



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

BILANCE ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL PŮSOBÍCÍCH NA KONTAKT ELEKTRICKÉHO PŘÍSTROJE.

ELECTRODYNAMIC FORCES ACTING ON MOVING CONTACT OF ELECTRICAL APPARATUS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Šic

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

BRNO 2016

Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Pavel Šic

ID: 147670

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Bilance elektrodynamických sil působících na kontakt elektrického přístroje.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analyzujte kontaktní systém jističe BC 100.
2. Stanovte výpočtem elektrodynamické síly působící na pohyblivý kontakt.
3. Simulujte elektrodynamické síly v prostředí MAXWELL.
4. Navrhněte výzkumný a vývojový experiment pro stanovení Holmovy síly.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka O. a kol.: Elektrické přístroje, Praha, SNTL/ALFA, 1985.
- [2] Slade P.G.: Electrical Contacts: Principles and Applications , 2. ed (2014), ISBN 978-1439881309
- [3] HOLM, Ragnar. Electric Contacts: Theory and Application. 4. dopl. vyd. Berlin: Springer-Verlag, 1967. ISBN 978-3-540-03875-7.

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

Konzultant diplomové práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Předložená diplomová práce je zaměřena na výpočet, simulaci a experimentální ověření elektrodynamických sil působících na pohyblivý kontakt kompaktního jističe a experimentální proudovodné dráhy. Výsledky z dílčích metod jsou následně porovnány a jsou uvedena.

V první kapitole je stručně pojednáno o jističích nn. V druhé kapitole je analyzován kontaktní systém předloženého kompaktního jističe s termomagnetickou spouští. Stručně je pojednáno o tvrdostech kontaktních materiálů. Ve třetí kapitole jsou analyticky počítány elektrodynamické síly působící na pohyblivý kontakt předloženého jističe. Ve čtvrté kapitole je provedena simulace elektrodynamických sil na totožném jističi v prostředí ANSYS Maxwell pro porovnání s výsledky analytických výpočtů. V páté kapitole je poté navržen a zkonstruován experimentální přípravek pro ověření úžinové, tzv. Holmovy, síly. Na přípravku je následně provedena série měření a výsledky uvedeny do kontextu s předchozími výpočty.

Abstract

This master's thesis is focused on calculation, simulation and experimental verification of electrodynamic forces acting upon movable contact piece of MCCB and experimental current carrying path.

A short description of low voltage circuit breakers is briefly discussed in first chapter. Second chapter is focused upon contact system analysis of particular MCCB with thermomagnetic trigger. A hardness of contact materials is briefly described. A detailed analytical calculations were used to determine electrodynamic forces in MCCB. A FEM simulation in ANSYS Maxwell was carried out for comparison with analytical results. An experimental apparatus was designed and built for verification of constriction repulsion force, so called Holm's force. A series of measurements is subsequently performed on proposed apparatus and results are compared with results from previous chapters.

Klíčová slova

Elektrodynamická síla; odpudivá síla; proudovodná dráha; kompaktní jistič; úžinová síla; Holmův vztah; MKP; ANSYS Maxwell; experimentální měření; kontakty; tvrdost

Keywords

Electrodynamic forces; electrodynamic repulsion; current path; molded case circuit breaker; constriction force; Holm's formula; FEM; ANSYS Maxwell; experimental measurement; contacts; hardness

Bibliografická citace

ŠIC, P. *Bilance elektrodynamických sil působících na kontakt elektrického přístroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 64 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Bilance elektrodynamických sil působících na kontakt elektrického přístroje“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

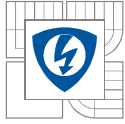
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové Doc. Ing. Bohuslavu Bušovovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Taktéž děkuji Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D., Ing. Davidovi Šimkovi, Ing. Michalovi Zelenkovi a Bc. Matějovi Samohejlovi za velmi cennou pomoc při experimentálním měření ve zkratové laboratoři při FEKT. Děkuji také mým drahým rodičům za trpělivost a podporu po celou dobu mého studia vysoké školy.

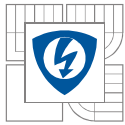
V Brně dne

Podpis autora

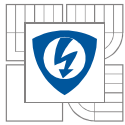


OBSAH

ÚVOD	13
1 JISTIČE	14
1.1 KONTAKTNÍ SYSTÉM.....	15
1.2 SPÍNACÍ SYSTÉM.....	15
1.3 ZHÁŠECÍ SYSTÉM	16
1.4 MALÉ JISTIČE <i>MCB</i>	17
1.5 KOMPAKTNÍ JISTIČE <i>MCCB</i>	18
1.6 VZDUCHOVÉ JISTIČE <i>ACB</i>	18
2 ANALÝZA KONTAKTNÍHO SYSTÉMU JISTIČE BC 160.....	19
2.1 PEVNÝ KONTAKTNÍ DÍLEC	20
2.2 POHYBLIVÝ KONTAKTNÍ DÍLEC	21
2.3 TVRDOST KONTAKTNÍCH MATERIÁLŮ	21
3 ANALYTICKÝ VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL	23
3.1 ROZDĚLENÍ SIL.....	23
3.2 TEORETICKÝ APARÁT K ANALYTICKÝM VÝPOČTŮM	23
3.2.1 ODPUDIVÁ SÍLA V KONTAKTNÍ ÚŽINĚ (HOLMOVA SÍLA).....	24
3.2.2 DVA VODIČE POD ÚHLEM NESPOJITÉ	25
3.2.3 SPOJITĚ ZAHNUTÝ VODIČ.....	26
3.2.4 ROVNOBĚŽNÉ ÚSEKY KONEČNÉ DÉLKY.....	26
3.3 ANALYTICKÝ VÝPOČET SIL PŮSOBÍCÍCH NA POHYBLIVÉ RAMENO JISTIČE.....	27
3.3.1 ZJEDNODUŠENÍ PŘI VÝPOČTU	28
3.3.2 PŘÍSPĚVKY ČÁSTÍ PROUDOVODNÉ DRÁHY.....	29
3.3.3 ODPUDIVÁ SÍLA V KONTAKTNÍM STYKU.....	29
3.3.4 VÝSLEDNÉ SILOVÉ PŮSOBENÍ NA POHYBLIVÉ RAMENO	30
4 SIMULACE ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL UŽITÍM MKP	32
4.1 ANSYS MAXWELL.....	32
4.2 MODEL PROUDOVODNÉ DRÁHY	32
4.2.1 MATERIÁLY	32
4.2.2 ZJEDNODUŠENÍ MODELU.....	34
4.3 IMPORT A NASTAVENÍ SIMULACE.....	35
4.4 VÝSLEDKY SIMULACÍ.....	36
4.5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	40
5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ÚŽINOVÉ SÍLY.....	42
5.1 MOTIVACE.....	42
5.2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO PŘÍPRAVKU	42
5.3 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO PŘÍPRAVKU	43
5.4 ZKRATOVÁ LABORATOŘ VTPPL.....	44

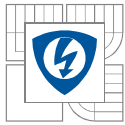


5.5 EXPERIMENTOVÁNÍ S PŘÍPRAVKEM	44
5.6 GRAFICKÉ PRŮBĚHY NAMĚŘENÝCH HODNOT	47
5.7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL	56
5.7.1 PODÍL PROUDOVODNÉ DRÁHY	56
5.7.2 PODÍL KONTAKTNÍ ÚŽINY	56
5.7.3 CELKOVÉ SILOVÉ PŮSOBENÍ	56
5.8 SHRNUÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ	57
5.8.1 ANALÝZA SVARU	58
6 KRITICKÉ SHRNUÍ	60
7 ZÁVĚR.....	61
LITERATURA	62
PŘÍLOHY	64

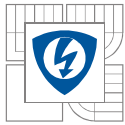


Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1 Princip funkce volnoběžky [1]</i>	16
<i>Obr. 1.2 Detaily vypínacího oblouku a jeho pohyb do zhášecí komory v jističi MCB a) $U_a = 50$ V, $t_a = 2,9$ ms b) $U_a = 50$ V, $t_a = 4$ ms c) $U_a = 150$ V, $t_a = 2,9$ ms [2]</i>	16
<i>Obr. 1.3 Používané jističe nn: a) MCB jistič 16 A fy ABB; b) MCCB jistič 160 A fy OEZ; c) ACB jistič 4 kA fy EATON [5], [6], [7]</i>	17
<i>Obr. 2.1 3D model proudovodné dráhy jističe BC 160 s popisem dílčích částí [15]</i>	20
<i>Obr. 3.1 Odpudivé síly v kontaktní úžině [19]</i>	24
<i>Obr. 3.2 Elektrodynamické síly na zahnutý vodič v úhlu a) nespojitý b) spojitý [18]</i>	25
<i>Obr. 3.3 Rovnoběžné úseky konečné délky [18]</i>	26
<i>Obr. 3.4 3D model proudovodné dráhy jističe BC160 v sepnutém stavu [15]</i>	27
<i>Obr. 3.5 Úseky proudovodné dráhy pro analytický výpočet elektrodynamických sil [15]</i>	27
<i>Obr. 3.6 Závislost elektrodynamických sil na proudu, dle analytických výpočtů</i>	31
<i>Obr. 4.1 B-H křivka materiálu lamel zhášecí komory a magnetického obvodu termomagnetické spouště</i>	33
<i>Obr. 4.2 Lamely zhášecí komory zleva: spodní, prostřední (2. až 9.) a horní</i>	33
<i>Obr. 4.3 Konstrukční model proudovodné dráhy jističe s detailem kontaktního styku [15]</i>	34
<i>Obr. 4.4 Zjednodušený model proudovodné dráhy jističe (pro simulaci) [15]</i>	34
<i>Obr. 4.5 Nastavení vlastností modelu v softwarovém prostředí Maxwell</i>	35
<i>Obr. 4.6 Vstup a výstup proudu do modelu</i>	36
<i>Obr. 4.7 Závislost elektrodynamické síly na proudu z MKP simulací</i>	38
<i>Obr. 4.8 Prostorové rozložení magnetické indukce při proudu 4 kA</i>	39
<i>Obr. 4.9 Prostorové rozložení intenzity magnetického pole při proudu 4 kA</i>	39
<i>Obr. 4.10 Prostorové rozložení proudové hustoty při proudu 4 kA</i>	40
<i>Obr. 4.11 Grafické porovnání analytických výpočtů a simulace</i>	41
<i>Obr. 5.1 Konstrukční návrh experimentálního uspořádání</i>	42
<i>Obr. 5.2 Zapojení experimentálního přípravku</i>	43
<i>Obr. 5.3 Detail kontaktního styku experimentálního přípravku</i>	43
<i>Obr. 5.4 a) Poloha měřicích svorek napětí b) Uchycení přívodního kabelu</i>	46
<i>Obr. 5.5 Oscilogram měření č. 1</i>	48
<i>Obr. 5.6 Oscilogram měření č. 2</i>	48
<i>Obr. 5.7 Oscilogram měření č. 3</i>	49
<i>Obr. 5.8 Oscilogram měření č. 4</i>	49

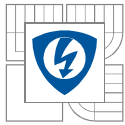


<i>Obr. 5.9 Oscilogram měření č. 5.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 5.10 Oscilogram měření č. 6.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 5.11 Oscilogram měření č. 7.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5.12 Oscilogram měření č. 8.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 5.13 Oscilogram měření č. 9.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 5.14 Oscilogram měření č. 10.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 5.15 Oscilogram měření č. 11.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5.16 Oscilogram měření č. 12.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5.17 Oscilogram měření č. 13.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 5.18 Oscilogram měření č. 14.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 5.19 Oscilogram měření č. 15.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 5.20 Oscilogram měření č. 16.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 5.21 Závislost vypočítané odpudivé kontaktní síly na protékajícím proudu.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 5.22 Svaření kontaktů při pokusu č. 9 a) detail svaru b) místo svaru pevného kontaktu c) místo svaru pohyblivého kontaktu.....</i>	<i>59</i>



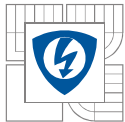
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2.1 Parametry jističe BC 160 [21]</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 2.2 Materiálové vlastnosti AgC5 použité v dalších kapitolách dle [9]:</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2.3 Materiálové vlastnosti Ag35WC65 použité v dalších kapitolách dle [9]:</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 3.1 Charakteristické rozměry dle 3.2.2 až 3.2.4</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 3.2 Silové příspěvky jednotlivých úseků proudovodné dráhy</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 3.3 Příspěvky síly od proudovodné dráhy a kontaktní úžiny</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4.1 Použité materiály a jejich vlastnosti</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 4.2 Výsledné silové působení na pohyblivé kontaktní rameno získané MKP simulací</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 5.1 Přehledová tabulka s parametry a výsledky dílčích měření</i>	<i>45</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A_a	Plocha kontaktu	[m ²]
B	Magnetická indukce	[T]
D, d	Průměr, tloušťka	[m]
F	Síla	[N]
F_k	Přítlačná síla v kontaktech	[N]
F_w	Pevnost svaru v tahu	[N]
H_B	Tvrдость podle Brinella	[kp·mm ⁻²]
H_M	Tvrдость podle Meyera	[N·m ⁻²]
H_K	Tvrдость podle Knoop	[N·mm ⁻²]
H_R	Tvrдость podle Rockwella	[-]
H_V	Tvrдость podle Vickerse	[N·mm ⁻²]
I, I_n	Elektrický proud	[A]
I_m	Amplituda proudu	[A]
l	Délka, rozteč	[m]
m	Hmotnost	[kg]
M	Moment síly	[Nm]
nn	Nízké napětí (nízkonapěťový)	[-]
R	Elektrický odpor	[Ω]
R_a	Střední aritmetická úchylka povrchu	[μm]
R_m	Pevnost materiálu v tahu	[N]
S	Průřez	[mm ²]
s_k	Nadskok kontaktu	[μm]
t	Čas	[s]
t_a	Doba hoření oblouku	[s]
T	Perioda, doba	[s]
U	Elektromotorické napětí	[V]
U_a	Obloukové napětí	[V]
W	Energie	[J]
μ	Permeabilita	[Hm ⁻¹]
μ_r	Relativní permeabilita	[-]
μ_0	Permeabilita vakua	[Hm ⁻¹]
σ	Měrná elektrická vodivost	[S·m ⁻¹]
φ	Fázový posun	[rad]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
ζ	Měrný elektrický odpor (rezistivita)	[Ω·m]
Ψ	Spřažený magnetický tok	[Wb]
Zkratka	Význam	
ČSN	Česká státní norma (technická)	
ČSN EN	Evropská norma převzatá do české normy	
MCB	Malý jistič (do cca 125 A; z angl. Miniature Circuit Breaker)	
MCCB	Kompaktní jistič (do cca 1600 A; z angl. Molded Case Circuit Breaker)	
ACB	Vzduchový jistič (až do 6300 A; z angl. Air Circuit Breaker)	



ÚVOD

Elektrické kontakty jsou jedny z nejkritičtějších míst všech obvodů. Za samotné podstaty jsou na ně kladeny náročné a protichůdné požadavky. V sepnutém stavu je požadován co nejnižší přechodový odpor a s tím související nízké oteplení. Naopak ve vypnutém stavu je požadavek na maximální izolační schopnost znemožňující elektrickému přeskoku přes rozepnutou dráhu. Zřejmě je i požadavek na co nejkratší dobu spínání a životnost.

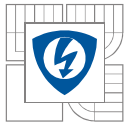
V předložené práci je pojednáno především o elektrodynamickém silovém působení v kontaktním systému nízkonapětového průmyslového jističe s následným návrhem experimentu pro přesnější ověření úžinové (Holmovy) síly. Jednotlivé metody jsou porovnány a je kvalifikován vliv dílčích částí přístroje na celkové působení.

Analytický výpočet elektrodynamických sil je založen na exaktních fyzikálních zákonech, ale vlivem dílčích zjednodušení a neuvažování okolí je zatížen natolik výraznou chybou, že jeho výsledek lze uvažovat jako čistě orientační.

Simulační software umožňuje detailní analýzu jakkoli složité proudovodné dráhy i magneticky nelineárního prostředí, což je ovšem vykoupeno náročností ovládání a nastavení modelu, jako i náročností na výpočetní výkon a dobu. Simulační software neumožňuje náhled do chování kontaktů na mikroskopické úrovni, např. proudovému zúžení a z toho plynoucí měknutí či svaření kontaktů.

Experimentální měření je doporučeno pro ověření obecně přijímaného vztahu, popisujícího odpudivou sílu v kontaktech vlivem zhuštění proudu do jednoho stykového místa. Při návrhu experimentu se vychází z fundamentálních zákonů elektrotechniky pro co nejmenší možné ovlivnění naměřených výsledků okolím či natvarováním proudovodné dráhy. Naráží se ovšem na přesnost měření a konzistenci naměřených výsledků.

Naskytl se tedy požadavek na zjištění velikosti úžinové síly v závislosti na mechanických a elektrických vlastnostech vodičů jakožto i druhu styku. Síly od proudovodné dráhy a od úžiny budou porovnány pro kvalifikování jejich vlivu na okamžitou odezvu pohyblivého kontaktu na zkratové proudy vyšších velikostí.



1 JISTIČE

Jistič je mechanický spínací přístroj primárně vyvinut jako náhrada pojistky, jelikož zpravidla na rozdíl od pojistky lze bezpečně využít jeho funkce i po jeho vybavení vlivem nadproudu či zkratu. Je schopen zapínat, vést a vypínat proudy za normálních provozních podmínek obvodu. Dále je schopen zapínat, po definovaný čas vést a následně *samočinně* vypínat poruchové proudy až do mezí svých spínacích schopností.

Z hlediska nadsystému plní jističe souhrnně funkci – vypínat nadproudy a chránit tak zařízení před jejich negativním působením. Jistič však musí sám protékající proud měřit a vyhodnotit tak okamžik vypnutí v závislosti na velikosti proudu a době působení.

Monitorování protékajícího proudu je u jističů zajištěno použitím řešení:

- kombinace tepelné a magnetické spouště
- vzorkování protékajícího proudu v diskrétních časových intervalech a následné vyhodnocení mikroprocesorem

Přičemž první varianta je užívána u jističů na nižší nominální proudy (MCB, částečně MCCB) a druhá varianta je užívána u jističů na vyšší nominální proudy (typicky nad 160 A). Předložený jistič je vybaven termomagnetickou spouští slučující tepelnou spoušť a zkratovou spoušť do jednoho celku, viz Obr. 2.1.

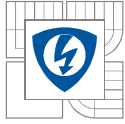
Např. u analyzovaného jističe je tepelná spoušť, nebo také časově závislá spoušť či spoušť na přetížení, vyhotovena jako paralelní spojení bimetalu a topného pasu ve tvaru „U“, jimiž přímo protéká elektrický proud. Vlivem průchodu elektrického proudu je v bimetalu i topném pasu generován tepelný výkon úměrný kvadrátu protékajícího proudu. Vlivem zvýšení teploty se bimetal prohýbá až na mez, kdy prostřednictvím mechanické vazby uvolní západku spínacího mechanismu, následuje samočinné rozpojení silových kontaktů jističe za využití energie akumulované ve spínací pružině. Změnou volné dráhy mezi bimetalem a lištou lze regulovat jmenovitý proud jističe, dané lze provést za pomoci kotouče regulace jmenovitého proudu na čelní straně jističe.

Časově nezávislá spoušť, nebo také okamžitá či zkratová spoušť, je vyhotovena na principu elektromagnetu. Vinutí elektromagnetu u předloženého jističe je provedeno jedním průvlekem, a to přímo paralelním spojením bimetalu a topného pasu tvaru „U“. Při průtoku proudu takové velikosti, že magnetická síla přitahující kotvu ke jhu je větší než síla od vratné pružiny, dochází stejně jako u tepelné spouště k uvolnění západky spínacího mechanismu a oddělení silových kontaktů spínací pružinou. Změnou síly vratné pružiny jejím natažením lze regulovat působení okamžité spouště taktéž za pomoci kotouče regulace na čelní straně jističe.

Spouště na přetížení a okamžité spouště jednotlivých pólů jsou mechanicky propojeny společnými lištami. [22]

Jistič obecně musí obsahovat následující funkční prvky:

- kontaktní systém, jenž slouží k vlastnímu spínání a na nějž jsou kladeny velmi přísné požadavky



- spínací systém, zajišťující manuální či automatické spínání
- nadproudovou spoušť, která vyhodnocuje nadproudy a následně dává popud k vybavení jističe přímým působením na jeho spínací systém
- zhášecí systém, umožňující zhášení elektrického oblouku při vypínacím procesu [1]

1.1 Kontaktní systém

Pro splnění základní funkce jističe ten obsahuje minimálně jeden *pevný* a jeden *pohyblivý* kontakt, avšak u jističů na vyšší jmenovité proudy je někdy použito více kontaktů na jeden pól, a to jak sériově (MCCB), tak i paralelně (ACB) řazených. Kontakty také mohou být děleny na hlavní a opalovací. V příslušných normách jsou vypsány požadavky na životnost kontaktního systému, například několik tisíc cyklů provozního spínání či mechanickou odolnost proti působení zkratových proudů, taktéž nízký přechodový odpor, odolnost proti svaření kontaktů a proti tepelnému působení oblouku.

