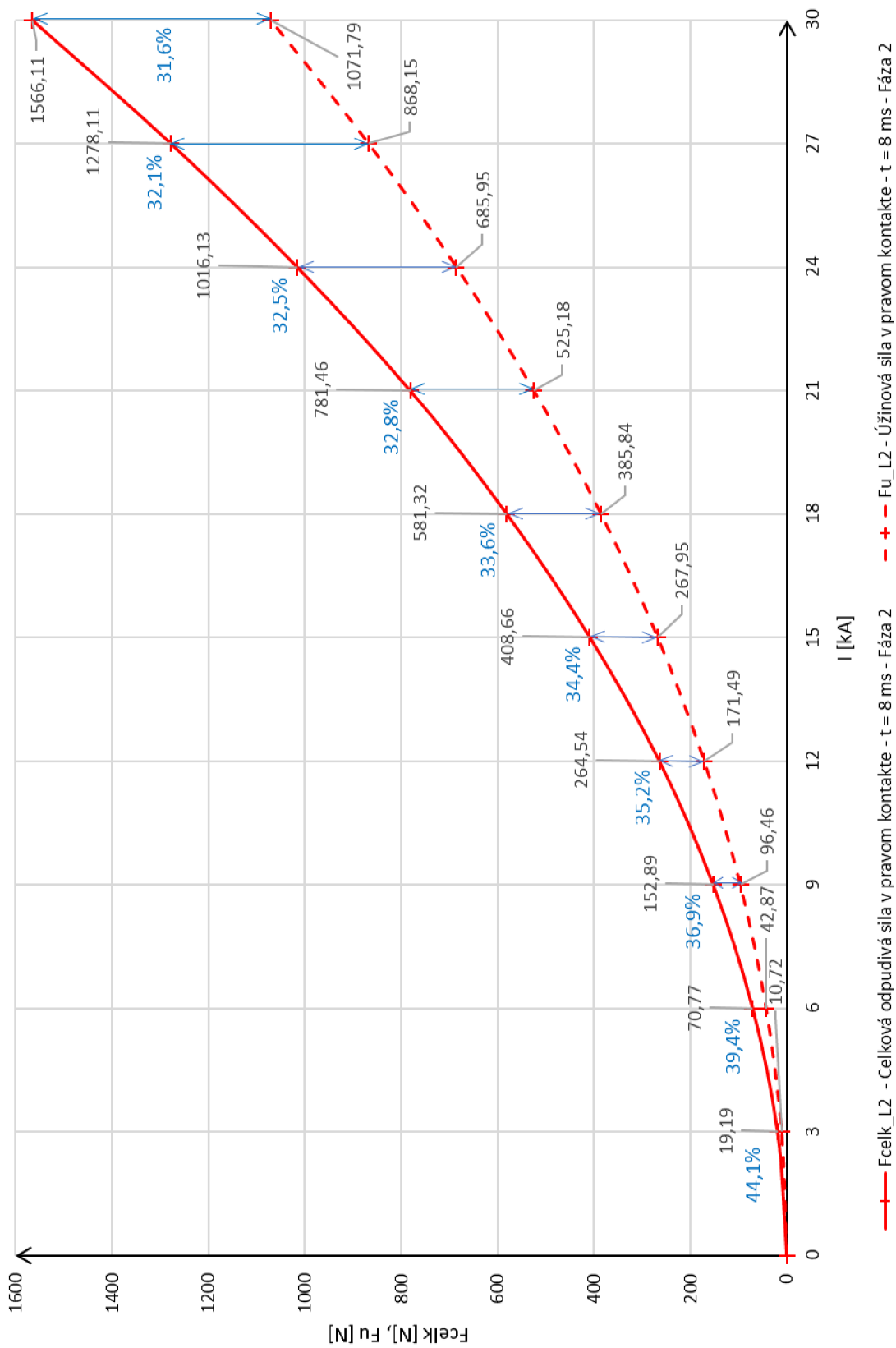
(bez ZS a PS) a silami pôsobiacimi v osi z F_z ZS a PS, ktoré boli namerané na modeli č.2 (s ZS a PS) v čase $t = 11$ ms v rozsahu prúdov 3 -30 kA.