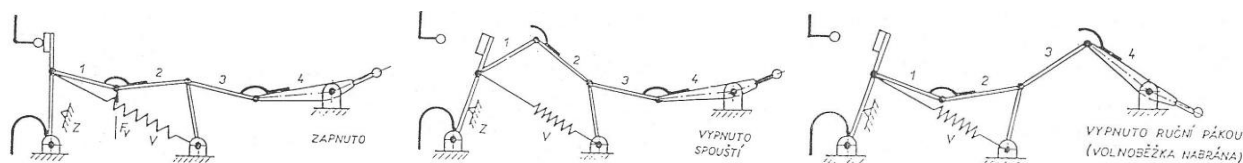
Kontaktní systém u výkonových jističů spíná běžně desítky až stovky ampérů, přičemž dané podmínky podmiňují vznik elektrického oblouku o vysoké teplotě. Oblouk je vyfukován do zhášecí komory a není tak udržován na jednom místě kontaktu, přenos materiálu kontaktů tak není nejdůležitějším aspektem ovlivňujícím požadavky na kontaktní materiály. Kombinace oxidování kontaktů a jejich deformací vlivem měknutí či svaření je největším rizikem selhání těchto přístrojů (přílišné oteplení vlivem vysokého přechodového odporu či pevnost svaru v tahu větší než vypínací síla pružiny). Požadavky na tyto materiály tedy zahrnují jejich vysokou vodivost a odolnost proti opalu obloukem. Čisté stříbro je velmi měkké a slitiny stříbra dosahují nízkých vodivostí. Slinuté kontakty ze stříbra s wolframem či molybdenem kombinují dobrou vodivost s odolností proti deformacím či svaření. Je zřejmé, že výsledná elektrická vodivost je závislá na objemovém podílu stříbra. [14]

Obecná opatření snižující riziko svaření silových kontaktů:

- užití velmi tvrdých kontaktních materiálů, například slitina platiny a iridia či wolframu, jež tvoří relativně malé a křehké svary, téměř zanedbatelné pevnosti
- užití oxidovatelných kovů, jejichž svary jsou křehké díky přítomným oxidům. Je však třeba učinit kompromis mezi požadavky na dobrou přechodovou vodivost a odolnost vůči svaření (či lepení, v anglické literatuře uváděno jako *sticking*)
- svary slinutých sloučenin stříbra (či zlata) s grafitem nebo CdO jsou lehce narušitelné, protože přidaná složka zabraňuje vzniku velkých kontaktních styků (tzv. a-skvrn). Směs stříbra a 2 až 5 % grafitu významně zabraňuje svařování kontaktů. [14]

1.2 Spínací systém

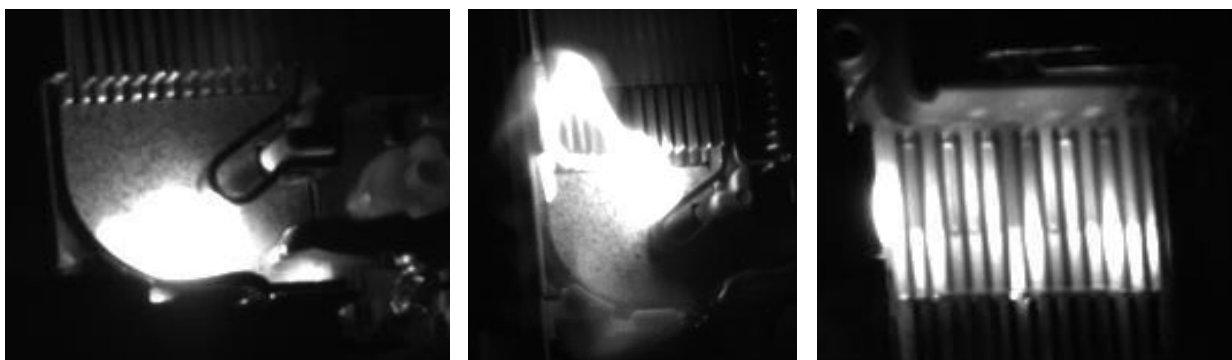
zajišťuje manuální či automatické spínání kontaktů, v prvním případě pomocí páky ručně uživatelem, v druhém případě poté dálkově zprostředkovaně přes pohon, což je běžné u průmyslových jističů na vysoké proudy (ACB). Je požadováno mžikové spínání kontaktů, což je zabezpečeno volnoběžkou a západkou. Západka drží volnoběžku v zapnuté poloze proti síle vypínací pružiny, na západku poté působí spouště, čímž je zaručeno mžikové spínání kontaktů i při malém inicializačním impulsu síly působící na západku, viz Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Princip funkce volnoběžky [1]

1.3 Zhášecí systém

je u jističů výhradně proveden ve formě zhášecí komory tvořené kovovými lamelami. Při hoření oblouku je ten do komory „vyfukován“ elektrodynamickými silami působenými jak vhodným zahnutím proudovodné dráhy, tak i samotným přitahováním oblouku k feromagnetickému roštu. Oblouk je následně rozdělen na více dílčích sériových obloučků, což způsobí navýšení obloukového napětí vlivem řady anodových a katodových skvrn. Tímto způsobem jsou podpořeny deionizační pochody vedoucí ke zhašení oblouku, viz Obr. 1.2. Více detailně popsáno v [2].

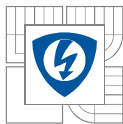


Obr. 1.2 Detaily vypínacího oblouku a jeho pohyb do zhášecí komory v jističi MCB
a) $U_a = 50 \text{ V}$, $t_a = 2,9 \text{ ms}$ b) $U_a = 50 \text{ V}$, $t_a = 4 \text{ ms}$ c) $U_a = 150 \text{ V}$, $t_a = 2,9 \text{ ms}$ [2]

Nadproudové spouště zajišťují detekci velikosti protékaného proudu a v případě překročení nastavených limitů dávají za definovaný čas popud k vybavení jističe přímým působením mechanismu spouště na západku volnoběžky. Nadproudové spouště lze dále dělit dle velikosti a době průchodu vypínaných proudů na:

- tepelnou, jež je tvořena bimetalem přímo, nepřímo, či kombinovaně ohříváním; používané v MCB a částečně MCCB
- elektromagnetickou, též zvanou zkratovou, jež sestává z elektromagnetu protékaného pracovním proudem; speciálním případem je kombinace výše uvedených do jedné spouště, tzv. termomagnetické, viz Obr. 2.1
- elektronickou, jež je založená na mikroprocesorovém vyhodnocování průchozího proudu zprostředkovaně přes měřicí transformátor proudu, využívané v MCCB a ACB

Vypínače velkých výkonů, a především vypínače všech vysokých napětí jsou téměř bez výjimky jističi (anglicky souhrnně nazývány *circuit breaker*). Název jistič se však začal používat jako pojmenování užšího významu jen pro takto provedené vypínače nízkého napětí, nyní výhradně s magnetickým zhašením oblouku. [3]



V této kapitole bude velmi stručně pojednáno pouze o nízkonapětových jističích, které jsou standardně rozděleny na tři základní kategorie dle konstrukčního řešení a použití. [4]



Obr. 1.3 Používané jističe nn: a) MCB jistič 16 A fy ABB; b) MCCB jistič 160 A fy OEZ; c) ACB jistič 4 kA fy EATON [5], [6], [7]

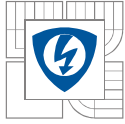
1.4 Malé jističe MCB

Malé jističe mohou být též někdy uvedeny jako jističe určené pro laickou obsluhu. Jsou určeny převážně pro použití v domácích a podobných instalacích dle ČSN EN 60898-1. Konstrukčně jsou uzpůsobeny k připevnění na lištu ve tvaru „U“, ve variantě se šířkou 35 mm tzv. DIN lištu, dle ČSN EN 60715. Vzhledem k účelu použití jsou požadavky na konstrukci a vlastnosti poměrně přísné, jmenovitě například požadavek na bezpečné vypnutí zkratového proudu opakovaně třikrát za sebou bez časové prodlevy. Malé jističe jsou vyráběny pro jmenovité proudy až do 125 A. [8]

Vypínací oblouk je velmi rychle „vyfukován“ do zhášecí komory pomocí natvarování proudovodné dráhy do tvaru U-smyčky i přitahováním feromagnetickým roštem. Pro bezpečné zajištění funkce rychlého vypínání je nezbytné mžikové oddálení kontaktů, jež zajistí strmý nárůst obloukového napětí na hodnoty zabezpečující omezení protékajícího proudu ještě před jeho uvažovaným maximem. Zhášecí komora sestává ze svazku přibližně dvanácti ocelových lamel tloušťky přibližně 1 mm vzájemně vzdálených několik milimetrů. Napětí oblouku hořícího v takové komoře přesahuje 350 V a tím zabezpečuje limitaci proudu, jelikož maximum fázového napětí odpovídá přibližně 325 V.

Pevný kontakt je zpravidla vyroben ze slitiny AgC, materiál pohyblivého kontaktu se poté nejčastěji používá slitina mědi s 3-5% hmotnostního podílu uhlíku pro redukování síly případného svaru a také pro snížení přechodového odporu v sepnutém stavu po vypínání s hořením oblouku. Kontaktní dílec je poté postříbřen k zajištění odolnosti vůči vzniku cizích vrstev.

Při průtoku zkratového proudu je odezva zkratové spouště pod 1 ms, při otevírací rychlosti pohyblivého kontaktu až 10 m/s. Celková vypínací doba je poté kratší než 5 ms. Jističe MCB tedy *téměř vždy* omezují protékající zkratový proud. Na čelní ploše je uvedena vypínací schopnost a číslo odpovídající *třídě omezení energie* (1,2,3; vyšší číslo odpovídá většímu omezení). Třídy omezení jsou definovány příslušnou normou. [1], [8], [9]



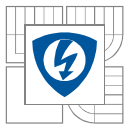
1.5 Kompaktní jističe *MCCB*

Od malých jističů se liší robustnější konstrukcí založenou na nosné plastové základně a také většími maximálními jmenovitými proudy, typicky do 1600 A. [1]

Konstrukce kontaktního systému může být shodná s tou u MCB [6], nebo konstrukce využívající rozpojení proudovodné dráhy na dvou místech – tzv. rotační či rotoaktivní technika vypínání. Jističe s danou konstrukcí kontaktů mají velkou omezovací schopnost i při vysokých zkratových proudech, a tak výrazně snižují dynamické a tepelné účinky zkratových proudů ve střední úrovni rozvodů. U některých jističů je úroveň omezení zkratového proudu srovnatelná s pojistkami. Pro zrychlení vypínacího procesu je využíváno sériové řazení dvou kontaktů, na nichž vzniká odpudivá Holmova síla. U rotoaktivního řešení je navíc využitý tlak plynů hoření oblouku pohánějící píst spřažený s pružinovým mechanismem. [10] Detailně i s patentovou rešerší popsáno v [13].

1.6 Vzduchové jističe *ACB*

Ačkoliv jsou všechny známé nízkonapěťové jističe vzduchové, používá se označení vzduchový jistič jen jističům s ocelovým rámem, používaných pro jmenovité proudy až 6,3 kA. Jejich kontaktní systém je zpravidla konstruován jako paralelně dělený pro minimalizaci přechodového odporu v sepnutém stavu a paralelní dělení elektrického oblouku při vypínání. Vyznačují se velmi širokým sortimentem příslušenství, jako např. spínačů, přepěťových a podpěťových spouští, motorových pohonů a uzamykacích zařízení. Zpravidla se vyrábí i ve výsuvném provedení. Vzhledem ke svému umístění je lze ovládat přes datovou komunikaci, disponují měřeními elektrických veličin a jejich posíláním po sběrnici. [6]



2 ANALÝZA KONTAKTNÍHO SYSTÉMU JISTIČE BC 160

K analýze byl vybrán jistič BC 160 od firmy OEZ Letohrad. Jedná se o kompaktní nízkonapěťový jistič s termomagnetickou spouští a maximálním jmenovitým proudem 160 A. Kontaktní systém je řešen jako pákový, rotačně uložený, s přerušením proudovodné dráhy v jednom místě. Parametry jističe jsou uvedeny v Tab. 2.1.

Tab. 2.1 Parametry jističe BC 160 [21]

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

Proudovodná dráha s popisem jednotlivých částí je vyobrazena na Obr. 2.1. Vzhledem k zadání práce na téma elektrodynamických sil nebudou ostatní části jističe analyzovány.

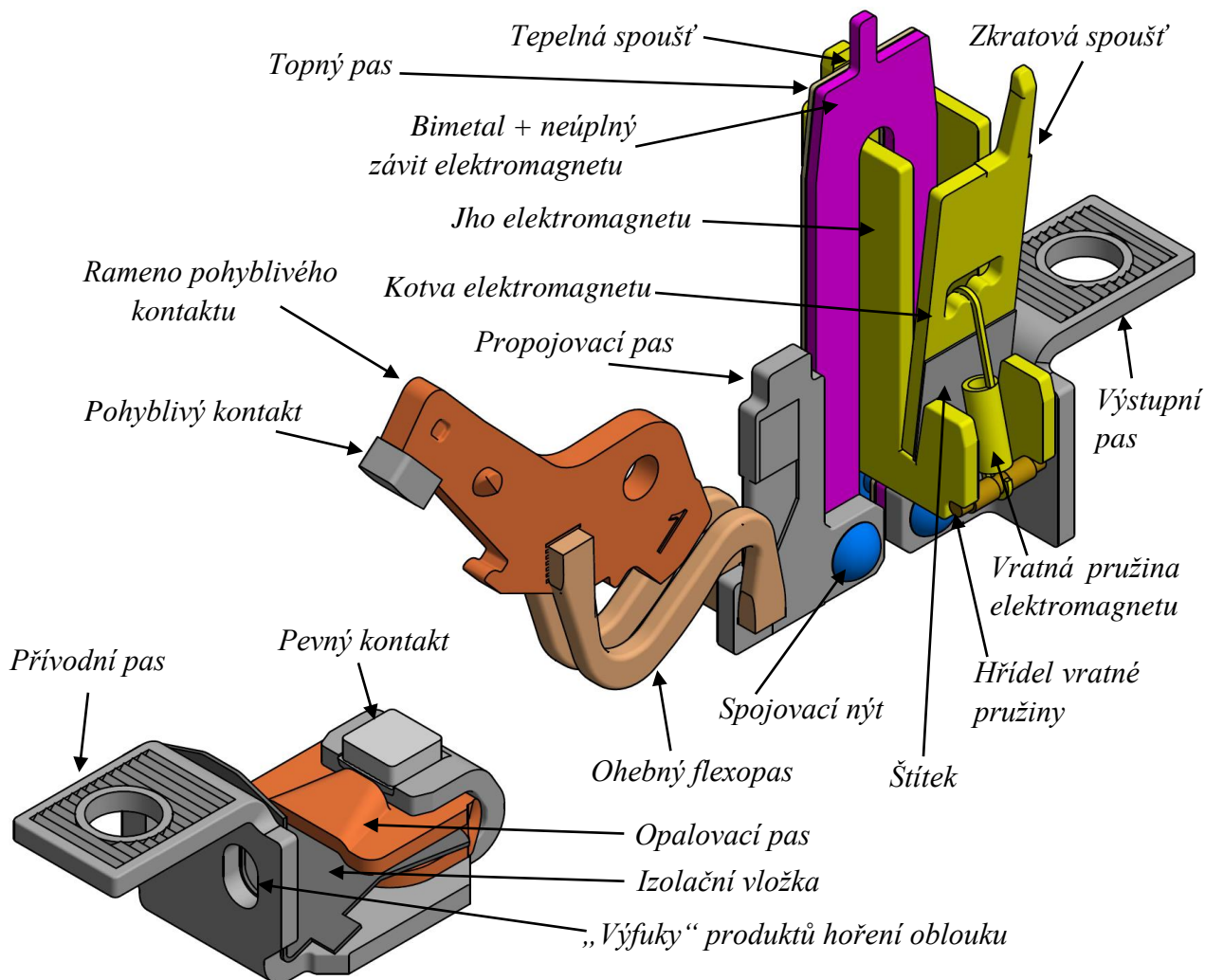
Přívodní a výstupní pasy jsou postříbřené měděné plechy s otvory M6 pro uchycení přívodního/výstupního vodiče či pasu. Přívodní pas je poté tvarován čtyřmi pravouhlými záhyby pro dosažení vhodného tvaru proudovodné dráhy z důvodu magnetického vyfukování spínacího oblouku do zhášecí komory. Poslední dva záhyby jsou přemostěny měděným pasem (opalovací pas), jež při vypínání obvodu přebírá elektrický oblouk od pevného kontaktu, je tak elegantně vyřešeno navýšení životnosti kontaktního dílce, kdy je namáhán vysokou teplotou oblouku jen po nezbytně nutnou dobu. Mezi měděný opalovací pas je poté vložena izolační vložka sahající až k vrchu přívodního pasu, přičemž zamezuje přeskočení oblouku na přívodní pas. Produkty hoření oblouku jsou z jističe odváděny výfukem ve zhášecí komoře a také dvěma otvory ve vertikální části přívodního pasu.

Rameno pohyblivého kontaktu je měděný profil rotačně uložen tak, že na jedné straně elektrický proud vniká přes kontaktní styk od pevného kontaktu a na druhé straně je přes pružný měděný splétaný flexopas elektricky připojen k měděnému propojovacímu pasu.

K propojovacímu pasu jsou paralelně přinýtovány dva pásy ve tvaru „U“ – topný pásek a bimetal. Specifický tvar je proveden tak, aby oba pásy tvořily závit elektromagnetu, jež při

vyšších nadproudech přitáhne kotvu a mžikově tak vybaví spínací mechanismus. Je zřejmé, že jho elektromagnetu i kotva jsou vyrobeny z feromagnetického materiálu, což bude později částečně uvažováno při analytických výpočtech a následně bude uvedena specifická B-H křivka materiálu užitá v MKP software v kap. 4.

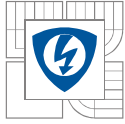
Zhásecí komora není přímo součástí proudovodné dráhy, tak na Obr. 2.1 není uvedena, pro účely simulace bude ale v 4. kapitole vymodelována.



Obr. 2.1 3D model proudovodné dráhy jističe BC 160 s popisem dílčích částí [15]

2.1 Pevný kontaktní dílec

Pevný kontakt je kvádr o rozměrech 2 x 6 x 6 mm z materiálu AgC5. Směs stříbra a uhlíku, dále jen AgC, je velice často užívaná pro silové kontakty. Nejužívanější je směs s 2-5% hmotnostního podílu uhlíku (9-20% objemového podílu; grafit má téměř pětkrát nižší hustotu než stříbro). AgC má velmi dobrou odolnost proti dynamickému svaření a zároveň si udržuje nízký přechodový kontaktní odpor. Páry uhlíku vznikající při hoření oblouku poté zaručují jeho menší negativní dopad na vodivé součásti vlivem koroze, jelikož tvoří redukční atmosféru. Nevýhodou je ovšem poměrně vysoká citlivost na opal obloukem (eroze materiálu) a také relativně malá pohyblivost oblouku.



Na Obr. 2.1 lze vidět, že v konstrukci uvedeného jističe je použit měděný opalovací pas, vodivě spojený s pevným kontaktem tak, aby při vypínání větších proudů oblouk v co nejkratší době opustil pevný kontakt a po zbytek svého působení hořel jen mezi opalovacím pasem a pohyblivým kontaktem. Zřejmě ale dochází k úbytkům materiálu při provozním spínání, kde není oblouk vytlačen z kontaktu a tak hoří jen mezi kontaktními materiály.

AgC je připravován práškovou metalurgií (též slinování, angl. sintering), výsledné vlastnosti jsou tedy kromě podílu obou složek závislé na velikosti použitých zrn. Zkouškami bylo dokázáno, že při užití hmotnostního poměru AgC 95/5% a velikosti zrn 20 μm vs 4 μm je dosaženo větší odolnosti vůči svaření užitím jemnějších zrn, což ovšem zároveň zvyšuje citlivost vůči erozi vlivem oblouku.

Je zřejmé, že jak volba hmotnostního poměru či jemnosti zrn je volbou kompromisu a je tak třeba citlivě uvažovat způsob užití kontaktu. [9]

Tab. 2.2 Materiálové vlastnosti AgC5 použité v dalších kapitolách dle [9]:

Obj. podíl C	Hm. podíl C	Hustota ρ	Rezistivita $\zeta_{(20^\circ\text{C})}$	Tvrдость podle Meyera H_M
[%]	[%]	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	[$\Omega\cdot\text{m}$]	[$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$]
20	5	8500	$22\cdot 10^{-9}$	$400 - 420\cdot 10^6$

2.2 Pohyblivý kontaktní dílec

Pohyblivý kontakt je kvádr o rozměrech 3 x 4 x 6 mm s jednou stěnou zaoblenou s poloměrem $r = 22$ mm. Kontaktní styk je tedy přímkový (válec proti rovině). Je vyroben z materiálu Ag35WC65, dále jen AgWC. Směs těchto materiálů je výhodná z hlediska vysoké odolnosti vůči erozi vlivem oblouku. Citlivost kontaktů je přídatkem karbidu wolframu taktéž výrazně snížena. Podíl WC složky je však kompromisem mezi odolností vůči opalu či svaření a přechodovým odporem v sepnutém stavu a z toho plynoucích vyšších ztrát vedením. V sepnutém stavu je pohyblivý kontakt přitlačován kontaktní pružinou silou 6,5 N k pevnému kontaktu. [9]

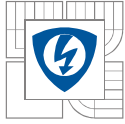
Kontaktní systém je tak tvořen asymetrickým kontaktním párem AgC-AgWC.

Tab. 2.3 Materiálové vlastnosti Ag35WC65 použité v dalších kapitolách dle [9]:

Obj. podíl Ag	Hm. podíl Ag	Hustota ρ	Rezistivita ζ	Tvrдость podle Meyera H_M
[%]	[%]	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	[$\Omega\cdot\text{m}$]	[$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$]
45	35	13200	$50\cdot 10^{-9}$	$1600 - 1900\cdot 10^6$

2.3 Tvrдость kontaktních materiálů

Tvrдость lze nazvat jako odolnost povrchových oblastí materiálu proti místnímu porušení cizím tělesem. Nejedná se ovšem o žádnou fyzikálně definovatelnou vlastnost, nýbrž o výslednici celé řady vlastností hmoty, zejména povrchu.



Ze základního dělení na zkoušky statické, dynamické a vrypové jsou pro zkoumání kontaktních materiálů nejrelevantnější a nejužívanější zkoušky statické, pro svoji přesnost, jednoduchost a reprodukovatelnost. Lze je nazývat též jako zkoušky vnikací, kde se analyzuje vtisk definovaného indentoru vtlačovaného kolmo k povrchu zkoumaného tělesa taktéž definovanou silou.

Základní vnikací zkoušky jsou:

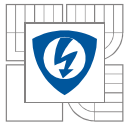
- Brinellova zkouška, značena H_B , indentorem je ocelová kalená kulička, analyzuje se výsledná plocha vtisku S , tvrdost je poté vypočtena jako: $H_B = \frac{F}{S}$ [kp/mm²;kp,mm²]¹
- Rockwellova zkouška, značena H_{RX} (kde X odpovídá písmenům A až K), indentor je ocelová kulička (B, E, F, G, H, K) či diamantový kužel (A, C, D). Vyhodnocuje se hloubka vtisku, tvrdost tedy nemá povahu napětí.
- Vickersova zkouška, značena H_V , indentor je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136°. Zkoumá se průměrná délka úhlopříčky u , $H_V = 0,189 \frac{F}{u^2}$ [Nmm⁻²;N,mm]
- Knoopova zkouška, značena H_K , indentor má základnu kosočtverce s poměrem úhlopříček cca 1:7, měří se delší úhlopříčka vtisku l a tvrdost je poté: $H_K = 1,451 \frac{F}{l^2}$ [12]

V literatuře zaměřené na elektrické kontakty, např. [9] je zpravidla udávána tvrdost jen jako H [N/mm², popř. MPa] někdy též H_c , bez upřesnění detailnějších informací. V knize *R. Holma* [14] je však upřesněno, že se jedná o tzv. *kontaktní tvrdost* či *Meyerovu tvrdost*.

Na Brinellovu zkoušku reagoval Prof. Meyer, jenž poukazoval na závislost H_B na použitém zatížení, navrhl tedy nové měření tvrdosti, definované jako: $H_M = \frac{F}{\pi r^2}$ [N·mm⁻²;N,m], kde F je přítláčná síla působící na indentor (kuličku) kolmo k ploše zkoumaného materiálu a r je poloměr průmětu vtisku do roviny. Je zřejmé, že při přepočtu na stejné jednotky vychází Meyerova tvrdost vždy vyšší, než Brinellova.

Daná zkouška je ovšem ideální pro popis kontaktních styků, jelikož výstupky na kontaktních plochách jsou podobnější kuličce a ne jehlanu, jenž je užíván v určitých zkouškách. Při podobné tvrdosti obou kontaktů odpovídá vypočtená plocha ze vztahu pro Meyerovu tvrdost reálnému kontaktnímu styku. V literatuře jsou ale nejčastěji udávány tvrdosti podle *Brinella*, *Vickerse* a *Knoopa*. Naštěstí se ale příliš neliší od tvrdosti *Meyerovy* (jsou přibližně o 7% menší). Přepočítají-li se výše uvedené tvrdosti na základní rozměr v N/m² či Pa, jsou pro potřeby výpočtů kontaktních ploch s danou přesností zaměnitelné. [14], [16]

¹ Síla 1 kilopond (kp) je definovaná jako síla odpovídající tíze tělesa o hmotnosti 1 kg v místě s tíhovým zrychlením 9,80665 m/s², tedy průměrné tíhové síle na zemském povrchu. Je tedy z definice roven 9,80665 N. V literatuře lze často vidět uvedení síly v kg, což je ovšem **mylná** interpretace (správně je v daných případech právě kp, ikdyž není zaveden v soustavě SI), jelikož rozměr hmotnosti a síly je v soustavě SI **kg** vs **kg·m·s⁻²**. [11]



3 ANALYTICKÝ VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL

3.1 Rozdělení sil

Celkové silové působení na rameno pohyblivého kontaktu jističe lze rozdělit na 4 separátní síly různých velikostí i mechanismů jejich vzniku:

- Síla od vypínací pružiny
- Elektrodynamická odpudivá síla v kontaktní úžině (Holmova)
- Elektrodynamická síla od zbylých úseků proudovodné dráhy či blízkých feromagnetik
- Síla od expanze plynů v důsledku hoření oblouku mezi kontakty

Síla od spínacího mechanismu je daná tuhostí vypínací pružiny a polohou kontaktu během jeho pohybu do vypnutého stavu. Rychlost a zrychlení kontaktního ramene jsou poté dány průběhem této síly a redukovaným momentem setrvačnosti na pohyblivém rameni. Na rozdíl od ostatních uvedených sil je při znalostech charakteristických vlastností kontaktu a spínacího mechanismu analyticky snadno dopočitatelná a zřejmě přispívá při zrychlování ramene z vypnuté polohy největším dílem.

Holmova odpudivá síla v kontaktní úžině působí nejkratší dobu z uvedených sil, jelikož prakticky zaniká při oddálení kontaktů a začátku hoření oblouku. Je velmi obtížně zjistitelná a pro její analytický výpočet se užívá jednoduchého empirického vztahu dle Holma, viz rov. (3.2) či [14]. Přesnost Holmova vztahu bude ověřena experimentem v kapitole 5.

Elektrodynamická síla od zbylých úseků je způsobena vzájemným působením magnetických polí dílčích částí vůči sobě. Je charakteristická tím, že totožně jako síla Holmova je závislá na kvadrátu protékaného proudu. Je zřejmé, že tato síla je velmi závislá na vzájemné poloze kontaktního ramene a zbytku proudovodné dráhy. Pomocí náhrady všech úseků dráhy konečným počtem idealizovaných přímých úseků lze tuto sílu vypočítat analyticky, dále v kap 3.3. V kapitole 4 je poté k výpočtu dané síly využít simulační software Maxwell.

Odpudivá síla vlivem tlaku produktů hoření oblouku hraje taktéž velmi důležitou roli při vypínání, a např. v [17] je ukázáno, že tato síla může i několikrát přesáhnout velikost síly magnetické. V reálném spínacím systému tedy nutné uvažovat i tuto sílu. V této práci je ale pozornost věnována pouze silám magnetickým.

V následující kapitole budou vypočítány složky sil od dílčích částí proudovodné dráhy a také od kontaktní úžiny užitím analytických vztahů. Je zřejmé, že je nutnost použít mnoho zjednodušení, jež více či méně ovlivňují výslednou sílu. V kapitole zabývající se simulacemi v MKP budou tyto diskutovány.

3.2 Teoretický aparát k analytickým výpočtům

Z Biot–Savartova zákona je známo, že nachází-li se vodič orientované délky l protékany elektrickým proudem o velikosti i v magnetickém poli o indukci B , pak na něj působí síla:

$$F = i \int_l dl \times B \quad [N;A,m,T] \quad (3.1)$$

V případě analyzované proudovodné dráhy je celková síla působící na pohyblivé rameno superpozicí sil od dílčích (budicích) úseků proudovodné dráhy.

Dílčí úseky jsou pro potřeby analytických vztahů uvažovány jako *přímé*. Je tedy zřejmé, že tímto byla zanesena určitá výpočetní chyba. Rozdělení dráhy na více úseků je však velmi časově náročné na výpočet a pro dané účely lépe poslouží simulace pomocí metody konečných prvků.
[13]

3.2.1 Odpudivá síla v kontaktní úžině (Holmova síla)

Elektrický proud tekoucí přes kontaktní styk je vždy koncentrován do plošného styku o velmi malém průřezu v porovnání s průřezem kontaktního dílce. Je tedy zřejmé, že v blízkosti kontaktního styku dochází k deformaci tvaru proudnic a jejich koncentrování do styku, viz Obr. 3.1. Teoreticky řečeno tedy odpudivá síla v kontaktním styku existuje vždy, když existuje nenulová složka elektrického proudu v jeho okolí, kolmá ke kontaktní. Tato síla je generována interakcí protékajícího elektrického proudu se svým vlastním magnetickým polem, viz Obr. 3.1.

Vztah pro výpočet odpudivé kontaktní síly dle Holma [14]:

$$F_u = 10^{-7} i^2 \ln \frac{D}{d} \quad [\text{N}; \text{A}, \text{m}, \text{m}] \quad (3.2)$$

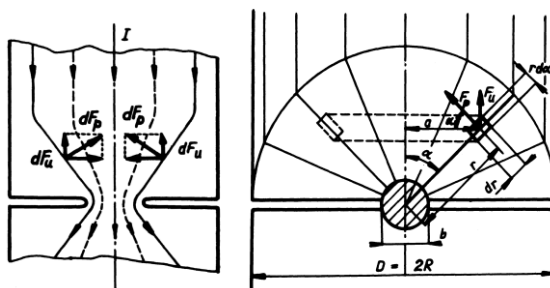
Kde D je průměr náhradní kontaktní polokoule substituující obdélníkový kontaktní dílec:

$$D \approx \sqrt{a \cdot b} \quad [\text{m}] \quad (3.3)$$

Kde a a b jsou lineární rozměry obdélníkového kontaktního dílce. Rozměr d je idealizovaný průměr kruhové stykové plochy nahrazující reálný styk:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_k}{\pi \cdot H_M}} \quad [\text{m}; \text{N}, \text{Pa}] \quad (3.4)$$

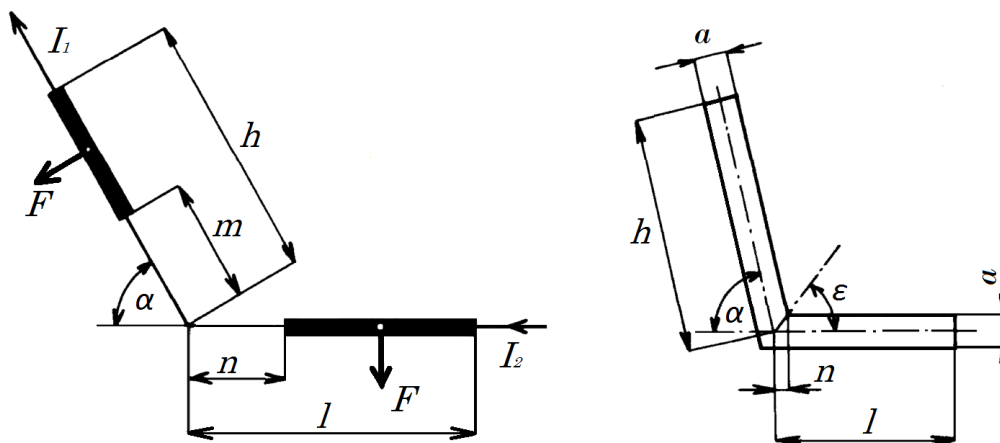
Kde F_k je přitlačná kontaktní síla a H_M je tvrdost kontaktního materiálu (podle Meyera, viz 2.3) kontaktu s nižší tvrdostí. Výpočet je idealizován, jelikož se uvažuje soustředění toku proudu pouze do jedné souvislé kontaktní mikroplochy, což může významně zvýšit výpočtovou hodnotu odpudivé síly. Druhým předpokladem je zavedení tzv. kulové styčné plochy, jenž na místo styku zavádí supravodivou kouli s konečným poloměrem $r = 0,5d$. Dané zjednodušení lehce snižuje výpočtovou hodnotu odpudivé síly, jelikož plocha kulového styku je vždy větší, než plocha průřezu této koule.



Obr. 3.1 Odpudivé síly v kontaktní úžině [19]

3.2.2 Dva vodiče pod úhlem nespojitě

Jak je uvedeno např. v [19]: magnetická interakce dvou částí vodiče protékaného proudem silově působí k „narovnání“ daného úseku, viz Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Elektrodynamické síly na zahnutý vodič v úhlu a) nespojitě b) spojitě [18]

V souladu s Obr. 3.2a jsou nejdříve použity substituce zkracující výsledné výpočty:

$$a = \sqrt{n^2 + h^2 + 2nh \cdot \cos\alpha} + n \cdot \cos\alpha + h \quad (3.5)$$

$$b = \sqrt{l^2 + m^2 + 2lm \cdot \cos\alpha} + l \cdot \cos\alpha + m \quad (3.6)$$

$$c = \sqrt{l^2 + h^2 + 2lh \cdot \cos\alpha} + l \cdot \cos\alpha + h \quad (3.7)$$

$$d = \sqrt{n^2 + m^2 + 2nm \cdot \cos\alpha} + n \cdot \cos\alpha + m \quad (3.8)$$

$$r = \sqrt{n^2 + h^2 + 2nh \cdot \cos\alpha} + h \cdot \cos\alpha + n \quad (3.9)$$

$$s = \sqrt{l^2 + m^2 + 2lm \cdot \cos\alpha} + m \cdot \cos\alpha + l \quad (3.10)$$

$$t = \sqrt{l^2 + h^2 + 2lh \cdot \cos\alpha} + h \cdot \cos\alpha + l \quad (3.11)$$

$$u = \sqrt{n^2 + m^2 + 2nm \cdot \cos\alpha} + m \cdot \cos\alpha + n \quad (3.12)$$

Výraz pro sílu působící od od úseku $h-m$ na úsek $l-n$ kolmo k jeho ose a moment působící vůči průsečíku os obou úseků:

$$F_l = 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{\sin\alpha} \left(\ln \frac{a \cdot b}{c \cdot d} - \cos\alpha \cdot \ln \frac{r \cdot s}{t \cdot u} \right) \quad (3.13)$$

$$M_l = 10^{-7} I_1 I_2 \left[h \cdot \sin\alpha \cdot \ln \frac{t}{r} + m \cdot \sin\alpha \cdot \ln \frac{u}{s} + \cot\alpha \cdot (c - a - b + d) \right] \quad (3.14)$$

Podobně poté od úseku $l-n$ na úsek $h-m$:

$$F_h = 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{\sin\alpha} \left(\ln \frac{r \cdot s}{t \cdot u} - \cos\alpha \cdot \ln \frac{a \cdot b}{c \cdot d} \right) \quad (3.15)$$

$$M_h = 10^{-7} I_1 I_2 \left[l \cdot \sin \alpha \cdot \ln \frac{c}{b} + n \cdot \sin \alpha \cdot \ln \frac{d}{a} + \cot \alpha \cdot (c - a - b + d) \right] \quad (3.16)$$

Je zřejmé, že směrodatná je znalost velikosti síly, jejího působíště a směru pro kompletní analýzu elektrodynamických sil působících na pohyblivé rameno. Výraz udávající vzdálenost působíště síly od průsečíku os obou úseků je poté:

$$l_m = \frac{M_l}{F_l} \quad [\text{m}; \text{Nm}, \text{N}] \quad (3.17)$$

3.2.3 Spojitě zahnutý vodič

Dle Obr. 3.2b je síla a moment působící na jeden úsek spojitě zahnutého vodiče od druhého členu:

$$F_{l(m=0)} = 10^{-7} \frac{I^2}{\sin \alpha} \left(\ln \frac{l \cdot a}{n \cdot c} - \cos \alpha \cdot \ln \frac{l \cdot r}{n \cdot t} \right) \quad (3.18)$$

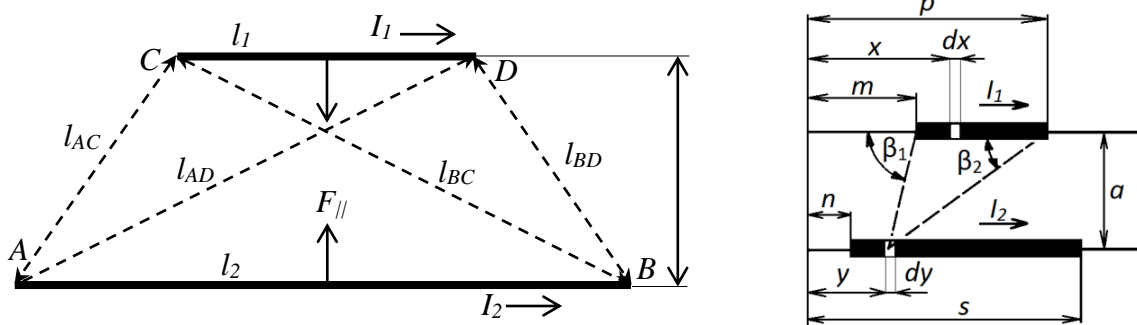
$$M_{l(m=0)} = 10^{-7} I^2 \left[h \cdot \sin \alpha \cdot \ln \frac{t}{r} + \cot \alpha \cdot (t - r - 2l + 2n) \right] \quad (3.19)$$

Kde:

$$n = \frac{a}{2tg\varepsilon} \quad (3.20)$$

$$\varepsilon = \frac{\pi - \alpha}{2} \quad (3.21)$$

3.2.4 Rovnoběžné úseky konečné délky



Obr. 3.3 Rovnoběžné úseky konečné délky [18]

Výraz udávající síly mezi rovnoběžnými úseky reálné délky dle Obr. 3.3 je:

$$F_{||} = 10^{-7} \cdot \frac{i_1 i_2}{a} \cdot (l_{AD} - l_{BD} - l_{AC} + l_{BC}) \quad (3.22)$$

Kde z obrazu vyplývá:

$$l_{AD} = \sqrt{(p - n)^2 + a^2} \quad (3.23)$$

$$l_{AC} = \sqrt{(m - n)^2 + a^2} \quad (3.24)$$

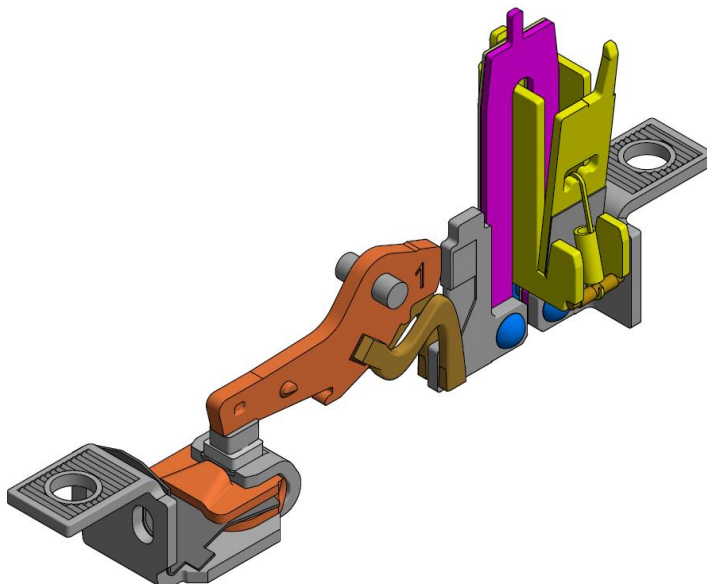
$$l_{BC} = \sqrt{(s - m)^2 + a^2} \quad (3.25)$$

$$l_{BD} = \sqrt{(p - s)^2 + a^2} \quad (3.26)$$

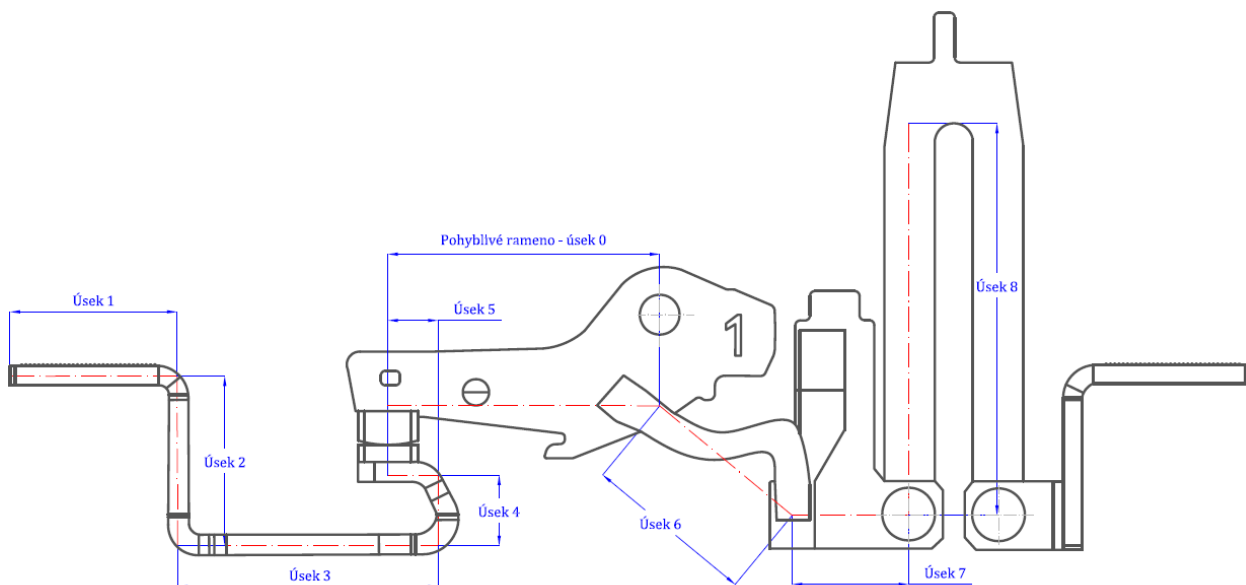
Moment dané síly je poté:

$$M_s = 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{2a} \left[(p + n) \cdot l_{AD} - (p + s) \cdot l_{BD} - (m + n) \cdot l_{AC} + (s + m) \cdot l_{BC} + a^2 \ln \frac{s - p + l_{BD}}{s - m + l_{BC}} \cdot \frac{n - m + l_{AC}}{n - p + l_{AD}} \right] \quad (3.27)$$

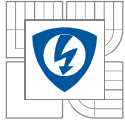
3.3 Analytický výpočet sil působících na pohyblivé rameno jističe



Obr. 3.4 3D model proudovodné dráhy jističe BC160 v sepnutém stavu [15]



Obr. 3.5 Úseky proudovodné dráhy pro analytický výpočet elektrodynamických sil [15]



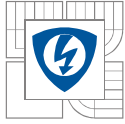
3.3.1 Zjednodušení při výpočtu

- Není uvažována zhášecí komora jakožto blízké feromagnetikum, jenž je konstrukčně velmi blízko pohyblivému rameni. Je zřejmé, že toto zjednodušení velmi výrazně ovlivní přesnost výpočtu, ale vzhledem ke komplikovanému tvaru lamel a jejich počtu je jejich uvažování ve výpočtu nereálné. Simulace MKP poskytne v tomto případě přesnější výsledky.
- Úsek č. 1 není uvažován, jelikož jeho osa je přibližně totožná s osou ramene, na rameno tedy v sepnutém stavu nepůsobí žádnou silou.
- Dráha proudu v rameni je uvažována od osy kontaktu po osu otáčení ramene, je však zřejmé, že tok proudu je distribuován v prakticky celém objemu ramene mezi kontaktem a připojením flexopasu. Analytické vztahy ale uvažují průchod proudu nekonečně tenkou drahou a úseky navazujícími na sebe v úhlu.
- Úsek č. 6 – flexopas, je uvažován jako přímý, a to od osy uložení ramene po připojení k pevnému pasu mezi kontaktem a bimetalem.
- Jako poslední úsek je uvažován úsek 8, jelikož napravo od něj (v záhybu bimetalu) se nachází feromagnetické jádro elektromagnetu (zkratové spouště). Úseky dráhy, které jsou od ramene pohyblivého kontaktu „odstíněny“ jádrem elektromagnetu tak prakticky neovlivňují vypínací děj – silově nepůsobí na rameno, viz Obr. 3.4.

Tab. 3.1 Charakteristické rozměry dle 3.2.2 až 3.2.4

Úsek 2	dle 3.2.2	$h = 17,2 \text{ mm}$	$l = 48,6 \text{ mm}$	$n = 21,2 \text{ mm}$	$\alpha = 90^\circ$	$m = 0 \text{ mm}$
Úsek 3	dle 3.2.4	$p = 48,5 \text{ mm}$	$m = 21,2 \text{ mm}$	$a = 14,1 \text{ mm}$	$s = 26,2 \text{ mm}$	$n = 0 \text{ mm}$
Úsek 4a	dle 3.2.2	$h = 14,1 \text{ mm}$	$n = 0 \text{ mm}$	$l = 5,1 \text{ mm}$	$\alpha = 90^\circ$	$m = 7 \text{ mm}$
Úsek 4b	dle 3.2.2	$h = 14,1 \text{ mm}$	$n = 0 \text{ mm}$	$l = 22,3 \text{ mm}$	$\alpha = 90^\circ$	$m = 7 \text{ mm}$
Úsek 5	dle 3.2.4	$s = 5,0 \text{ mm}$	$p = 27,3 \text{ mm}$	$a = 7 \text{ mm}$	$m = 0 \text{ mm}$	$n = 0 \text{ mm}$
Úsek 6	dle 3.2.3	$h = 17,3 \text{ mm}$	$n = 0,54 \text{ mm}$	$l = 27,3 \text{ mm}$	$\alpha = 40^\circ$	$a = 3,5 \text{ mm}$
Úsek 7	dle 3.2.4	$a = 11 \text{ mm}$	$p = 27,3 \text{ mm}$	$n = 40,7 \text{ mm}$	$s = 52,4 \text{ mm}$	$m = 0 \text{ mm}$
Úsek 8a	dle 3.2.2	$h = 52,4 \text{ mm}$	$m = 25 \text{ mm}$	$l = 11 \text{ mm}$	$\alpha = 90^\circ$	$n = 0 \text{ mm}$
Úsek 8b	dle 3.2.2	$h = 52,4 \text{ mm}$	$m = 25 \text{ mm}$	$l = 28,4 \text{ mm}$	$\alpha = 90^\circ$	$n = 0 \text{ mm}$

V souladu se vztahy (3.2) až (3.27) jsou vypočítané dílčí příspěvky elektrodynamických sil působících na pohyblivé kontaktní rameno. Pro prostorovou náročnost všech vztahů jsou uvedeny jen výsledky. V předložené práci je uvažování analytického výpočtu pouze pro porovnání se simulační metodou, analytické výpočty na proudovodné dráze MCCB jističe jsou podrobně popsány v [13].