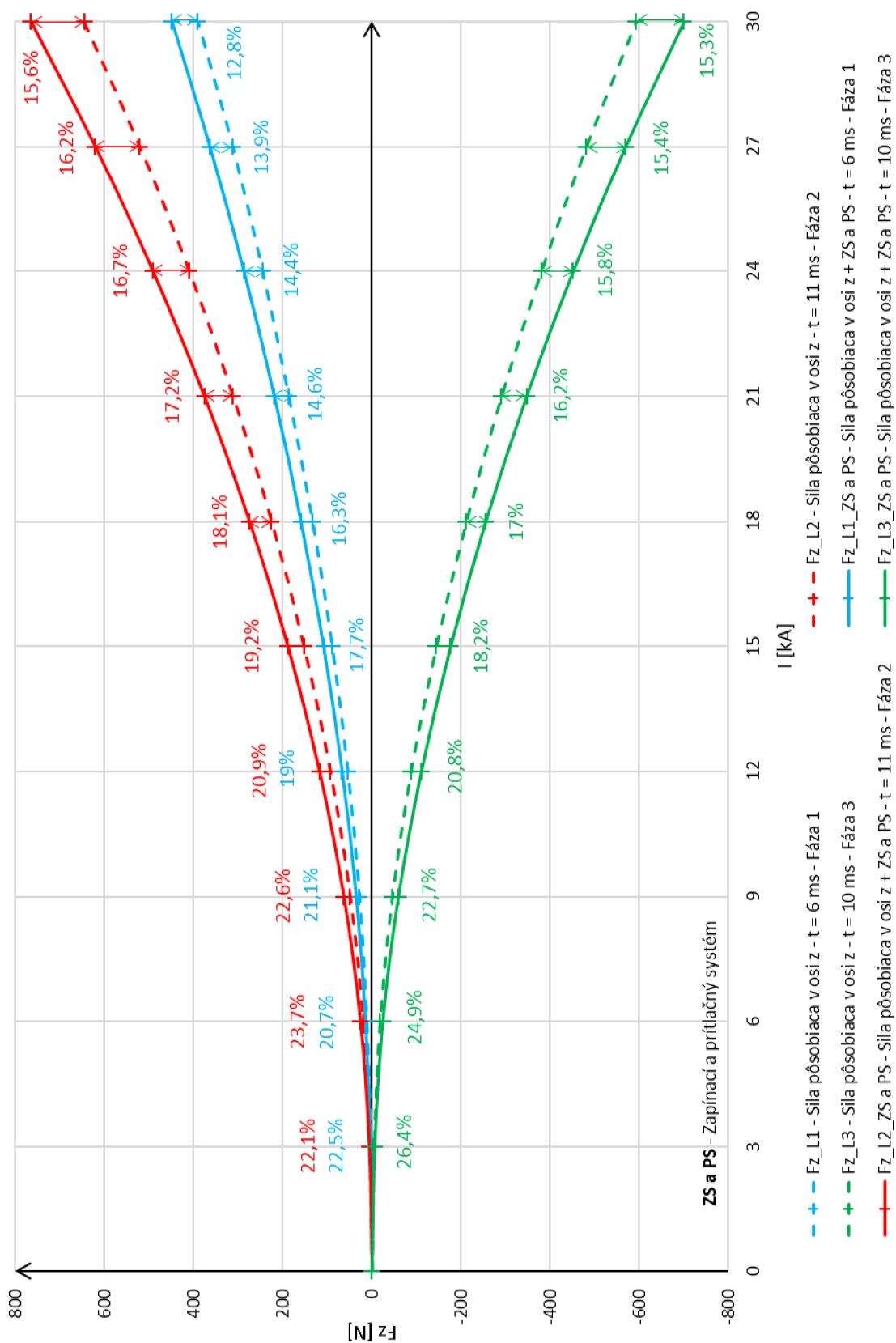
Obr. 10-27 Závislosť momentov na prúde v rozsahu - 3 -30 kA (percentuálny rozdiel)

Obr. 10-28 Závislosť celkových odpudivých síl na prúde v rozsahu 3 - 30 kA
(percentálny rozdiel)





Obr. 10-29 Závislosť celkových odpudivých síl F_{celk} a užínových síl F_u na prúde v rozsahu 3 - 30 kA (percentuálny rozdiel)



Obr. 10-30 Závislosť síl pôsobiacich v osi z F_z na prúde v rozsahu 3 - 30 kA (percentuálny rozdiel)

10.6 Zhodnotenie výsledkov

V tejto kapitole sme sa zaoberali dynamickým výpočtom momentov a vzájomným silovým pôsobením v osi z medzi jednotlivými fázami v čase 0 -20 ms, čo predstavuje jednu periódu pri frekvencii siete 50 Hz. Jednotlivé simulácie a následné výpočty boli urobené pre striedavé skratové prúdy v rozsahu 3 – 30 kA. Cieľom tejto kapitoly bolo zmerať hodnoty momentov a síl pôsobiacich v osi z, ktoré sa menia v čase a následne ich porovnať so situáciou, keď je do modelu zaradený zapínací systém.