3.3.2 Příspěvky částí proudovodné dráhy

Tab. 3.2 Silové příspěvky jednotlivých úseků proudovodné dráhy

č. úseku	F_{1kA} [mN]	M_{1kA} [mNm]	F_{6kA} [N]	M_{6kA} [mNm]
2	24,5	0,669	0,881	24,08
3	108,9	2,976	3,920	107,14
4a	7,6	0,207	0,273	7,46
4b	-17,8	-0,487	-0,642	-17,54
5	-82,6	-2,257	-2,973	-81,26
6	-22,5	-0,614	-0,809	-22,12
7	1,6	0,083	0,057	2,97
8a	8,4	0,229	0,302	8,26
8b	18,3	0,501	0,661	18,05
Σ	46,4	1,307	1,67	47,04

Pozn. k Tab. 3.2: Uvedené síly a momenty odpovídají protékajícímu proudu 1 kA a 6 kA, přičemž jejich znaménko symbolizuje směr působení; kladné značí směr kolmo k ose ramene v ose kontaktu do zapnutí (proti směru otáčení hodinových ručiček) a záporné značí směr do vypnutí v totožném působišti.

Lze si povšimnout, že výsledná síla od dílčích částí působí stejným směrem jako síla od kontaktní pružiny, zabraňuje tedy vypnutí. Vzhledem k četným zjednodušením se ovšem může jednat o zcela opačný výsledek, než je skutečné působení. Odpověď na danou otázku přinese výsledek simulací v kap. 4.

Výběr proudů o velikostech 1 kA a 6 kA byl učiněn z důvodu, že první ze jmenovaných představuje přibližně hodnotu nadproudu, při němž reaguje okamžitá zkratová spoušť a proud 6 kA představuje maximální proud, jež může reálně po jakkoli krátkou dobu protékat sepnutým jističem dané konstrukce. Dané je způsobeno konečnou dobou nárůstu proudu a jeho silovými účinky, 6 kA tak velmi přibližně představuje velikost proudu, při němž dochází k odskoku kontaktů.

3.3.3 Odpudivá síla v kontaktním styku

Zadané parametry kontaktní dvojice:

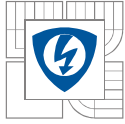
- přitlačná síla $F_k = 6,5$ N

Materiál pevného kontaktu je směs stříbra a grafitu dle 2.1. Označení AgC5 představuje 95 % hmotnostní podíl stříbra s 5 % podílu uhlíku, jeho tvrdost dle Meyera je $H_M = 420$ MPa [9]

Materiál pohyblivého kontaktu je označen jako Ag35WC65 (dle 2.2), obsahuje 35 % stříbra a 65 % wolfram karbidu, jeho tvrdost dle Meyera je $H_M = 1600$ MPa [9]

Dle Holmova vztahu viz rov. (3.2), je nutné znát rozměry styčných ploch kontaktů, jež jsou:

- 4 x 6 mm u pohyblivého kontaktu
- 6 x 6 mm u pevného kontaktu



Z daného dle rov. (3.3) vychází průměr náhradní polokoule:

$$D \approx \sqrt{a \cdot b} = \sqrt{4 \cdot 6} = 4,9 \text{ mm} \quad (3.28)$$

Idealizovaný průměr kruhové stykové plochy d je poté:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_k}{\pi \cdot H_M}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,5}{\pi \cdot 420 \cdot 10^6}} = 0,14 \text{ mm} \quad (3.29)$$

Pozn.: Ve výpočtu výše je uvažována tvrdost toho kontaktního členu, jenž ji má nižší.

Výsledná úžinová odpudivá síla mezi oběma kontaktními členy při proudu 1 kA:

$$F_k = 10^{-7} \cdot I_k^2 \cdot \ln \frac{D}{d} = 10^{-7} \cdot 1000^2 \cdot \ln \frac{4,9}{0,14} = -355,5 \text{ mN} \quad (3.30)$$

Pozn.: Znaménko síly odpovídá směru do vypnutí, totožně jako v kap. 3.3.2.

Zřejmě při proudu 6 kA nabývá výsledná úžinová odpudivá síla mezi oběma kontaktními členy velikosti:

$$F_k = 10^{-7} \cdot I_k^2 \cdot \ln \frac{D}{d} = 10^{-7} \cdot 6000^2 \cdot \ln \frac{4,9}{0,14} = -12,8 \text{ N} \quad (3.31)$$

3.3.4 Výsledné silové působení na pohyblivé rameno

Tab. 3.3 Příspěvky síly od proudovodné dráhy a kontaktní úžiny

Výsledné působení od proudovodné dráhy	$\Sigma F_{p,1kA}$ [mN]	46,4	$\Sigma F_{p,6kA}$ [N]	1,67
Příspěvek od kontaktní úžiny	$F_{k,1kA}$ [mN]	-355,5	$F_{k,6kA}$ [N]	-12,8
Výsledná síla	ΣF_{1kA} [mN]	-309,1	ΣF_{6kA} [N]	-11,1

Výsledná síla má tedy směr do vypnutí, přičemž dle výpočtů je zřejmé, že příspěvek od kontaktní úžiny je řádově vyšší, než celková suma příspěvků od dílčích částí proudovodné dráhy. Přesnost analytického výpočtu elektrodynamických sil v jističi je tedy prakticky daná jen přesností výpočtu úžinové síly. Předmětem další kapitoly tedy bude počítačová simulace elektrodynamických sil v jističi za pomoci software užívajícího metodu konečných prvků, jež však nedovoluje přesnější zjištění úžinových sil. Poskytne tedy lepší náhled na vliv blízkých feromagnetik.

Při silovém působení viz Tab. 3.3 v případě proudu 6 kA je zřejmé, že za daných podmínek již dochází k odskoku kontaktů, pravděpodobně bude tedy hranice ležet níže, přibližně okolo 4 kA.

Výpočty v této kapitole *neuvažují žádné nelinearity prostředí²*, síla či moment působící na rameno je tedy vypočitatelná ve tvaru: $F = k \cdot I^2$, kde k je charakteristická vazební konstanta (silová). S pomocí uvedené konstanty lze zpětně dopočítat přibližnou hodnotu proudu, při kterém dochází k oddalování kontaktů (bez uvažování spínacího mechanismu).

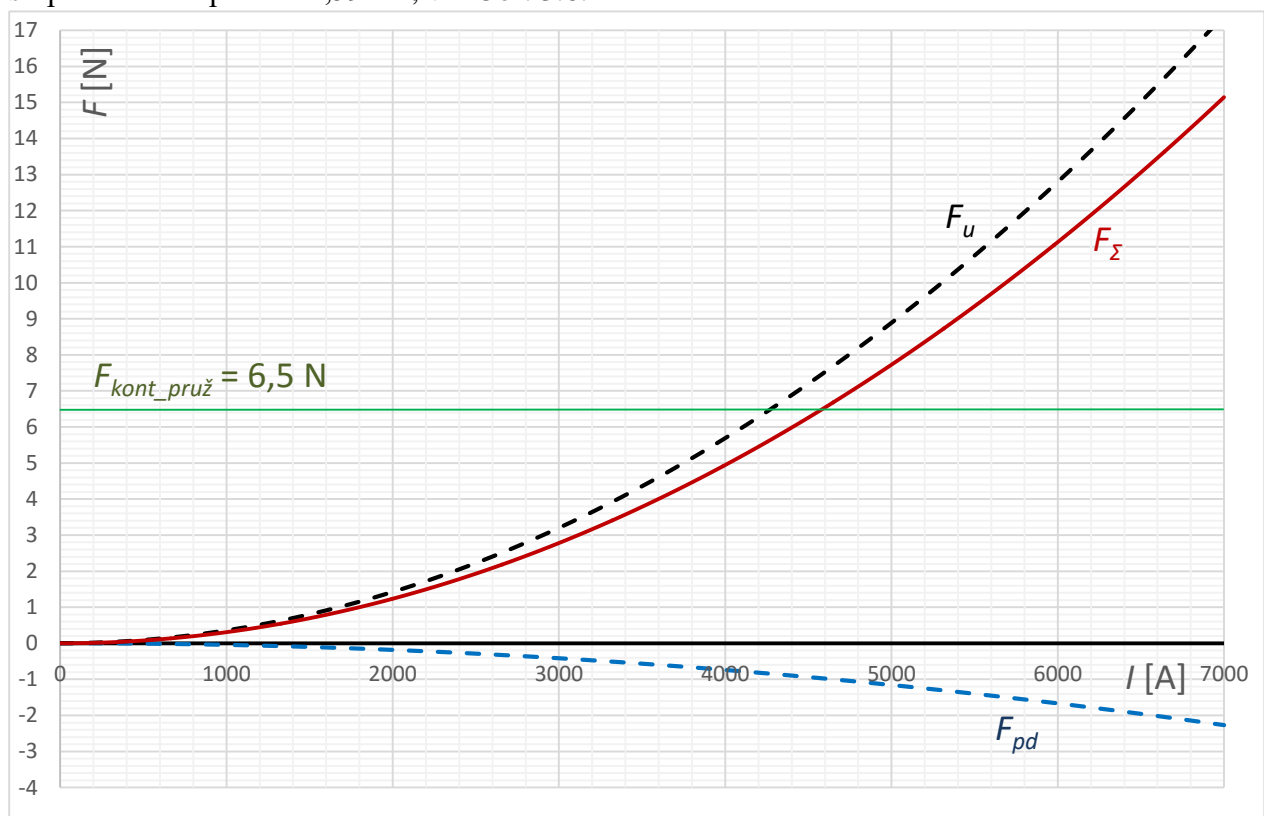
Z Tab. 3.3 je vazební silová konstanta: (nyní již uvažována kladná do otevření)

$$k_F = \frac{F_{1kA}}{1000^2} = \frac{-0,3091}{1 \cdot 10^6} = 309,1 \cdot 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} \quad (3.32)$$

K oddalování kontaktu dochází při překonání síly od kontaktní pružiny $F_k = 6,5 \text{ N}$. Proud, při kterém započne oddalování má velikost:

$$I_o = \sqrt{\frac{F_k}{k_F}} = \sqrt{\frac{6,5}{309,1 \cdot 10^{-9}}} = 4,59 \text{ kA} \quad (3.33)$$

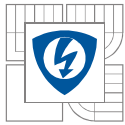
Podle analytických výpočtů bude docházet k odskoku kontaktů vlivem elektrodynamických sil při velikosti proudu 4,59 kA, viz Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Závislost elektrodynamických sil na proudu, dle analytických výpočtů

Na obrázku výše si lze všimnout opačného směru působení obou výpočtových složek. Zatímco Holmova síla je vždy jednoznačně odpudivá, tak složka od proudovodné dráhy může být i záporná. Výpočtová hodnota velmi zkreslená, přesnější výsledky poskytne simulace, viz 4.4.

² Je zřejmé, že v magneticky nelineárním prostředí (případ feromagnetik) dochází při určitých intenzitách magnetického pole k lokálnímu přesycení. Následně již neplatí udaná závislost síly na kvadrátu protékajícího proudu, ale mocnina v udaném vztahu nabývá hodnoty poněkud menší než 2, nikdy však menší než 1. Důsledky udané závislosti lze vidět v kapitole 4.



4 SIMULACE ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL UŽITÍM MKP

4.1 ANSYS Maxwell

Je pokročilý simulační software vhodný pro simulování nízkofrekvenčních elektromagnetických polí. Je vhodný pro řešení a analýzu 2-D a 3-D elektromagnetických a elektromechanických zařízení, včetně motorů, akčních členů, transformátorů, senzorů i tlumivek. Maxwell používá přesné metody konečných prvků k řešení statických, frekvenčně závislých i časově závislých elektromagnetických a elektrických polí. [20]

V simulačním prostředí daného programu lze ověřit jen složku síly vyvolanou dílčími úseky proudovodné dráhy včetně vlivu prostředí, převážně vlivu blízkých feromagnetik, zejména zhášecí komory. Dané prostředí ale neumožňuje simulovat úžinové síly, model je tedy potřeba upravit tak, aby kontaktní styk odpovídal celému průřezu pohyblivého kontaktu a k výsledné síle je následně přičtena síla Holmovy síly vypočítané v kap. 3.3.3.

Ve 3. kapitole bylo uvažováno magneticky lineární prostředí, síla i moment byly závislé jen na kvadrátu protékajícího proudu. Nyní je však do modelu přiřazena i zhášecí komora z feromagnetických plechů, jež jsou zřejmě nelineární, viz Obr. 4.1. Simulace bude tedy provedena pro několik hodnot proudu, pro zaznamenání vlivu nelineárního prostředí.

4.2 Model proudovodné dráhy

4.2.1 Materiály

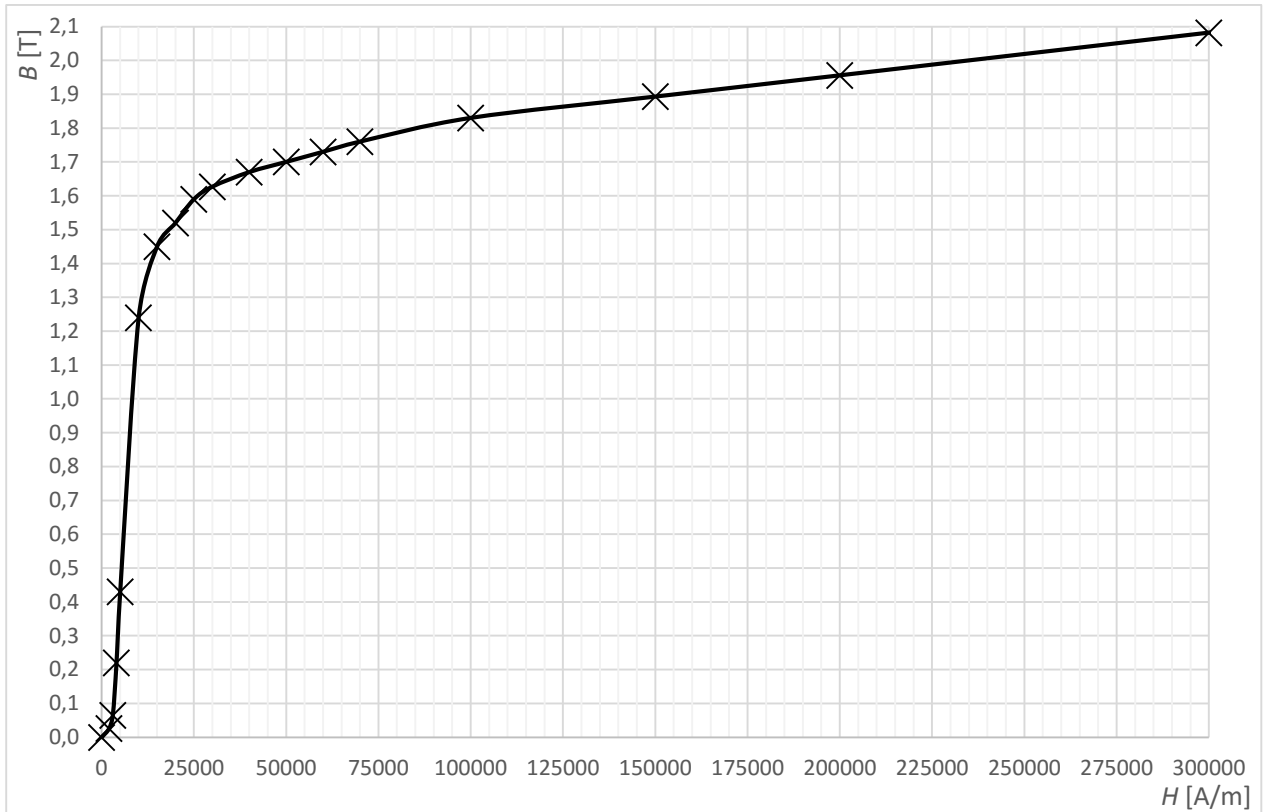
Pro účely magnetostatické analýzy mají materiály v Maxwellu následující parametry:

- Relativní permeabilita μ_r či B - H křivka
- Měrná elektrická vodivost σ [$S \cdot m^{-1}$]
- Koercitivní síla H_c [$A \cdot m^{-1}$] (k popisu permanentních magnetů, jež zřejmě nejsou součástí zkoumané proudovodné dráhy)

V modelu byly použity následující materiály:

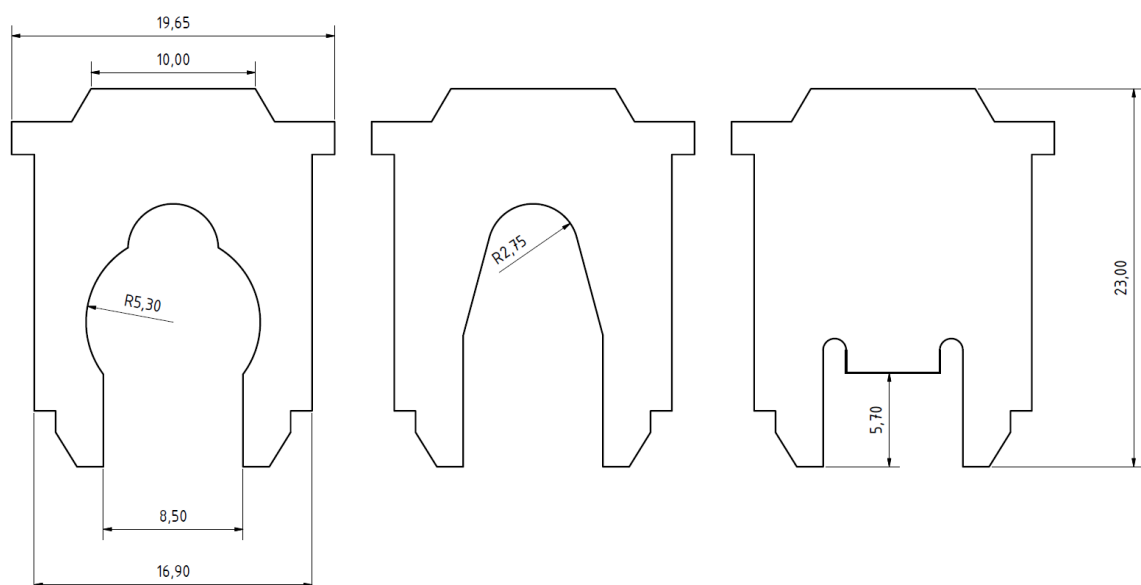
Tab. 4.1 Použité materiály a jejich vlastnosti

Materiál	μ_r	σ	H_c	Součásti v modelu, dle Obr. 2.1
	[-]	[$S \cdot m^{-1}$]	[$A \cdot m^{-1}$]	
feromag. ocel	B-H křivka	$2 \cdot 10^6$	0	zh. komora, mag. obvod spuště
AgC5	1	$31 \cdot 10^6$	0	pevný kontakt
AgWC65	1	$23 \cdot 10^6$	0	pohyblivý kontakt
Měď	0,999991	$58 \cdot 10^6$	0	všechny pasy a kontaktní rameno
Nikelin	1	$2,5 \cdot 10^6$	0	topítko
Zinek	1	$16,7 \cdot 10^6$	0	bimetal
Vakuum	1	0	0	okolí modelu



Obr. 4.1 B-H křivka materiálu lamel zhášecí komory a magnetického obvodu termomagnetické spouště

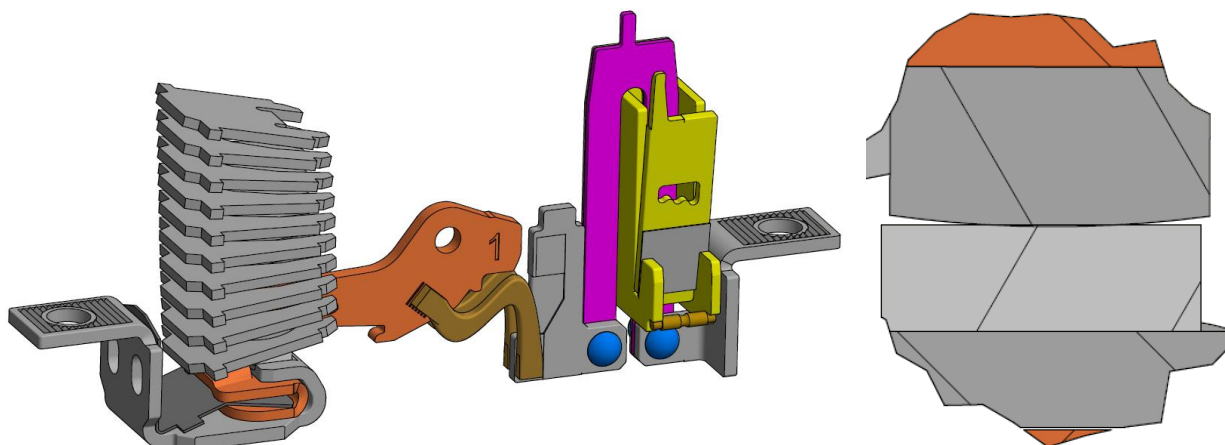
Pro účely simulace byla vymodelována zhášecí komora na základě předloženého jističe. Komora sestává z 10 ocelových lamel tloušťky 1,5 mm s magnetickými vlastnostmi dle Obr. 4.1. Spodní a horní lamela je rozdílně tvarovaná od lamel prostředních, Obr. 4.2. Lamely jsou od sebe vzdáleny v zadní části 2,8 mm a v přední části přibližně 1,6 mm, jsou tedy řazeny paprskovitě, viz Obr. 4.3.



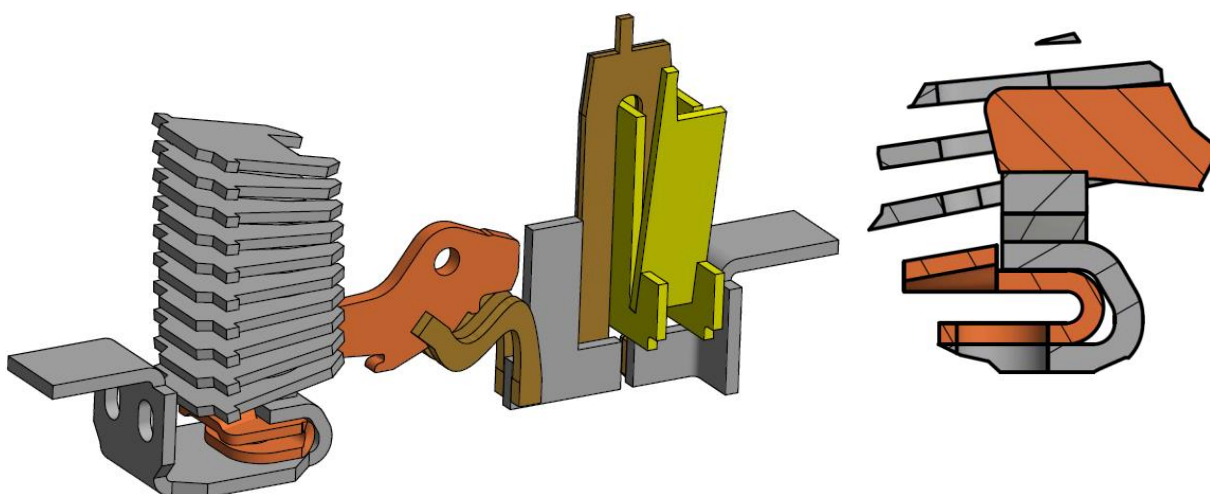
Obr. 4.2 Lamely zhášecí komory zleva: spodní, prostřední (2. až 9.) a horní

4.2.2 Zjednodušení modelu

Celkový model proudovodné dráhy byl zjednodušen a některé části byly vynechány. Byla eliminována zaoblení hran, vyražené texty na některých součástech či detailní konstrukční úpravy, jež v makroskopickém měřítku nemají význam. Bylo tak uskutečněno z důvodu zkrácení výpočetního času, jelikož bude provedeno 18 dílčích simulací. Úpravy nemají výrazný vliv na přesnost výpočtu, jelikož se jednalo o velmi detailní prvky, viz porovnání na *Obr. 4.3* a *Obr. 4.4*.