V 1. prípade sa jednalo o 3f model, ktorý obsahuje zhášacie komory a U-závity vložené do obidvoch prúporcov. Výsledné momenty pôsobiace na rotačné spínacie mostíky pri prechode striedavého skratového prúdu o hodnote $I_{ef} = 30$ kA nadobudli svoje maximálne hodnoty: Fáza 1 je v čase $t = 5$ ms - $M_{L1} = -10,652$ Nm, Fáza 2 je v čase $t = 8$ ms - $M_{L2} = -22,49$ Nm a Fáza 3 je v čase $t = 11$ ms - $M_{L3} = -19,17$ Nm. Tieto namerané momenty sú vynesené do grafickej závislosti na Obr. 10-21. Následne sa z nameraných momentov vypočítali hodnoty úžinových síl F_u a hodnoty výsledných odpudivých síl v kontaktoch F_{celk} , ktoré sú vynesené do grafickej závislosti na Obr. 10-23. Hodnota celkovej odpudivej sily vo Fáze 1 je v čase $t = 15$ ms a má hodnotu $F_{celk_L1} = 679,07$ N. Z tejto celkovej odpudivej sily tvorí úžinová sila $F_u = 468,24$ N približne 69%. Hodnota celkovej odpudivej sily vo Fáze 2 je v čase $t = 8$ ms a má hodnotu $F_{celk_L2} = 1566,11$ N. Z tejto celkovej odpudivej sily tvorí úžinová sila $F_u = 1071,79$ N približne 68%. Hodnota celkovej odpudivej sily vo Fáze 3 je v čase $t = 11$ ms a má hodnotu $F_{celk_L2} = 1346,72$ N. Z tejto celkovej odpudivej sily tvorí úžinová sila $F_u = 925,39$ N približne 69%. A nakoniec sa zmerali jednotlivé sily pôsobiace v osi z na jednotlivé rotačné spínacie mostíky. Hodnoty týchto síl sú vynesené v grafickej závislosti na Obr. 10-22. Maximálna sila pôsobiaca na rotačný spínací mostík vo Fáze 1 je v čase $t = 6$ ms a má hodnotu $F_{z_L1} = 391,36$ N. Maximálna sila pôsobiaca na rotačný spínací mostík vo Fáze 2 je v čase $t = 11$ ms a má hodnotu $F_{z_L2} = 646,15$ N. A maximálna sila pôsobiaca na rotačný spínací mostík vo Fáze 3 je v čase $t = 10$ ms a má hodnotu $F_{z_L3} = -593,16$ N.

V 2. prípade sa jednalo o 3f model, do ktorého sa doplnili feromagnetické prvky prítlačného a zapínacieho systému. Výsledné momenty pôsobiace na rotačné spínacie mostíky pri prechode striedavého skratového prúdu o hodnote $I_{ef} = 30$ kA nadobudli svoje maximálne hodnoty: Fáza 1 je v čase $t = 5$ ms - $M_{L1} = -10,814$ Nm čo je oproti 1. prípadu nárast momentu o 0,162 Nm (1,52%), Fáza 2 je v čase $t = 8$ ms - $M_{L2} = -19,52$ Nm čo je oproti 1. prípadu pokles momentu o 2,97 Nm (15,21%) a Fáza 3 je v čase $t = 11$ ms - $M_{L3} = -19,305$ Nm čo je oproti 1. prípadu nárast momentu o 0,135 Nm (0,7%). Tieto namerané momenty sú vynesené do grafickej závislosti na Obr. 10-21. Následne sa z nameraných momentov vypočítali hodnoty úžinových síl F_u a hodnoty výsledných odpudivých síl v kontaktoch F_{celk} , ktoré sú vynesené do grafickej závislosti na Obr. 10-23. Hodnota celkovej odpudivej sily vo Fáze 1 je v čase $t = 15$ ms a má hodnotu $F_{celk_L1} = 680,24$ N. Z tejto celkovej odpudivej sily tvorí úžinová sila $F_u = 468,24$ N približne 69%. Hodnota celkovej odpudivej sily vo Fáze 2 je v čase $t = 8$ ms a má hodnotu $F_{celk_L2} = 1500,57$ N. Z tejto celkovej odpudivej sily tvorí úžinová sila $F_u = 1071,79$ N približne 72%. Hodnota celkovej odpudivej sily vo Fáze 3 je v čase $t = 11$ ms a má hodnotu $F_{celk_L2} = 1349,7$ N. Z tejto celkovej odpudivej sily tvorí úžinová sila $F_u = 925,39$ N približne 69%. A nakoniec sa zmerali jednotlivé sily pôsobiace v osi z na jednotlivé rotačné spínacie mostíky. Hodnoty týchto síl sú vynesené v grafickej závislosti na Obr. 10-22. Maximálna sila pôsobiaca na rotačný spínací mostík vo Fáze 1 je v čase