Obr. 4.3 Konstrukční model proudovodné dráhy jističe s detailem kontaktního styku [15]



Obr. 4.4 Zjednodušený model proudovodné dráhy jističe (pro simulaci) [15]

Na *Obr. 4.3* a *Obr. 4.4* výše lze pozorovat změny v modelu pro účely simulace včetně detailů kontaktního styku, jmenovitě byly odstraněny komponenty:

- izolační plastová vložka u přívodního pasu
- nýty spojující topítka a bimetal s vývodním a spojovacím pasem
- vratná pružina kotvy elektromagnetu a její hřídel
- plastový štítek na kotvě elektromagnetu (součásti viz popis na *Obr. 2.1*)

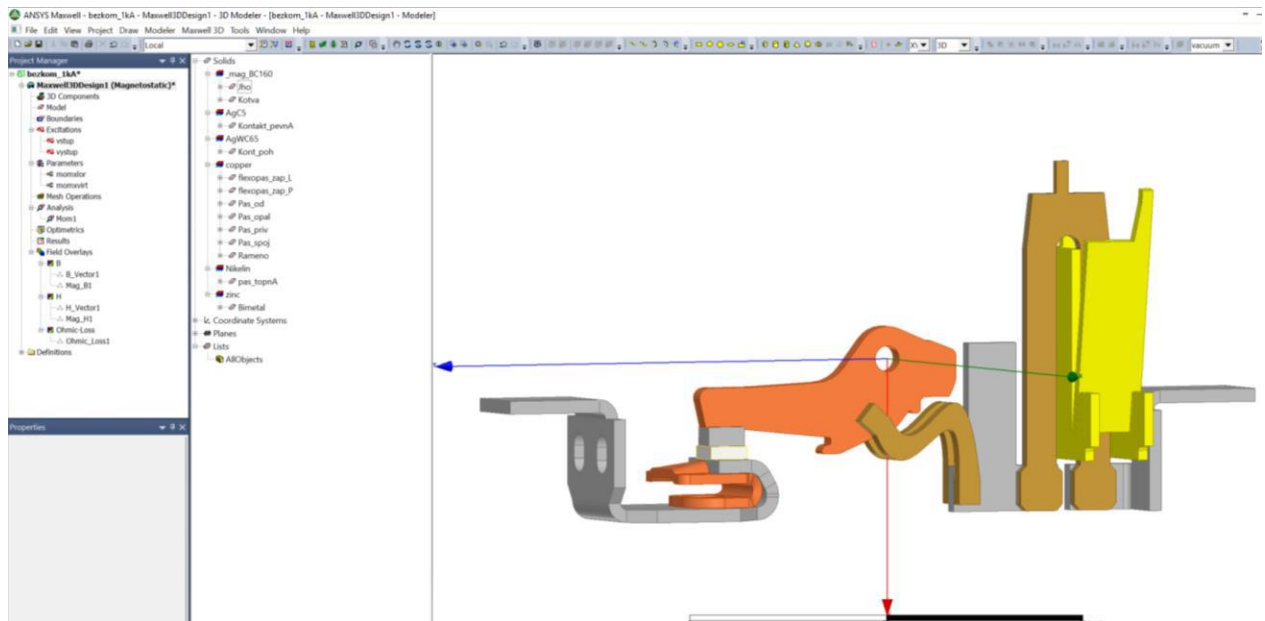
Dále byly odstraněna všechna malá zaoblení zanedbatelných dimenzí. Taktéž byly „odstraněny“ díry M6 na přívodním i výstupním pasu. Na přívodním i výstupním pasu v oblasti připojení vodičů byly „zahlazeny“ vroubkované plochy, podobně jako vroubkování na

pohyblivém rameni a propojovacím pasu v místě připájení flexopasu. Významnou změnou je „zarovnání“ pohyblivého kontaktu tak, aby kontaktní styk představoval celou plochu jeho průřezu, jelikož skutečná styková plocha je neznámá. Danou úpravou je zaručeno, že výsledná síla (či moment) vypočítaná v programu je daná čistě tvarem proudovodné dráhy a vlastnostmi okolního prostředí. MKP software neumožňuje výpočet Holmových sil.

4.3 Import a nastavení simulace

Následuje stručný postup simulace elektrodynamických sil na modelu reálné dráhy, podrobný návod včetně tvorby 3D modelu přímo v prostředí Maxwell lze v anglickém jazyce nalézt v [24].

1. 3D model proudovodné dráhy uložit ve formátu .iges pro potřeby SW Maxwell
2. Importovat model: V kartě *Modeler* → *Import*
3. Přiřadit dílčím částem materiál z knihovny materiálů, popř. vytvořit materiál nový s požadovanými parametry, viz Obr. 4.5, materiály viz Tab. 4.1.



Obr. 4.5 Nastavení vlastností modelu v softwarovém prostředí Maxwell

4. V záložce *Maxwell 3D* vybrat možnost *Solution type...* a zaškrtnout *Magnetostatic*
5. V záložce *Maxwell 3D* vybrat *Analysis setup* a dále *Add solution setup*, kde lze nastavit požadovanou přesnost výsledku, maximální a minimální počet iteračních kroků atd. V našem případě nastaveno minimálně 2, maximálně 10 iteračních kroků. Požadovaná přesnost: 1%.
6. V záložce *Maxwell 3D* vybrat položku *Excitations* a dále *assign*. Označí se plocha vstupu a výstupu elektrického proudu a zadá se jeho hodnota; v našem případě zvolena čela přívodního a výstupního pasu, viz Obr. 4.6.
Pozn.: Roviny vstupu a výstupu proudu zároveň definují okraje uvažované oblasti simulace, detailněji v [24].



Obr. 4.6 Vstup a výstup proudu do modelu

7. V záložce *Maxwell 3D* vybrat položku *Parameters, assign* a vybrat *Force* či *torque* (síla a moment), v našem případě je směrodatná hodnota momentu působícího na rameno pohyblivého kontaktu. Pro dané účely je nutné založit nový souřadnicový systém a jeho střed vložit do středu rotačního uložení ramene, viz Obr. 4.5. Po vypočtené simulaci je ve výsledcích uvedena číselná hodnota působeného momentu v nastavené ose souřadného systému, v našem případě osa x .
8. Je-li požadavek na grafické znázornění rozložení magnetické indukce, intenzity magnetického pole či ohmických ztrát, lze v levé části v nabídce *Project manager* přidat požadavek v položce *Field Overlays* na vykreslení libovolného grafu. Ukázky grafických znázornění vybraných veličin jsou předvedeny na Obr. 4.8, Obr. 4.9 a Obr. 4.10.
9. Kolem modelu je potřeba vytvořit výpočetní oblast taktéž s danými parametry (vakuum), v horním panelu vybrat položku *Draw* a dále *Region*. *Region* je možné zadat jako kvádr o délce stran relativně k velikosti importovaného modelu, v našem případě zvoleno 300% v obou směrech osy x a 80% v obou směrech osy z . Hranice v ose y jsou pevně zvoleny jako plochy vstupu a výstupu elektrického proudu, viz bod 6.
10. Dále lze upravovat možnosti sítě (angl. *Mesh*) v části *Project manager*, spokojí-li se uživatel se softwarově vytvořenou sítí, nemusí tuto položku vyhledávat. Sít' je spojení bodů, v nichž jsou maticově počítány hodnoty intenzity charakteristických veličin (polí), na spojnicích sousedních bodů jsou poté dané hodnoty dopočítávány. Přesnost simulace je na hustotě sítě zřejmě závislá, ale výpočetní výkon, a z toho plynoucí výpočetní čas, jsou na volbě hustoty sítě velmi citlivé. V našem případě je ponechána možnost automatické volby hustoty sítě.
11. Předposledním krokem před provedením simulace je kontrola modelu a všech nastavení volbou *Maxwell 3D* → *Validation check*. Není-li programem zjištěna žádná chyba, lze zadat pokyn k simulaci ve stejné nabídce: *Analyze all*.
12. Po průběhu simulace lze numerické výsledky získat v nabídce *Maxwell 3D* → *Results* → *Solution data*; výsledky prostorového rozložení intenzity zadaného pole lze získat v nabídce *Project manager* → *Field Overlays*.

4.4 Výsledky simulací

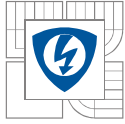
Bylo provedeno celkem 18 simulačních výpočtů, s uvažovanými proudy velikostí:

160 A, 500 A, 1 kA, 2 kA, 3 kA, 4 kA, 5 kA, 6 kA, 7 kA.

Na dvou konfiguracích modelu:

- s uvažováním zhášecí komory
- bez zhášecí komory

Simulace neuvažující zhášecí komoru byly provedeny pro porovnání výsledků s analytickými výpočty v kap. 3 a také pro zjištění reálného vlivu zhášecí komory na výslednou sílu. Prostým



porovnáním dvou hodnot momentů při stejném protékajícím proudu lze zjistit příspěvek síly právě od zhášecí komory.³

Výsledné hodnoty momentů, resp. sil, působených na pohyblivé kontaktní rameno jsou uvedeny v Tab. 4.2.

Tab. 4.2 Výsledné silové působení na pohyblivé kontaktní rameno získané MKP simulací

I	M_{b_zhk}	F_{b_zhk}	M_{s_zhk}	F_{s_zhk}	M_{zhk}	F_{zhk}
[A]	[mNm]	[N]	[mNm]	[N]	[mNm]	[N]
160	0,10	0,00	0,17	0,01	0,06	0,00
500	1,01	0,04	2,31	0,08	1,30	0,05
1000	4,04	0,15	11,16	0,41	7,11	0,26
2000	16,31	0,60	47,45	1,74	31,15	1,14
3000	36,73	1,34	102,88	3,76	66,14	2,42
4000	65,18	2,38	171,90	6,29	106,72	3,91
5000	101,88	3,73	252,01	9,22	150,13	5,49
6000	146,75	5,37	341,96	12,51	195,22	7,14
7000	199,77	7,31	440,99	16,14	241,22	8,83

Pozn.: Kladné znaménko u sil i momentů značí směr **do otevření**. Význam indexů: „ b_zhk “ značí model bez zhášecí komory; „ s_zhk “ značí model uvažující zhášecí komoru; „ zhk “ značí absolutní podíl zhášecí komory na daném působení při daném proudu.

Výsledky ze simulací jsou elektrodynamické momenty působené na kontaktní rameno ve vztahu k jeho ose otáčení. S ohledem na znalost síly kontaktní pružiny se tedy zaměříme na hodnotu síly v ose kontaktního styku. Taktéž v kapitole 3 bylo počítáno se silami v ose kontaktů. Silové působení uvedené v Tab. 4.2 je zřejmě při známé délce ramene od osy otáčení po osu kontaktního styku $l_r = 27,33$ mm vypočítané jako (příklad výpočtu pro 5kA, model s komorou, viz Tab. 4.2):

$$F_{s_zhk} = \frac{M_{s_zhk}}{l_r} = \frac{252,01 \cdot 10^{-3}}{27,33 \cdot 10^{-3}} = 9,22 \text{ N} \quad (4.1)$$

Závislost elektrodynamické síly (působené na kontaktním rameni v ose kontaktního styku) na velikosti protékajícího proudu je vykreslena na Obr. 4.7. Pro relativní srovnání je vynesena velikost přitlačné síly kontaktní pružiny. Taktéž je vynesena příspěvek síly od zhášecí komory, jakožto blízkého feromagnetika.

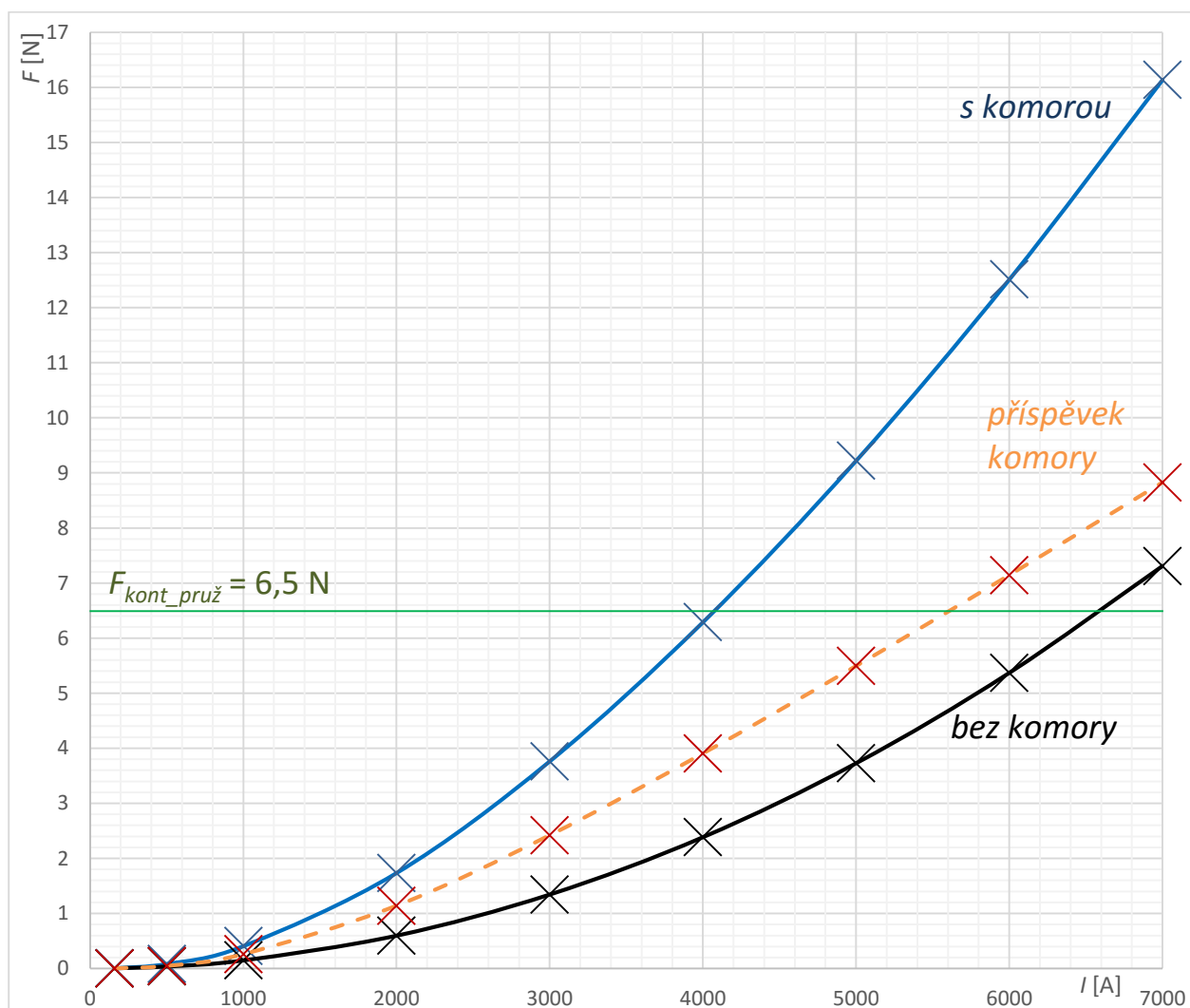
Na daném grafu lze vidět, že již při velikosti proudu cca 4100 A dochází k překonání přitlačné síly od pružiny silou elektrodynamickou a tak by teoreticky docházelo k oddálení pohyblivého kontaktu. Pro hodnotu proudu $I = 4$ kA budou následně vykreslena rozložení intenzity magnetického pole a magnetické indukce, jelikož se prakticky jedná o maximální uvažovaný proud sepnutého kontaktního systému.

Lze taktéž pozorovat výrazný vliv zhášecí komory, kdy její silový příspěvek je větší, než součet příspěvků všech částí proudovodné dráhy (bez uvažování Holmovy síly). V kapitole 3 byl

³ Vlivem nelinearity feromagnetika nelze již interpolovat či extrapolovat hodnoty momentu jak bylo provedeno v kap. 3.3. Příspěvek od komory při daném proudu je ale jednoduše výše zmíněným způsobem zjistitelný.

tedy zanedbán důležitý prvek, analyticky však nevypočitatelný. Na průběhu silového příspěvku od zhášecí komory lze pozorovat vliv jejího přesycení již od cca 3 kA, při vyšších proudech je přírůstek příspěvku síly již prakticky lineární s rostoucím proudem.

Na průběhu silového příspěvku od proudovodné dráhy (bez komory) lze vidět její kvadratickou závislost na protékaném proudu.

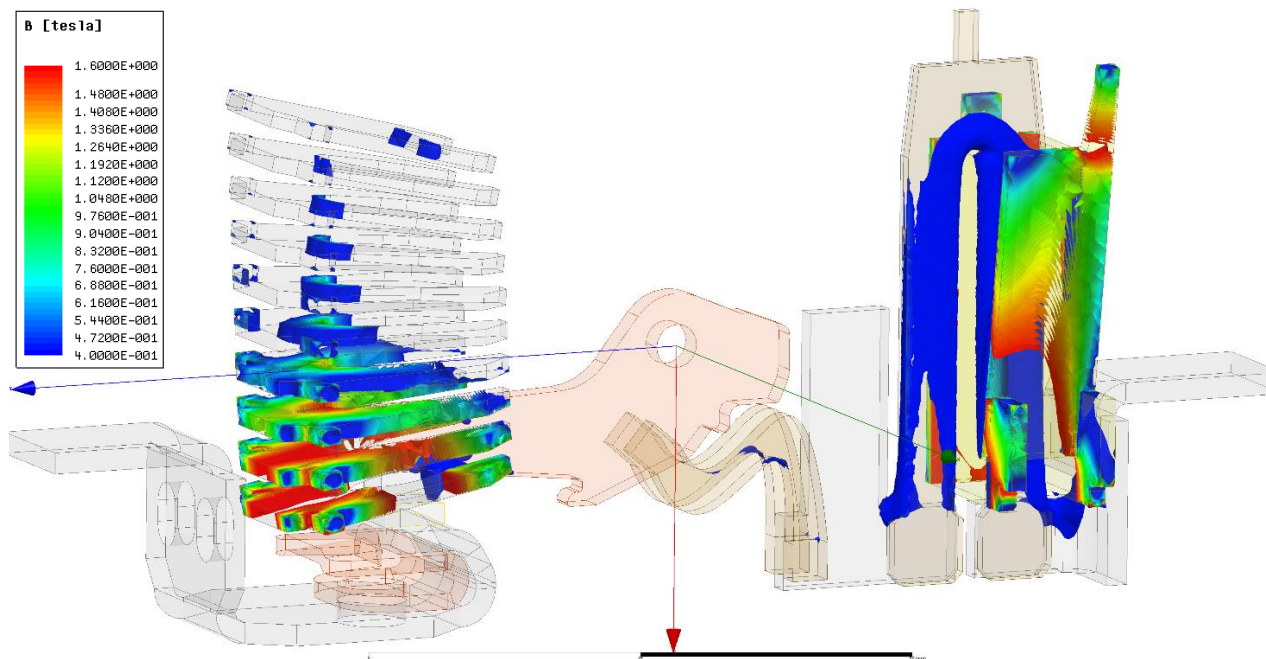


Obr. 4.7 Závislost elektrodynamické síly na proudu z MKP simulací

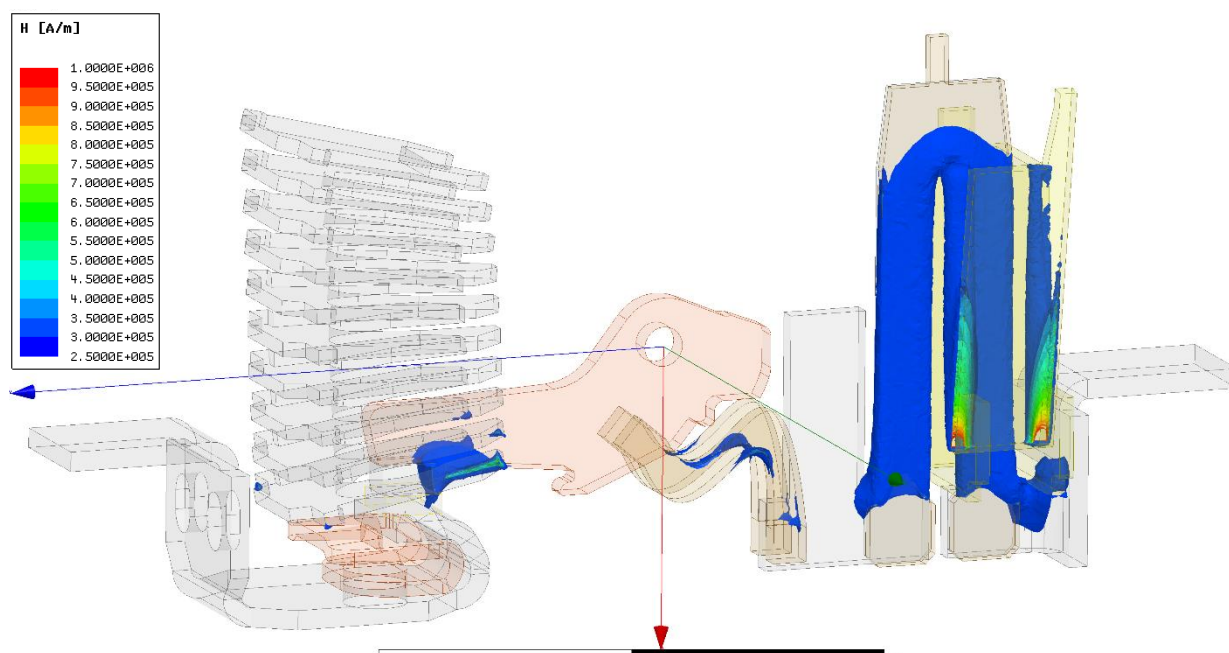
Na Obr. 4.8 až Obr. 4.10 lze pozorovat prostorové rozložení charakteristických veličin v modelu proudovodné dráhy při protékajícím proudu 4 kA.

Na rozložení magnetické indukce v Obr. 4.8 byl pro přehlednost zvolen rozsah 0,4 – 1,6 T. Spodní hranice byla zvolena vyšší než 0 pro „odfiltrování“ míst s nízkou indukcí, přes něž by v modelu nebyla vidět místa s indukcí vyšší (průhlednost vrstev není v modelu nastavitelná). Horní hranice 1,6 T poté odpovídá přibližně bodu nasycení feromagnetika, viz Obr. 4.1. Lze pozorovat přesycení spodních lamel zhášecí komory a poté část jha a kotvy termomagnetické spouště. Přesycení lamel zhášecí komory má za následek snížení strmosti nárůstu elektrodynamické síly působené na kontaktní rameno při vyšších proudech.

Na Obr. 4.9 je vykresleno prostorové rozložení intenzity magnetického pole. Intenzita magnetického pole je zřejmě proporcionální k magnetické indukci v magneticky lineárním prostředí. V případě feromagnetik, jakožto výhradně nelineárních materiálů, dané neplatí, a tak lze podobně jako na Obr. 4.8 pozorovat místa s lokálním přesycením – lamely zhášecí komory v bezprostřední blízkosti kontaktního ramene a spodní část kotvy termomagnetické spouště. Uvedený obrázek je spíše ilustrativní.



Obr. 4.8 Prostorové rozložení magnetické indukce při proudu 4 kA

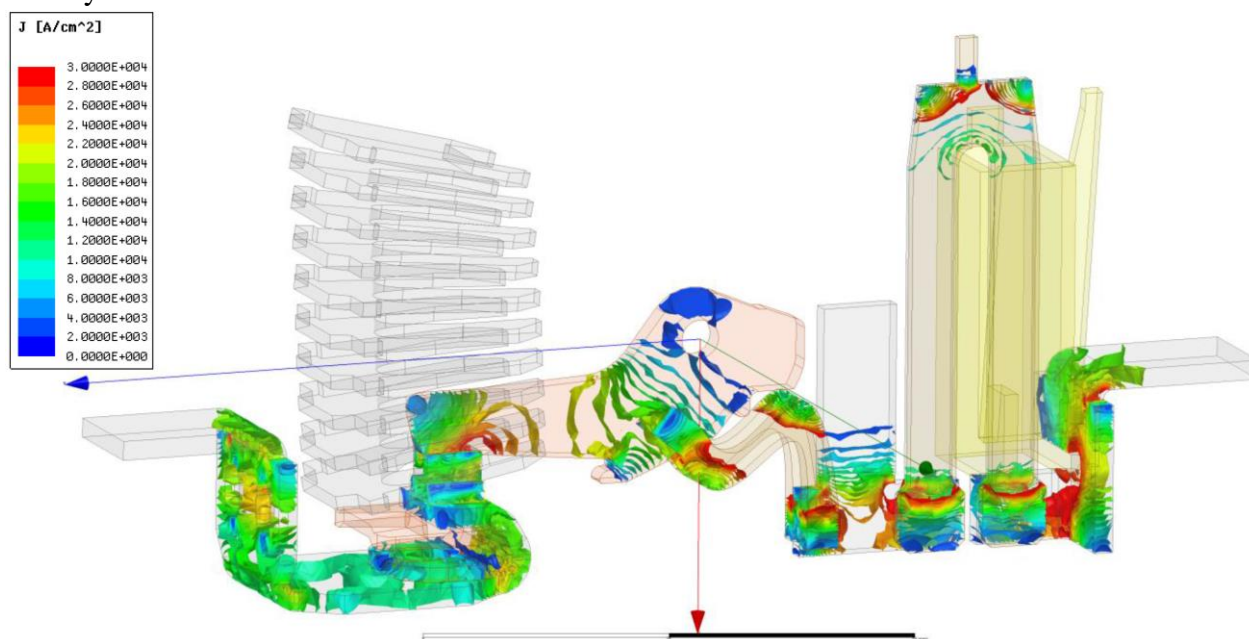


Obr. 4.9 Prostorové rozložení intenzity magnetického pole při proudu 4 kA

Na Obr. 4.10 jsou znázorněny „ekvipotenciální“ plochy proudové hustoty v proudovodné dráze. Lze pozorovat nejvýraznější zhuštění proudu v okolí pohyblivého kontaktu a v záhybech na

flexopasu, bimetalu a místech propojení dílčích částí. Z neznámých důvodů SW Maxwell neumožňuje volbu stupnice v jednotkách proudové hustoty J [$A \cdot mm^{-2}$]. Obrázek je předložen převážně z ilustrativních důvodů. Lze si povšimnout, že oblast kontaktního styku nevykazuje nikterak vysoké hodnoty proudové hustoty, což je ovlivněno úpravou modelu s kontaktním stykem v celém průřezu kontaktu.

V reálné proudovodné dráze je kontaktní styk právě místem s největší hodnotou proudové hustoty.

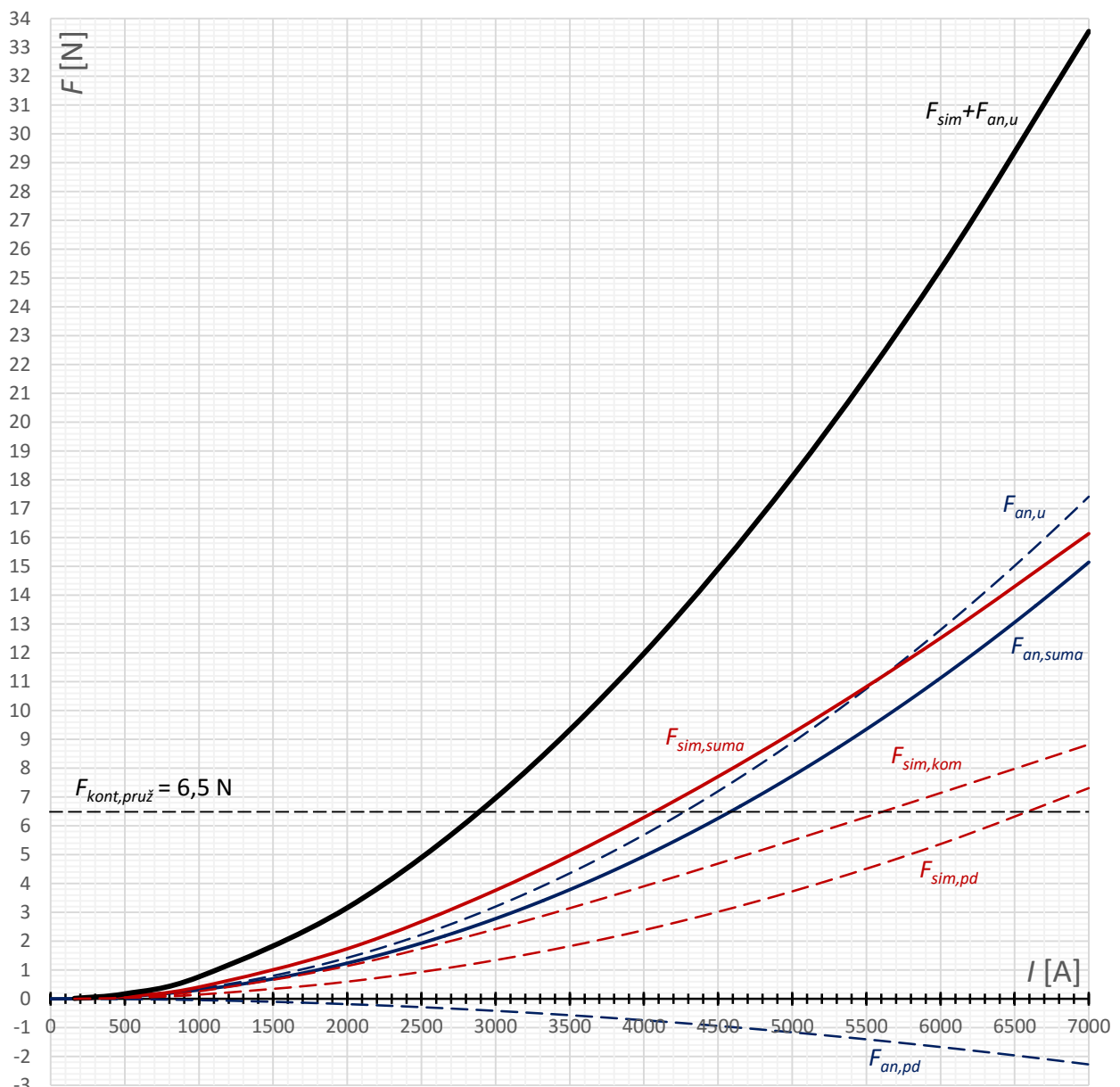
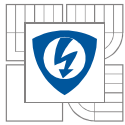


Obr. 4.10 Prostorové rozložení proudové hustoty při proudu 4 kA

Lze si povšimnout, že proudová hustota nenabývá vysokých hodnot v kontaktním styku, což je způsobeno pouze úpravou modelu pro výpočet elektrodynamických sil. Je zřejmé, že v reálné proudovodné dráze je právě kontaktní styk místem s nejvyšší proudovou hustotou.

4.5 Porovnání výsledků

V kapitolách 3 a 4 byly počítány elektrodynamické síly na pohyblivý kontakt totožného jističe. V případě analytických výpočtů byly uvažovány dvě složky celkového působení, a to složka od proudovodné dráhy a složka úžinové síly. Simulační prostředí ale neumožňuje výpočet úžinové síly, byla tedy simulována jen složka proudovodné dráhy, ale na rozdíl od analytických výpočtů byla uvažována zhášecí komora z feromagnetických plechů, jejíž příspěvek byl pro souhrnné porovnání separován a jev magnetického přesycení diskutován. Na Obr. 4.11 lze vidět grafickou závislost složek vypočítaných a simulovaných elektrodynamických sil na hodnotě protékajícího proudu.



Obr. 4.11 Grafické porovnání analytických výpočtů a simulace

Pozn.: význam indexů: *an* – analytický výpočet, *sim* – simulace, *pd* – proudovodná dráha, *u* – úžinová síla, *suma* – součet dílčích složek získaných jednou metodou, *kom* – složka zhášecí komory.

V grafu výše lze pozorovat, že zatímco složka síly od proudovodné dráhy vypočítaná analyticky posiluje kontaktní přítlak, tak totožná složka vypočítaná simulací působí do otevření. Pouze tyto hodnoty mohou být přímo porovnány, je tedy zřejmé, že analytické výpočty mohou poskytnout velmi zkreslené informace. Jsou uvedeny složky síly z analytických výpočtů.

Nově je zavedena síla, jež sestává z úžinové síly vypočítané analyticky a síle od proudovodné dráhy a zhášecí komory získané simulací. Tato hodnota pravděpodobně nejpřesněji odpovídá skutečné síle působící na pohyblivé rameno v sepnutém stavu. K nadskoku kontaktů by tak docházelo při okamžité hodnotě proudu $I = 2900$ A.

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ÚŽINOVÉ SÍLY

5.1 Motivace

Doposud byla v práci uvažována četná zjednodušení. Analytické výpočty jsou pro svoje zjednodušení vhodné k velmi rychlému výpočtu silových poměrů na jednoduchých proudovodných drahách obklopených magneticky lineárním prostředím. Vliv rozložení proudové hustoty ve složitěji tvarované proudovodné dráze stejně jako vliv okolního prostředí lze s dostatečnou přesností kvalifikovat pomocí simulačního software. Vyskytl se tedy požadavek na ověření přesnosti výpočtu úžinové kontaktní síly, uvedeného poprvé R. Holmem v prvním vydání knihy [14]. Od r. 1958 je uvedený výpočtový vztah beze změn citován v odborné literatuře zabývající se elektrickými kontakty, mimo mnoha dalších např. [3],[9],[17],[18].

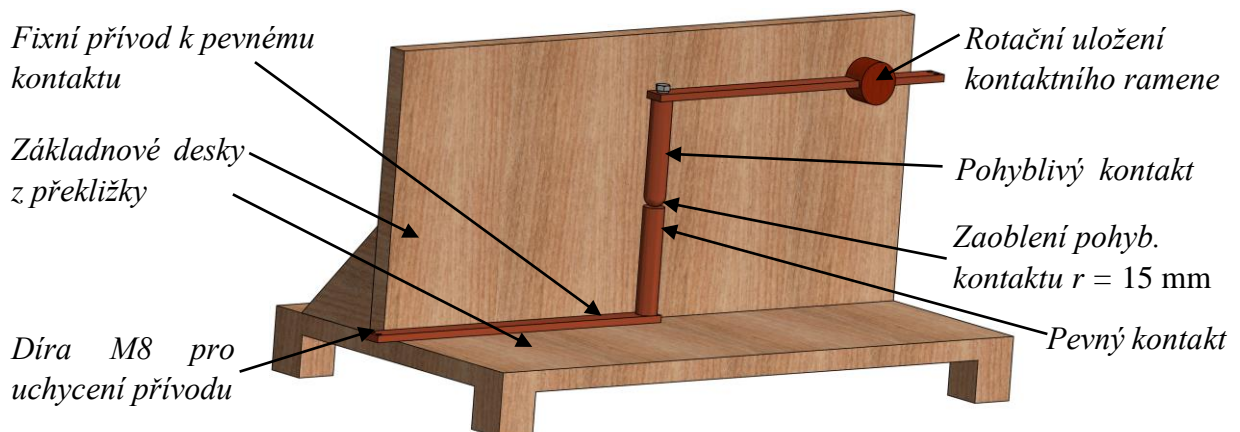
Na přípravku by mělo být umožněno změřit velikost proudu, při které dochází k oddalování pohyblivého kontaktu, s možností změny přítláčné kontaktní síly.

5.2 Konstrukční návrh experimentálního přípravku

Primárním požadavkem na experiment je co možná nejmenší ovlivnění samotného měření okolním prostředím či tvarem proudovodné dráhy (záhyby). Ideálním případem by byla naprosto přímá dráha výrazné délky obklopená prostředím s relativní permeabilitou $\mu_r = 1$. Realizace kontaktního styku s možností oddalování pohyblivého kontaktu je ale v tomto případě nemožná. Bylo tedy zvoleno rotační uložení pohyblivého kontaktního ramene, umožňující jeho oddalování při překonání přítláčných sil silami odpudivými – elektrodynamickými, rameno tak má jeden stupeň volnosti. K dispozici konstrukce experimentu jsou součásti:

- měděná tyč kruhového průřezu o délce $l = 300$ mm a průměru $d = 30$ mm
- měděná tyč obdélníkového průřezu o délce $l = 500$ mm a profilu 30x10 mm
- měděná tyč obdélníkového průřezu o délce $l = 500$ mm a profilu 25x10 mm

S ohledem na dostupný materiál pro konstrukci proudovodné dráhy bylo navrženo experimentální uspořádání, ilustrativně zobrazeno na Obr. 5.1.

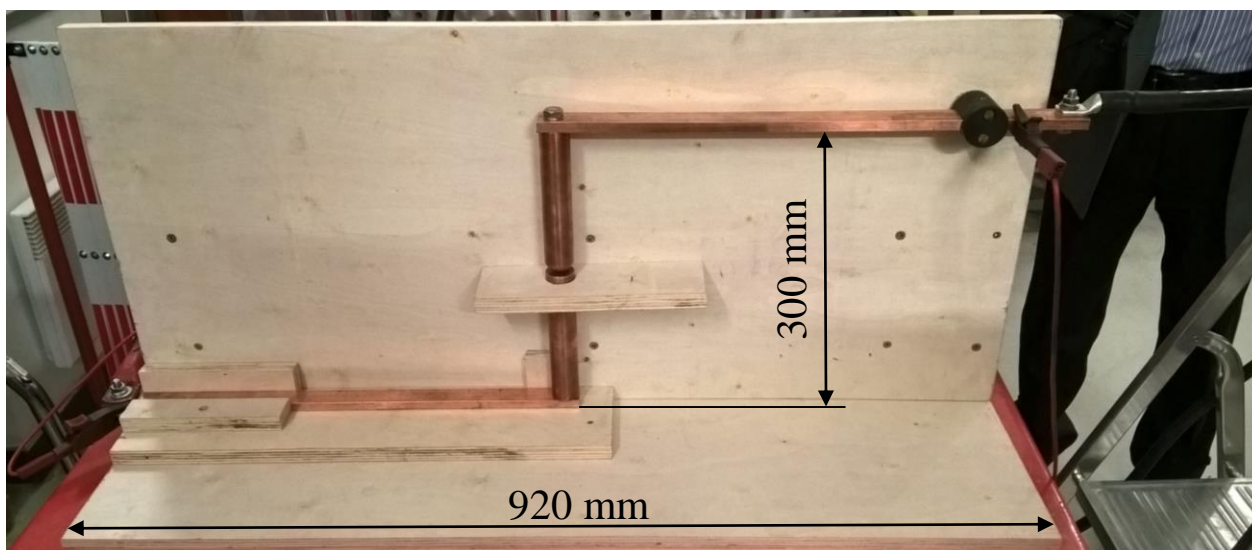


Obr. 5.1 Konstrukční návrh experimentálního uspořádání

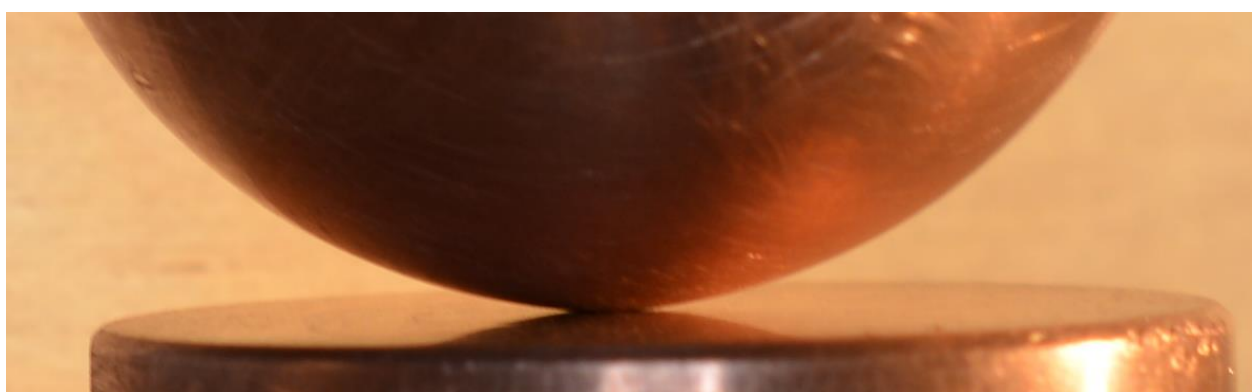
Na základě konstrukčního návrhu byl vyhotoven experimentální přípravek. Postup konstrukce i s detailním popisem dílčích částí viz následující kapitola 5.3. Konstrukční výkres experimentálního přípravku je přiložen v příloze A.

5.3 Popis experimentálního přípravku

V souladu s dostupným materiálem a požadavky vyjmenovanými v kap. 5.1 a 5.2 byl zkonstruován přípravek určený k detekci Holmových elektrodynamických sil. Finální verzi přípravku lze vidět na Obr. 5.2.



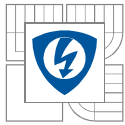
Obr. 5.2 Zapojení experimentálního přípravku



Obr. 5.3 Detail kontaktního styku experimentálního přípravku

Nosná konstrukce byla vyhotovena z překližkových desek (11 vrstvá překližka, tloušťky $d = 18$ mm), jež jsou dostatečně tuhé i tvarově stálé pro dané účely a taktéž splňují požadavek na „nemagnetičnost“ a elektrickou nevodivost.

Na přívod spodního (pevného) kontaktu byla použita měděná tyč průřezu 25×10 mm, délky 500 mm. Na přívod horního (pohyblivého) kontaktu byla použita měděná tyč průřezu 30×10 mm, délky taktéž 500 mm. Kontaktní dvojice byla vyhotovena z měděné tyče kruhového průřezu o průměru 30 mm, přičemž ta byla rozříznuta na dvě identické části délek 150 mm. Styková plocha pevného kontaktu byla obroušena na potřebnou povrchovou úpravu – drsnost R_a cca 0,8.



Styková plocha pohyblivého kontaktu byla poté osoustružena tak, aby vzniklo kulové zaoblení s poloměrem totožným s poloměrem kontaktní tyče, tedy $r = 15$ mm. Touto nesymetrickou kontaktní konfigurací „koule – rovina“, viz Obr. 5.3, je splněna podmínka obecného zjednodušení Holmova vztahu a to ta, že kontaktní styk je tvořený jen jednou souvislou stykovou plochou charakterizovanou tvrdostí kontaktních materiálů, jejich rozměrech a přitlačné síle. Je zřejmé, že např. při konfiguraci „rovina – rovina“ je stabilní stav styku při 3 a více kontaktních mikroplochách. Výsledná odpudivá síla při větším počtu stykových míst výrazně klesá, viz [23].

Zřejmě však ideálnost obou styčných ploch kontaktů bude brzy narušena svařením či elektrickým obloukem. Bližší detaily konstrukce včetně výkresové dokumentace jsou uvedeny v příloze A.

5.4 Zkratová laboratoř VTPPL

Zkratová laboratoř na adrese Kolejní 3093/7 v Brně je součástí *Vědeckotechnického Parku Profesora Lista*, dále jen VTPPL. VTPPL je následně součástí výzkumného pracoviště *Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně* zvaného *CVVOZE* (centrum výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie), jehož plný provoz byl spuštěn 1.1.2014. [25],[26]

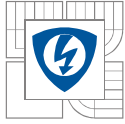
Zdrojem proudu pro experiment byl zkratový generátor o jmenovitém výkonu 16 MVA, následuje zapojení transformátoru TT2, jenž odděluje VN a NN část laboratoře. Na výstupu z transformátoru byl zapojen experimentální přípravek do série s dodatečnou zátěží, jelikož samotný úbytek na trase přípravku je velmi malé hodnoty. Více o zkratové laboratoři viz [27], [28].

5.5 Experimentování s přípravkem

Přípravek byl instalován na výstupu transformátoru TT2 ve zkratové laboratoři ve VTPPL. Bylo provedeno celkem 16 měřicích pokusů při různých hodnotách proudu a přitlačné kontaktní síly. Byl měřen úbytek napětí mezi kontakty a hodnota protékajícího proudu při průchodu jedné půlvlny proudu o frekvenci 50 Hz ($t_{max} = 10$ ms). Velikost proudu byla nastavována buzením generátoru. Při většině pokusů došlo ke svaření kontaktů, u jednoho pokusu byla změřena pevnost v tahu výsledného svaru.