$t = 6$ ms a má hodnotu $F_{z_L1_ZS a PS} = 448,7$ N čo je nárast oproti 1. prípadu o 57,34 N (14,65%). Maximálna sila pôsobiaca na rotačný spínací mostík vo Fáze 2 je v čase $t = 11$ ms a má hodnotu $F_{z_L2_ZS a PS} = 765,27$ N čo je nárast oproti 1. prípadu o 119,12 N (18,43%). A maximálna sila pôsobiaca na rotačný spínací mostík vo Fáze 3 je v čase $t = 10$ ms a má hodnotu $F_{z_L3_ZS a PS} = 700,25$ N čo je nárast oproti 1. prípadu o 107,09 N (18,05%). Na Obr. 10-26 sú graficky znázornené sily pôsobiace v osi z medzi jednotlivými rotačnými spínacími mostíkmi v čase 0 – 20 ms.

Podľa výsledkov z tejto kapitoly je zrejmé, že zapínací systém spôsobí pokles momentu výraznejšie len vo Fáze 2, ako je vidieť na Obr. 10-21, ale na druhú stranu výrazne vplýva na vzájomné silové pôsobenie medzi rotačnými spínacími mostíkmi v jednotlivých fázach.

Na Obr. 10-27 – 10-30 sú znázornené grafické závislosti, ktoré znázorňujú percentuálne rozdiely medzi nameranými veličinami v 1. a 2. prípade.

11 ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo zoznámiť sa konštrukciou a funkciami jednotlivých konštrukčných prvkov ističa Siemens 3VA5 250A od firmy OEZ Letohrad, spracovať teoretický rozbor na tému pôsobenia dynamických síl v ističi, vytvoriť zjednodušený 3D geometrický model vhodný pre numerický výpočet síl v simulačnom programe ANSYS MAXWELL, urobiť simulácie pôsobenia elektrodynamických síl pre zadané stavy a nakoniec získané výsledky zanalyzovať. Táto diplomová práca je rozdelená do 10 hlavných kapitol.

V prvej a druhej kapitole je zhrnutá tória, ktorá sa zaoberá elektrodynamickými silami, ich vznikom a následným pôsobením pre rôzne prípady.

Tretia kapitola sa zaoberá zadaným ističom Siemens 3VA5 250A od firmy OEZ Letohrad. V tejto kapitole sú popísané jeho parametre a konštrukčné časti z ktorých sa skladá a ako tieto jednotlivé časti na seba navzájom pôsobia.

V štvrtej kapitole je stručne popísaná tória Metódy konečných prvkov.

Piata kapitola popisuje vytvorenie modelu prúdovodnej dráhy ističa. Tento 3D geometrický model je vymodelovaný v programe Solidworks. Aby bolo možné daný model vytvoriť, bolo potrebné v prvom rade urobiť demontážou samotného ističa, aby bolo možné získať geometrické rozmery jednotlivých častí prúdovodnej dráhy. Pri vytváraní 3D geometrického modelu bolo potrebné dodržiavať presné rozmery jednotlivých dielov a navzájom ich previazať väzbami.

Šiesta kapitola popisuje stacionárny výpočet v programe ANSYS MAXWELL. Pre tento výpočet bola zvolená Magnetostatická analýza. V tejto kapitole je popísané celkové nastavenie simulácie od importu geometrie prúdovodnej dráhy až po celkový výpočet výslednej odpudivej sily F_{celk} . Výsledná odpudivá sila v pravom kontakte pri prechode prúdu 30 kA má hodnotu $F_{\text{celk}_P} = 658,52\text{N}$. Výsledná odpudivá sila v pravom kontakte je totožná s výslednou odpudivou silou v ľavom kontakte. Výsledky z tejto kapitoly sú detailne popísané v podkapitole 6.7.

Siedma kapitola popisuje stacionárny výpočet síl s uvažovaním vplyvu blízkych feromagnetických materiálov v blízkosti prúdovodnej dráhy a kontaktných stykov. Tento výpočet bol urobený pre 5 rôznych prípadov pri prechode skratového prúdu v rozsahu 2 – 30 kA. Hodnota celkovej odpudivej sily pri prechode prúdu o veľkosti 30 kA pre 1. prípad (bez feromagnetických prvkov) je rovná 575,14 N. Podľa výsledkov z tejto kapitoly je možné povedať, že na výslednú odpudivú silu F_{celk} najviac vplyva prípad 4. (celkový U-závit) Pre 4. prípad je hodnota celkovej odpudivej sily pri prechode prúdu o veľkosti 30 kA rovná 588,37 N čo je oproti 1. prípadu nárast odpudivej sily o 13,23 N (2,3%). Podľa tohto výsledku je možné povedať, že blízke feromagnetikum má na výslednú odpudivú silu veľmi malý vplyv. Výsledky z tejto kapitoly sú detailne popísané v podkapitole 7.6.

Osma kapitola je rozdelená na dve časti. Prvá časť sa zaoberá simulovaním vypínania skratového prúdu v rozsahu 2 – 30 kA. Cieľom tejto prvej časti bolo zistiť do akej miery ovplyvnia feromagnetické prvky v blízkosti prúdovodnej dráhy moment a sily vťahujúce elektrické oblúky do zhášacích komôr. Simulácie boli urobené pre 5 rôznych prípadov. V 1. prípade, kedy sa v okolí prúdovodnej dráhy a kontaktných stykov nenachádzajú žiadne feromagnetické prvky majú sily vťahujúce elektrické oblúky do zhášacích komôr pri 30 kA veľkosť $F_{\text{obl}_MP} = 121,88\text{N}$ a $F_{\text{obl}_VP} = -110,78\text{N}$. Podľa výsledkov z tejto kapitoly je možné povedať, že na sily vťahujúce elektrické oblúky do zhášacích komôr

najviac vplyvajú prípady 4 a 5. V 4. prípade boli do modelu pridané U-závity. Tieto U-závity spôsobili nárast sily v prípade F_{obl_MP} o 10,86 N (8,91%) a v prípade F_{obl_VP} o 9,28 N (8,37%) oproti 1. prípadu. V 5. prípade bol do modelu pridaný zapínací systém, ktorý sa nachádza nad Fázou č.2. Tento zapínací systém spôsobil pokles sily v prípade F_{obl_MP} o 7,28 N (6,35%) a nárast v prípade F_{obl_VP} o 9,74 N (8,79%) oproti 1. prípadu. Podľa týchto výsledkov je možné povedať, že U-závity, ktoré sa nachádzajú v tesnej blízkosti kontaktných stykov napomáhajú dosť výrazne pri vyťahovaní elektrických oblúkov z medzikontaktných priestorov. Na druhú stranu prítomnosť zapínacieho systému spôsobí zhoršenie sily vyťahujúcej oblúk z medzikontaktného priestoru malého práporca. Je to spôsobené tým, že sa zapínací systém veľkou časťou nachádza nad malým práporcom.

Druhá časť tejto kapitoly sa zaoberala vplyvom prítomnosti zhasiacich komôr na sily, ktoré vytláčajú elektrické oblúky z medzikontaktného priestoru. V 1. prípade, kedy sa v okolí prúdovodnej dráhy nenachádzali žiadne feromagnetické prvky a ani zhasiace komory mali sily vytláčajúce elektrické oblúky z medzikontaktného priestoru pri 30 kA hodnoty $F_{obl_MP} = 102,73$ N a $F_{obl_VP} = -94,85$ N. V 3. prípade boli do modelu doplnené zhasiace komory, U-závity a zapínací systém. V tomto prípade nastal nárast síl v prípade F_{obl_MP} o 11,88 N (11,56%) a v prípade F_{obl_VP} o 25,66 N (27,05%) oproti 1. prípadu. Podľa týchto výsledkov je možné povedať, že zhasiace komory v kombinácii s U-závitmi sú veľmi dôležité, pretože zlepšujú ťažnú silu a tým pádom skracujú dobu horenia oblúku v medzikontaktnom priestore. Výsledky sú detailne popísané v podkapitole 8.3 .