Měření elektrických veličin ve zkratovně je řešeno pomocí převodníků analogového signálu na digitální vzorky s periodou vzorkování $T_s = 20$ μ s. Data z převodníků jsou posílána do ústředny DAQ (data acquisition) a po skončení pokusu posílána do PC umístěného ve velínu zkratovny. K měření byly použity následujících přístroje a přípravy:

- Rogowského cívka pro měření proudu, rozlišení převodníku $\Delta I_{min} = 5$ A
- Digitální převodník napětí s rozsahem 0 – 100 V, rozlišení $\Delta U_{min} = 6,25$ mV
- Digitální převodník napětí s rozsahem 0 – 10 V, rozlišení $\Delta U_{min} = 0,625$ mV
- Vysokorychlostní kamera Photron SA-X2, snímací frekvence 20000 fps (=20 kHz), rozlišení snímků 1024x672 pixelů; detailní popis v [2]
- Piezoelektrický siloměr s rozlišením $\Delta F_{min} = 0,1$ N



Tab. 5.1 Přehledová tabulka s parametry a výsledky dílčích měření

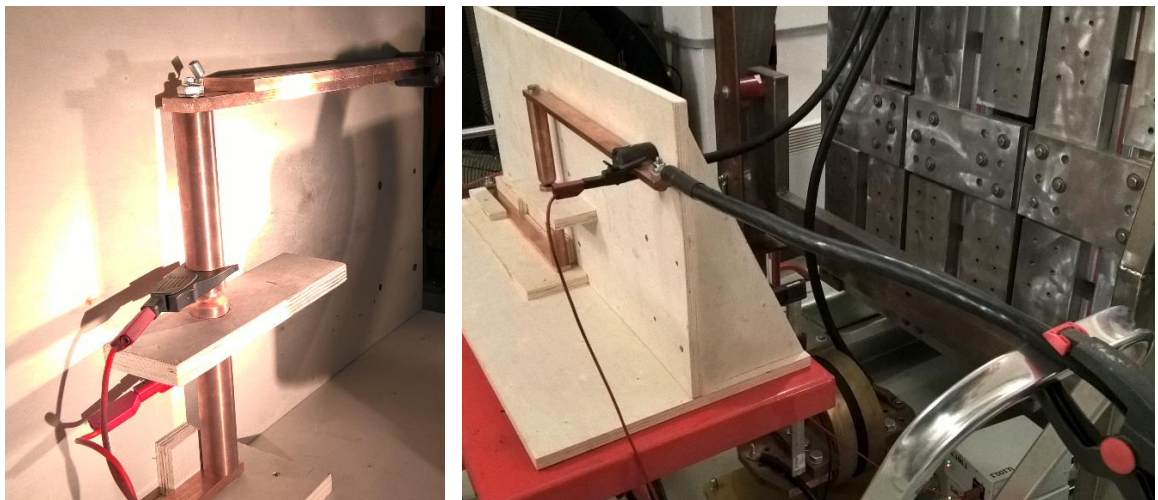
Pokus	F_k	I_p	I_a	s_k	F_w	W	D/A	Video	Odkaz
	[N]	[A]	[A]	[μm]	[N]	[J]	[V]	[-]	
1.	13,4	3594	N/A	50	-	15,08	100	Ano	Obr. 5.5
2.	13,4	3989	2016	60	-	18,43	100	Ano	Obr. 5.6
3.	13,4	4321	2230	80	-	18,49	100	Ano	Obr. 5.7
4.	13,4	3560	3420	40	-	14,59	100	Ano	Obr. 5.8
5.	13,4	3984	3897	80	-	14,42	100	Ano	Obr. 5.9
6.	13,4	3955	3227	80	-	11,05	100	Ano	Obr. 5.10
7.	13,4	4277	3550	60	-	12,11	10	Ano	Obr. 5.11
8.	13,4	5083	3745	100	-	17,05	10	Ano	Obr. 5.12
9.	13,4	5806	4136	200	-	63,50	10/100	Ano	Obr. 5.13
10.	13,4	4297	3710	30	84	14,05	10	Ano	Obr. 5.14
11.	19,6	3574	3457	N/A	-	4,72	10	Ano	Obr. 5.15
12.	29	3648	3630	0	-	5,57	10	Ne	Obr. 5.16
13.	29	3496	N/A	0	-	5,49	10	Ne	Obr. 5.17
14.	29	3540	3516	N/A	-	5,69	10	Ano	Obr. 5.18
15.	29	5049	4717	N/A	-	10,11	10	Ano	Obr. 5.19
16.	29	6753	4404	N/A	-	10,29	10	Ano	Obr. 5.20

Poznámky k Tab. 5.1:

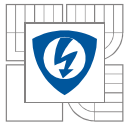
- pokusy 1 až 6 jsou červeně zvýrazněny, jelikož elektrody měření napětí byly umístěny na samých okrajích proudovodné dráhy, následkem této skutečnosti je:
 - o měření úbytku napětí i na částech proudovodné dráhy, jež nejsou předmětem experimentu (spojení měděných tyčí i zbytek jejich úseků mimo kontaktního styku)
 - o velká plocha smyčky napěťových vodičů vedoucích k převodníku (viz Obr. 5.2); tato smyčka má již nezanedbatelnou vzájemnou indukčnost se samotnou silovou částí; na průbězích napětí pokusů 1–6 lze pozorovat významnou složku indukovaného napětí, dokonce i záporný úbytek napětí při klesání proudu (2. polovina půlvlny), což je bez dalších vlivů zřejmě u daného typu zátěže nereálný stav napěťového úbytku (generátorický režim);
 - Uspořádání smyčky vodičů vedoucích k převodníku napětí má vždy nenulovou vzájemnou indukčnost L_M s proudovodnou drahou přípravku.

Poté lze dle Faradayova indukčního zákona psát: $u_i(t) = -\frac{d\psi(t)}{dt}$ [29], při neměnné vzájemné poloze všech vodičů a magneticky lineárním okolí (v našem případě splněno) lze vztah upravit na: $u_i(t) = -L_M \frac{di(t)}{dt}$. Je tak zřejmé, že „chybová“ složka měřeného napětí je přímo závislá na vzájemné indukčnosti obou uspořádání vodičů (plocha smyčky, vzdálenost od proudovodné dráhy, permeabilita prostředí,...) a časové změně (derivaci) protékajícího proudu přípravkem. Daná složka je přičtena k napěťovému úbytku.

- V pokusech č. 7 – 16 byly svorky napěťového měření již umístěny prakticky co nejbližší kontaktnímu styku a jejich vodiče vzájemně zkrouceny pro co největší možnou eliminaci indukovaného napětí, viz *Obr. 5.4a*). Při nárůstu proudu u dalších pokusů tak lze pozorovat naindukovanou složku o velikosti několika desítek mV.
 - Hodnota vzájemné indukčnosti lze zpětně vypočítat ze znalosti průběhu napětí i proudu. Následný průběh indukovaného napětí by bylo možno od naměřeného průběhu odečíst a s dostatečnou přesností tak získat nezkreslenou hodnotu napěťového úbytku mezi svorkami.
- Sloupec F_k představuje přítláčnou sílu v kontaktním styku. Tato síla byla měřena piezoelektrickým siloměrem, jelikož její přesný výpočet byl prakticky znemožněn spojením přípravku s transformátorem kabely s měděným jádrem průřezu 120 mm^2 . Namísto precizního vyvažování kabelu připojeného k pohyblivému kontaktnímu ramenu byl ten uchycen pevně k pomocnému žebříku pro zabránění jeho pohybu v průběhu celého měření, viz *Obr. 5.4b*). Pohyb kontaktního ramene při experimentálním měření byl natolik malého rozsahu (desítky μm), že znalost statické přítláčné síly čistě tíhového charakteru je naprosto dostačující. K uchycení lanka siloměru bylo instalováno očko na spojovacím šroubu měděných tyčí v ose kontaktu, viz *Obr. 5.4a*) nahoře. Na totožném obrázku lze vidět i způsob zvýšení přítláčné síly přidáním části měděné pasoviny na kont. rameno.



Obr. 5.4 a) Poloha měřicích svorek napětí b) Uchycení přívodního kabelu



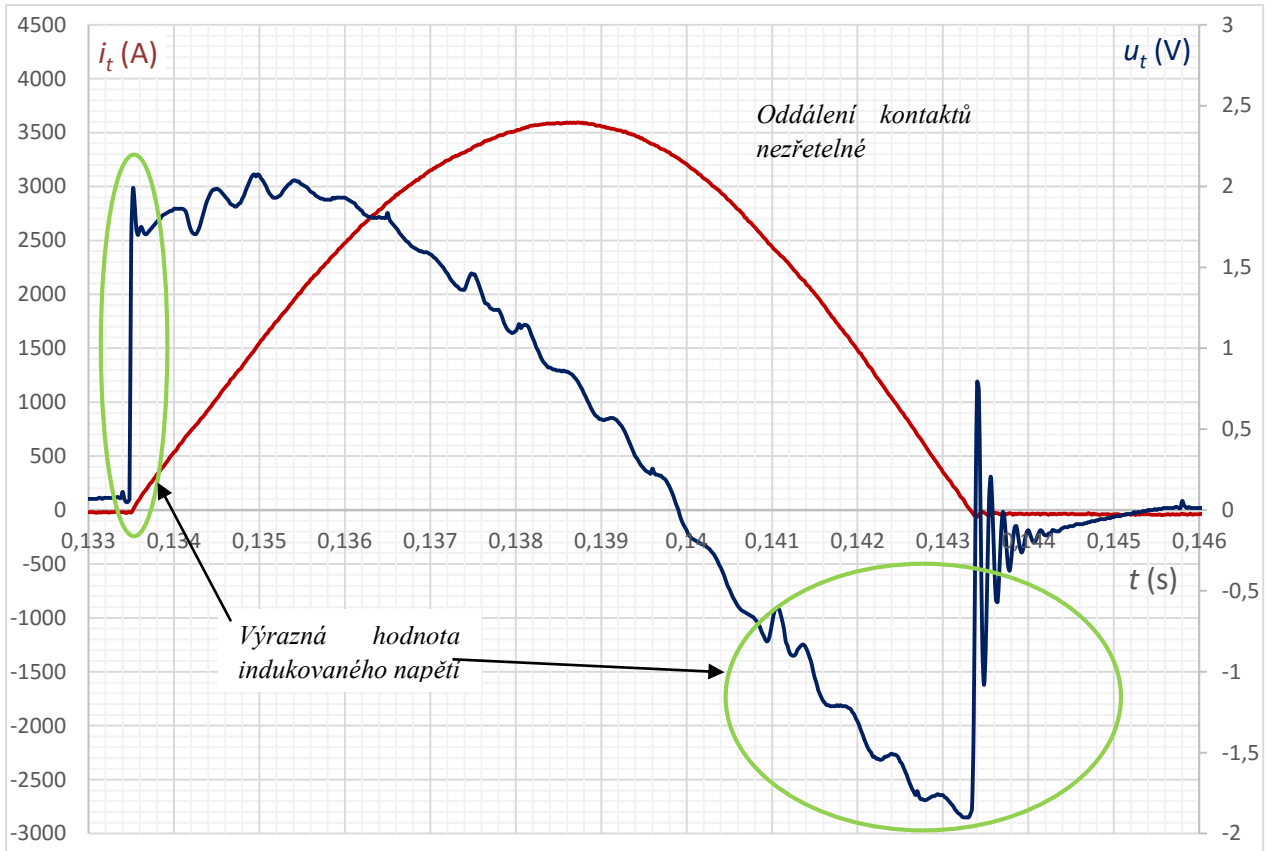
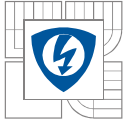
- I_p odpovídá špičkové hodnotě proudu v [A]. Polarita pólů vln proudu nebyla během měření zaměřována, pohyblivý kontakt byl zapojen tedy jako *katoda* a pevný kontakt jako *anoda*.
- I_a odpovídá okamžité hodnotě proudu při začátku oddalování kontaktů – dále jen nadskok, z hlediska měření experimentu se tak jedná o nejdůležitější hodnotu, jelikož by měla korespondovat s překonáním přitlačné síly silou odpudivou – kontaktní. Okamžik nadskoku je u některých průběhů zřetelně viditelný jako prudký nárůst napětí (viz Obr. 5.14), v případě významného zvlnění či „zarušení“ napětového průběhu lze okamžik nadskoku zpětně vypočítat pomocí znalosti okamžiku svaření kontaktů a záznamu z rychlokamery, viz Obr. 5.7. V případě, že je napětový průběh natolik nezřetelný, že ani významné charakteristické špičky napětí jsou nepozorovatelné, je poté bez synchronizace záznamu z rychlokamery s oscilogramem prakticky znemožněno zjištění okamžiku nadskoku, viz např. Obr. 5.6.
- s_k je maximální nadskok pohyblivého kontaktu během měření. Je nutné poznamenat, že při použité vzdálenosti kamery od kontaktního styku a souvisejícího rozlišení je odečtení zatíženo významnou chybou. Rozměr jednoho pixelu při této vzdálenosti a rozlišení odpovídá cca 40 μm . Hodnota je tak spíše orientační a přináší určitou možnost náhledu na samotné měření.
- F_w je síla svaru v tahu, která byla změřena pouze u jednoho pokusu. V části vyhodnocení bude pomocí této síly dopočítána plocha svaru.
- W je celková uvolněná energie v kontaktním styku během púlvlny, vypočítaná jako $W = \sum_{n=1}^N i_n \cdot u_n \cdot \Delta t$, kde n je pořadí vzorku, N je počet vzorků a Δt je perioda vzorkování. Výpočet je tedy citlivý na nepřesnost měření napětí (viz poznámka k měření napětí).
- D/A značí použití převodníku napětí, přičemž použití převodníku s rozsahem 10 V poskytuje již velmi přesné hodnoty i při velmi malých úbytcích. Při použití převodníku s rozsahem 100 V lze na některých průbězích již pozorovat diskretizační kroky.
- *Video* poté jen upřesňuje, zdali byl záznam z rychlokamery daného měření zachován. Nebyly zachovány pouze záběry bez viditelného oddálení kontaktů.

5.6 Grafické průběhy naměřených hodnot

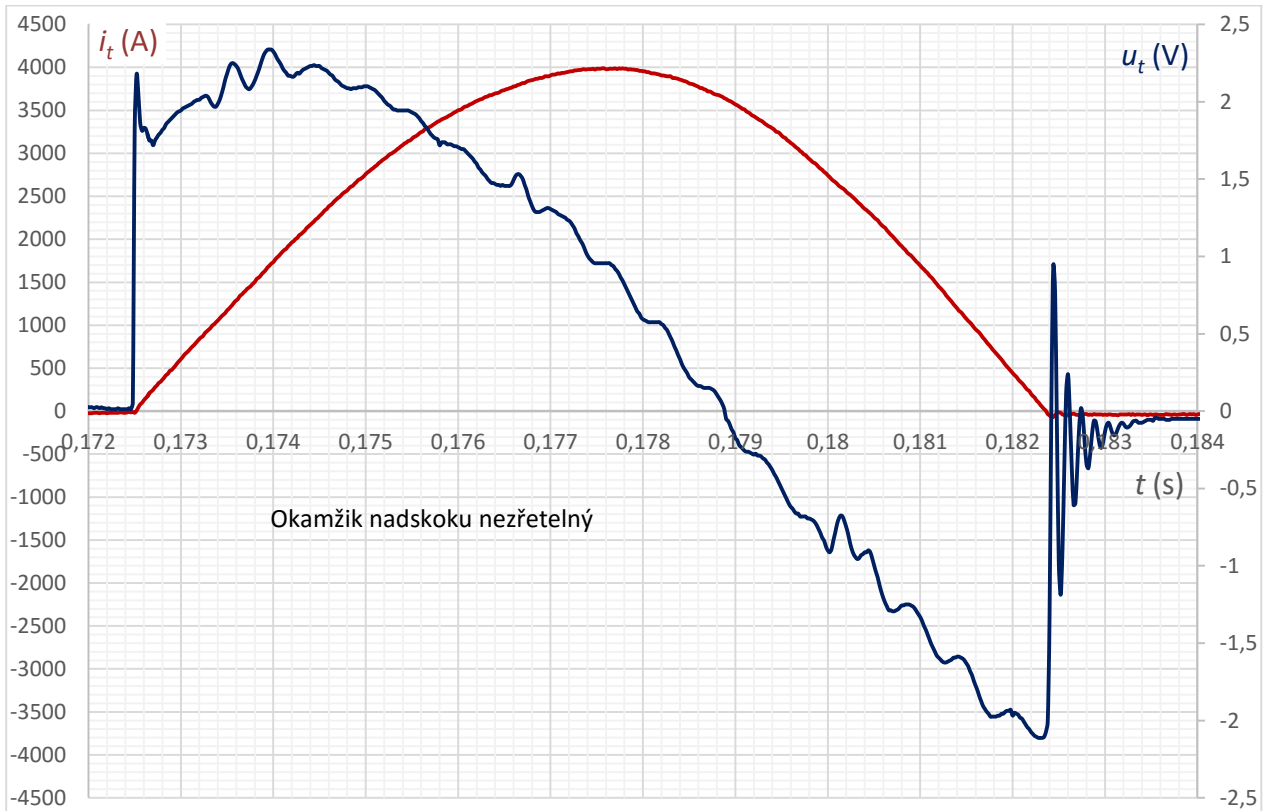
Na následujících stranách jsou vykresleny všechny oscilogramy měření, na něž je odkazováno v Tab. 5.1. Na průbězích jsou vyznačeny charakteristické projevy počátku nadskoku kontaktů, svaření a elektrického oblouku. U některých průběhů je přiložen snímek specifického okamžiku zachycený rychlokamerou, např. okamžik svaření kontaktů. Záznamy z rychlostní kamery jsou přiloženy na samostatném nosiči DVD.

Je nutné poznamenat, že pouze u jednoho experimentu došlo k hoření oblouku (viz Obr. 5.13), jelikož ten může dosahovat určité minimální hodnoty napětového úbytku. V případě elektrického oblouku hořícího mezi měděnými elektrodami je to podle [9] hodnota $U_{a,Cu,min} = 13 \text{ V}$. V ostatních případech měření se tak pravděpodobně jedná o záření vařící se mědi v kontaktním styku.

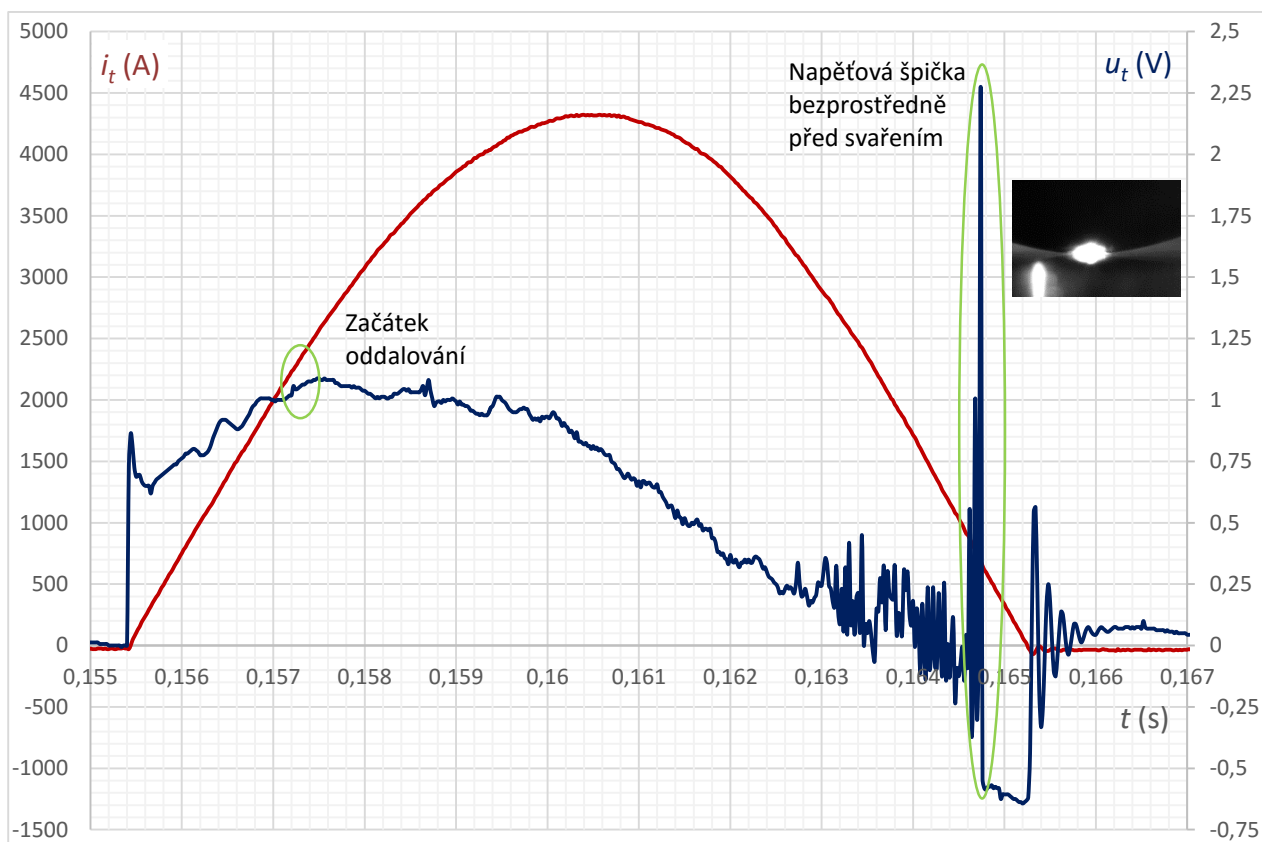
Je zřejmé, že v průběhu experimentálního měření docházelo k postupné deformaci obou elektrod v jejich místě styku. Téměř po každém pokusu byly elektrody svařeny, viz např. Obr. 5.22, kde lze vidět jak svar, tak i důsledky hoření elektrického oblouku.