Deviata kapitola popisuje statický výpočet momentov na 3f modely pri prechode nesymetrického striedavého skratového prúdu v rozsahu 2 – 30 kA. Tento výpočet bol urobený pre dva prípady. Podľa výsledkov z tejto kapitoly je možné povedať, že prítomnosť zapínacieho systému spôsobí výraznejší pokles momentu len vo Fáze č. 2 približne (2,42%) oproti 1. prípadu. Detailné výsledky sú uvedené v podkapitole 9.3 .

Desiata kapitola sa zaoberá dynamickým výpočtom momentov a vzájomným silovým pôsobením v osi z medzi rotačnými mostíkmi v čase 0 – 20 ms. Tento výpočet bol urobený pre dva prípady. V 1. prípade bol výpočet urobený na modely bez zapínacieho a prítlačného systému. Výsledné momenty pôsobiace na rotačné spínacie mostíky pri prechode striedavého skratového prúdu o hodnote $I_{ef} = 30$ kA nadobudli svoje maximálne hodnoty: Fáza 1 je v čase $t = 5$ ms - $M_{L1} = -10,652$ Nm, Fáza 2 je v čas $t = 8$ ms - $M_{L2} = -22,49$ Nm a Fáza 3 je v čase $t = 11$ ms - $M_{L3} = -19,17$ Nm. Tieto namerané momenty sú vynesené do grafickej závislosti na Obr. 10-21. Následne boli zmerané jednotlivé sily pôsobiace v osi z na jednotlivé rotačné spínacie mostíky. Hodnoty týchto síl sú vynesené v grafickej závislosti na Obr. 10-22. Maximálna sila pôsobiaca na rotačný spínací mostík vo Fáze 1 je v čase $t = 6$ ms a má hodnotu $F_{z_L1} = 391,36$ N. Maximálna sila pôsobiaca na rotačný spínací mostík vo Fáze 2 je v čase $t = 11$ ms a má hodnotu $F_{z_L2} = 646,15$ N. A maximálna sila pôsobiaca na rotačný spínací mostík vo Fáze 3 je v čase $t = 10$ ms a má hodnotu $F_{z_L3} = -593,16$ N. V 2. prípade bol do modelu doplnený zapínací a prítlačný systém. Tento zapínací a prítlačný systém spôsobil výraznejší nárast momentu len vo Fáze č. 2 o 2,97 Nm (15,21%). Tieto dva systémy majú oveľa výraznejší vplyv na vzájomné silové pôsobenie medzi jednotlivými fázami. V 2. prípade sa F_{z_L1} zvýšila o 57,34 N (14,65%), F_{z_L2} o 119,12 N (18,43%) a F_{z_L3} o 107,09 N (18,05%). Výsledky sú detailne popísané v podkapitole 10.6. Od hodnoty prúdu $I_{ef} = 25$ kA sú hodnoty namerané a vypočítané iba teoretickými hodnotami z dôvodu schopnosti ističa obmedziť maximálnu veľkosť skratového prúdu tak, že zahájí vypínací proces na začiatku prvej polperiódy. Teda omnoho skôr ako by stihla zareagovať nadprúdová spúšť alebo vypínací mechanizmus.

12 PRÍLOHY

Prílohy A – I obsahujú tabuľky a grafické závislosti z kapitoly 10 pre hodnoty striedavých prúdov v rozsahu 3 – 27 kA. Všetky súbory sú uložené na CD, ktoré sa nachádza na zdanej strane tejto práce. Jednotlivé prílohy obsahujú:

Príloha A – Striedavý prúd 3 kA

- Grafické závislosti
- Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt

Príloha B – Striedavý prúd 6 kA

- Grafické závislosti
- Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt

Príloha C – Striedavý prúd 9 kA

- Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt

Príloha D – Striedavý prúd 12 kA

- Grafické závislosti
- Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt

Príloha E – Striedavý prúd 15 kA

- Grafické závislosti
- Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt

Príloha F – Striedavý prúd 18 kA

- Grafické závislosti
- Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt

Príloha G – Striedavý prúd 21 kA

- Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt

Príloha H – Striedavý prúd 24 kA

- Grafické závislosti
- Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt

Príloha I – Striedavý prúd 27 kA

- Grafické závislosti
- Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt

Literatúra

- [1] MUSIL, Pavel. *Výpočet elektrodynamických sil jističe 1600A* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-10-24]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnndcbldboiebfnladdacbfdmadadm/https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102030. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.
- [2] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje 1*. Brno: SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha 1, Spálená 51, 1973.
- [3] BUŠOV, Bohuslav. *Stavba a výroba elektrických přístrojů: 3. Silové účinky proudu* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-10-24].
- [4] *Diagnostika a jištění elektrických zařízení* [online]. Brno: Ing. Jiří Valenta, Ph.D., 2018 [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/439592/mod_resource/content/5/P%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ka_01-09.pdf
- [5] MLYNÁŘ, Zdeněk. *Elektromagnetická analýza nadproudové spouště jističe*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.
- [6] ZELENKA, Michal. *Kompaktní jistič Siemens 3VA12* [online]. Brno, 2015, , 16 [cit. 2018-11-15].
- [7] *3VA Molded Case Circuit Breakerswith UL Certification* [online]. Regensburg: Siemens, 2016 [cit. 2018-11-15].
- [8] DĚDKOVÁ, Jarmila. *Modelování elektromagnetických polí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4401-0.

Seznam obrázků a symbolů

Zkratky:

<i>MKP</i>	Metóda konečných prvkov
<i>RSM</i>	Rotačný spínací mostík
<i>ZS a PS</i>	Zapínací a prítlačný systém

Symbody:

<i>Symbol</i>	<i>Popis</i>	<i>Jednotka</i>
<i>F</i>	Sila	[N]
<i>q</i>	Náboj	[C]
<i>v</i>	Rýchlosť náboja	[m/s]
<i>B</i>	Magnetická indukcia	[T]
<i>μ</i>	Permeabilita	[H/m]
<i>μ_r</i>	Permeabilita feromagnetika	[H/m]
<i>μ₀</i>	Permeabilita vákua	[H/m]
<i>k_d</i>	Činiteľ usporiadania vodičov	[-]
<i>k_p</i>	Činiteľ tvaru prierezu	[-]
<i>M</i>	Moment	[Nm]
<i>F_u</i>	Odpudivá úžinová sila	[N]
<i>n</i>	Počet úžin v kontaktnom styku	[-]
<i>L</i>	Indukčnosť	[H]
<i>R</i>	Odpor	[Ω]
<i>ω</i>	Uhlová rýchlosť	[rad/s]
<i>φ</i>	Uhol posunu	[°]
<i>I_∞</i>	Ustálená hodnota prúdu v obvode	[A]
<i>τ</i>	Časová konštanta tlmenia prechodnej zložky prúdu	[s]
<i>I_{dyn}</i>	Dynamický skratový prúd	[A]
<i>i(t)</i>	Zapínací prúd	[A]
<i>i'(t)</i>	Ustálená striedavá zložka prúdu	[A]
<i>i''(t)</i>	Prechodná jednosmerná zložka prúdu	[A]
<i>I_n</i>	Menovitý prúd	[A]
<i>U_e</i>	Menovité pracovné napätie	[V]
<i>f_n</i>	Menovitý kmitočet	[Hz]
<i>U_{imp}</i>	Menovité impulzné výdržné napätie	[V]
<i>I_r</i>	Menovitý redukovaný prúd	[A]

<i>Symbol</i>	<i>Popis</i>	<i>Jednotka</i>
I_i	Skratový prúd	[A]
F_x	Sila pôsobiaca v osi x	[N]
F_y	Sila pôsobiaca v osi y	[N]
F_z	Sila pôsobiaca v osi z	[N]
F	Celková vypočítaná sila	[N]
F_{celk}	Výsledná odpudivá sila v kontaktnom styku	[N]
F_{celk_L}	Výsledná odpudivá sila v ľavom kontaktnom styku	[N]
F_{celk_P}	Výsledná odpudivá sila v pravom kontaktnom styku	[N]
F_{obl_MP}	Sila pôsobiaca v osi y na elektrický oblúk medzi kontaktmi malého práporca	[N]
F_{obl_VP}	Sila pôsobiaca v osi y na elektrický oblúk medzi kontaktmi veľkého práporca	[N]