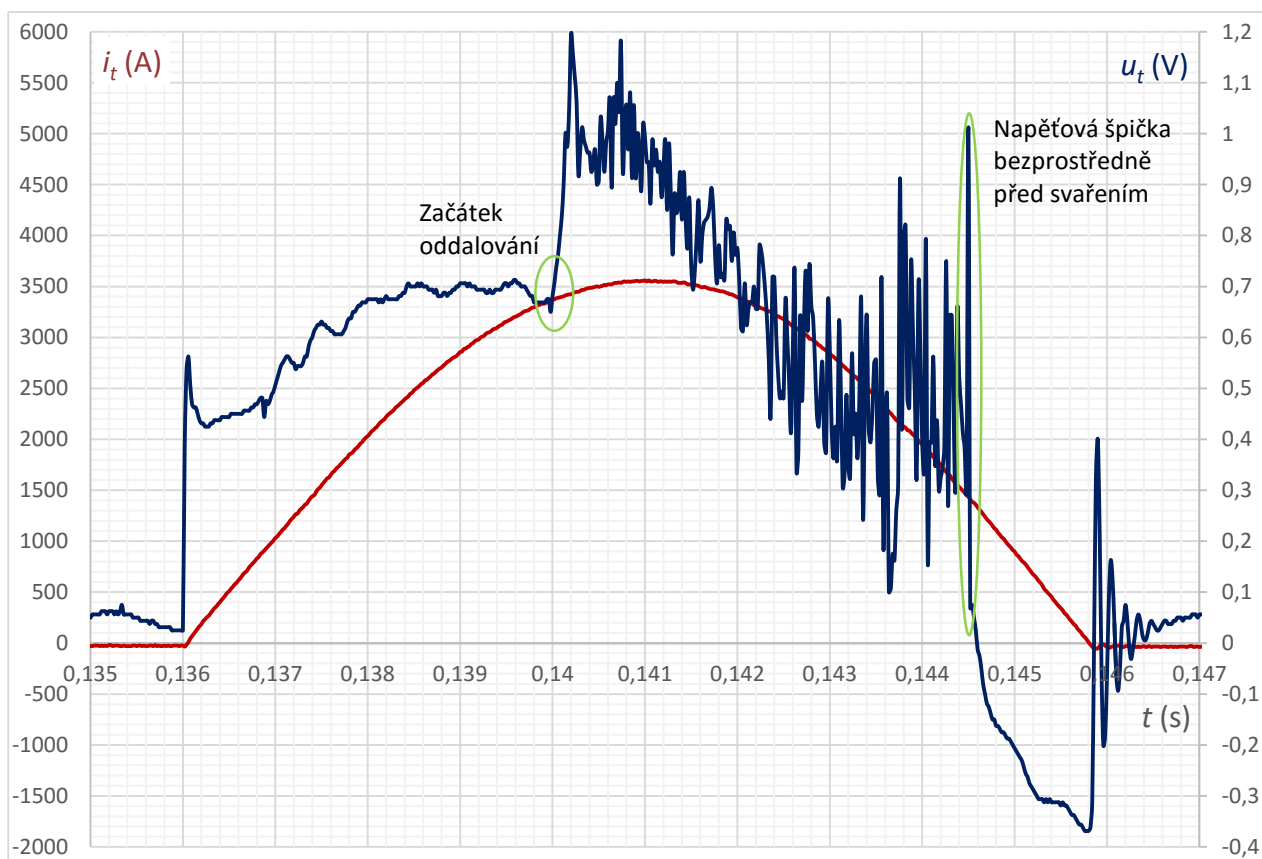
Obr. 5.5 Oscilogram měření č. 1



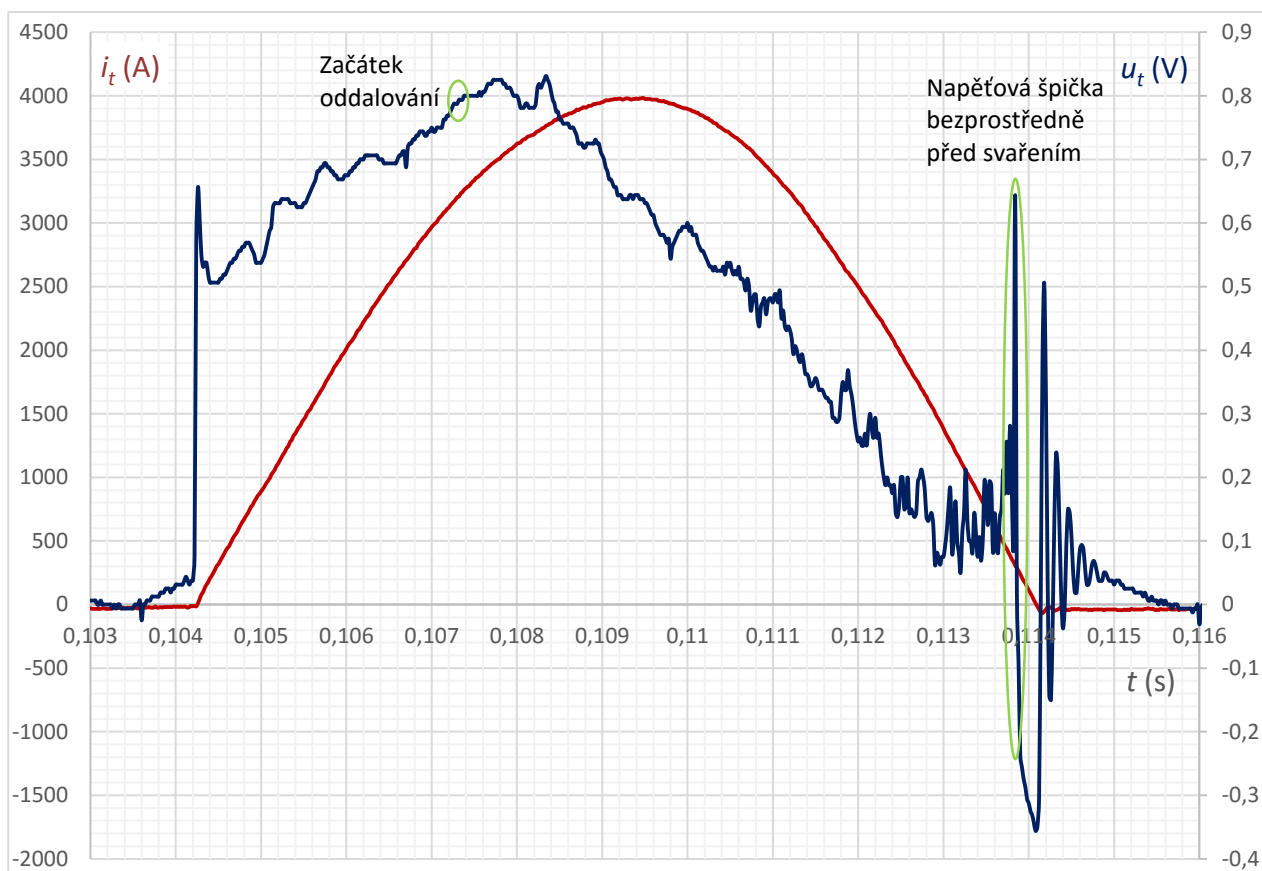
Obr. 5.6 Oscilogram měření č. 2



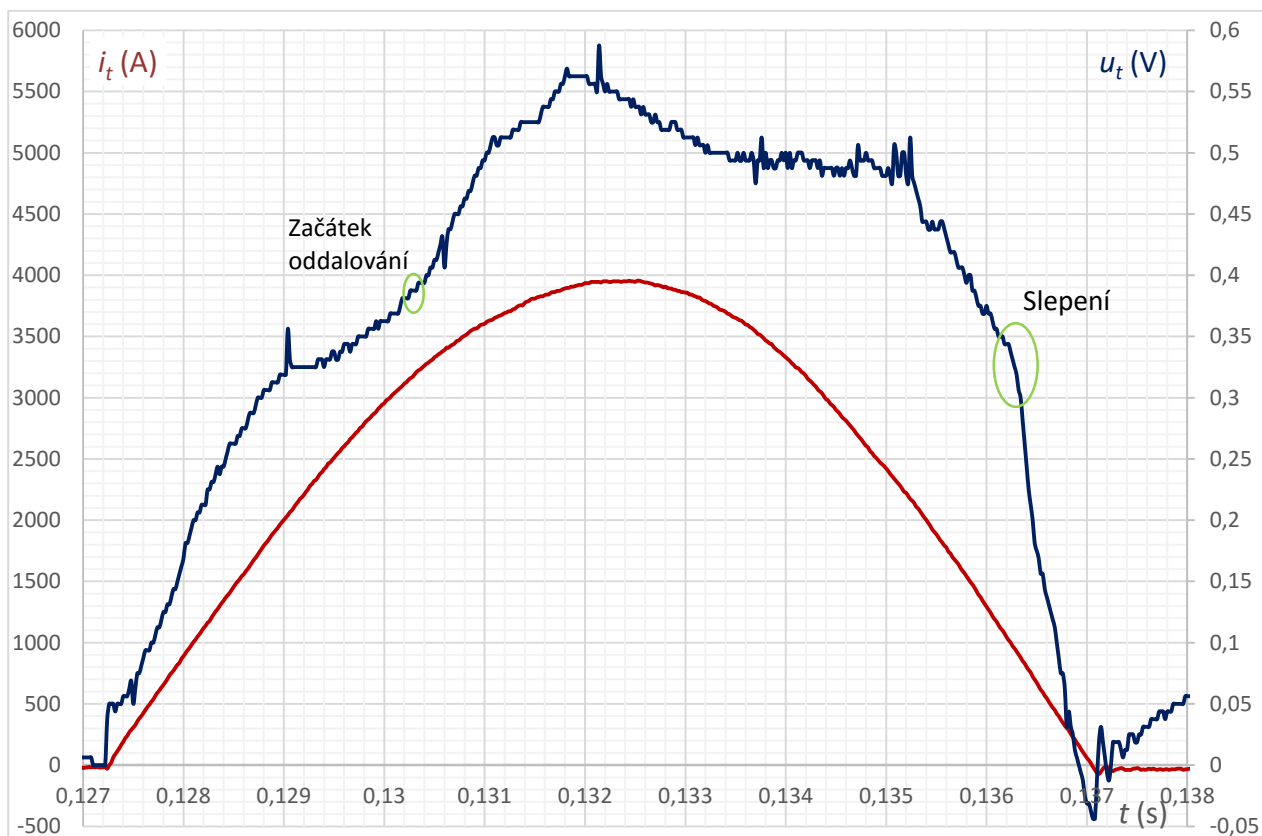
Obr. 5.7 Oscilogram měření č. 3



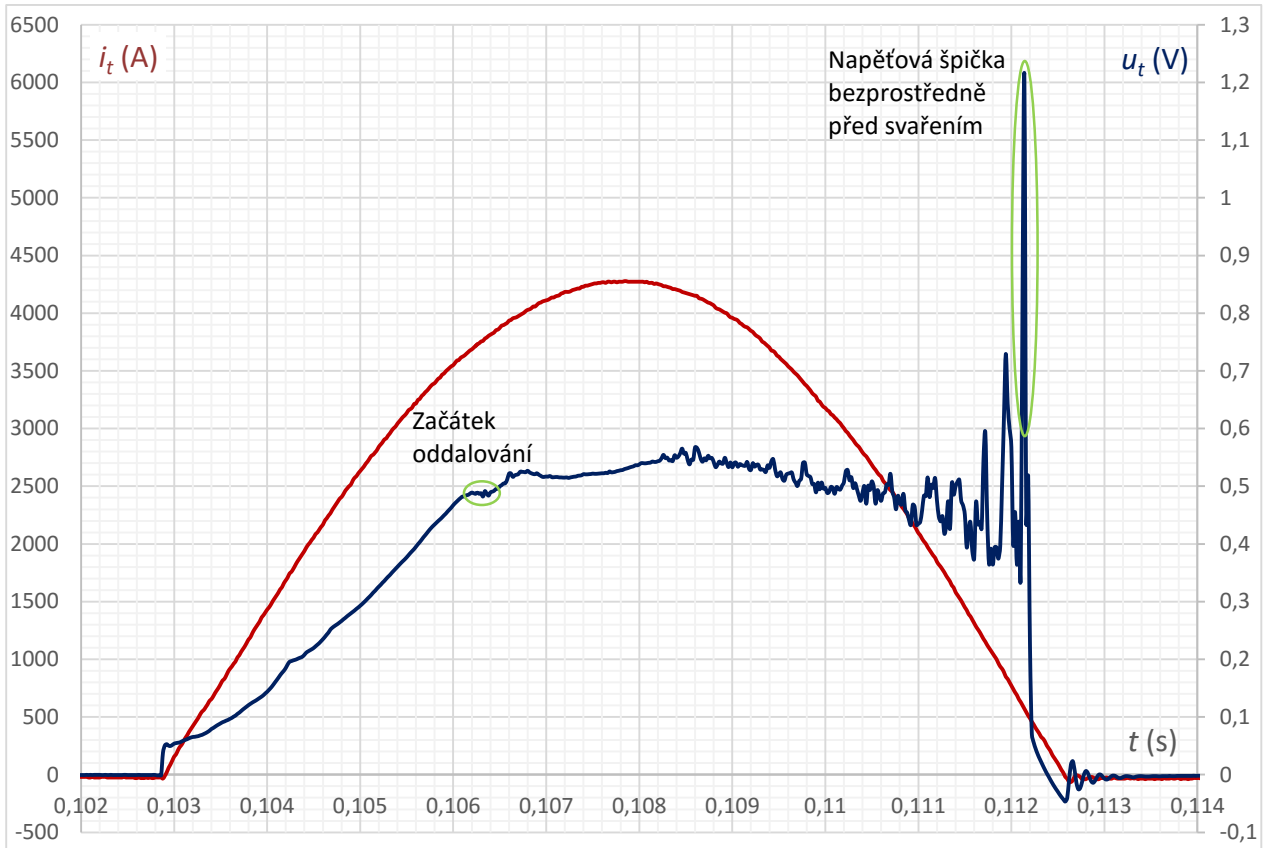
Obr. 5.8 Oscilogram měření č. 4



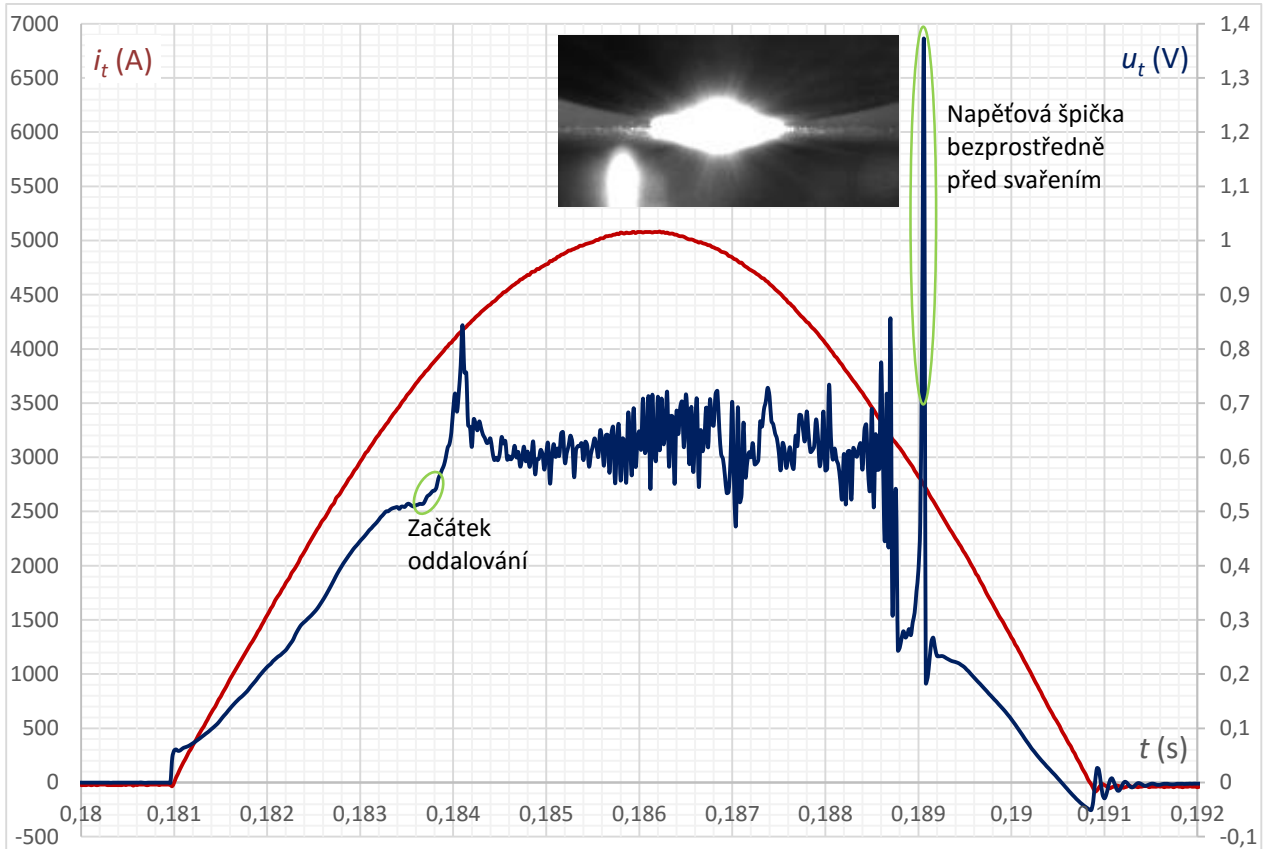
Obr. 5.9 Oscilogram měření č. 5



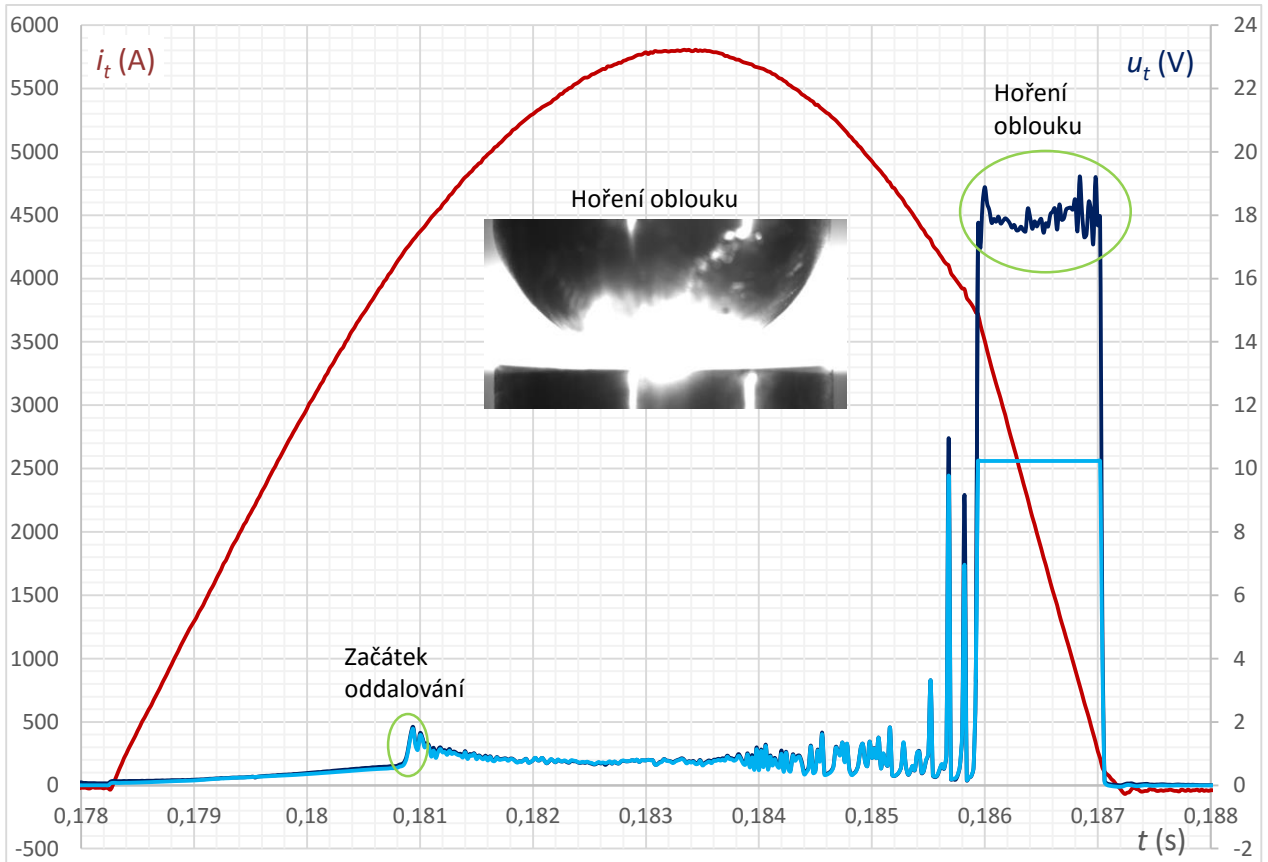
Obr. 5.10 Oscilogram měření č. 6



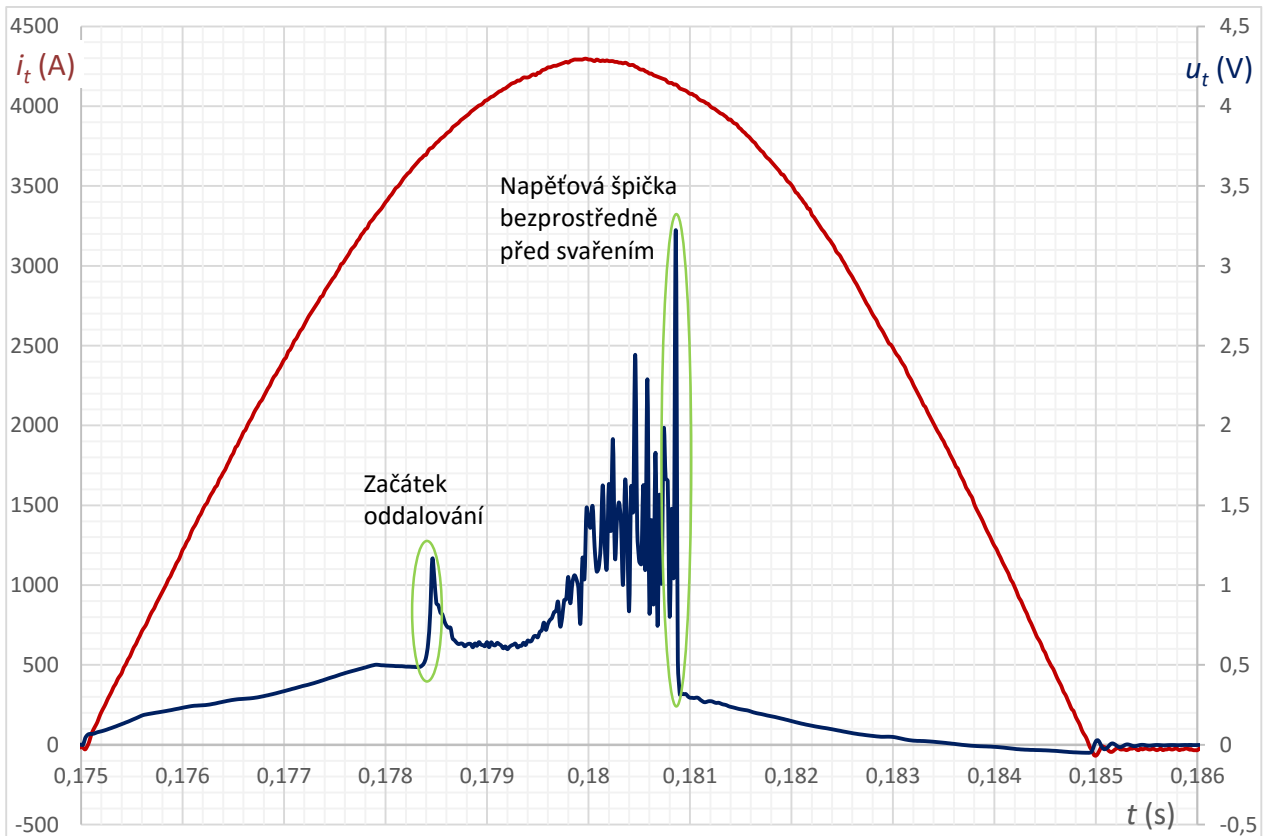
Obr. 5.11 Oscilogram měření č. 7



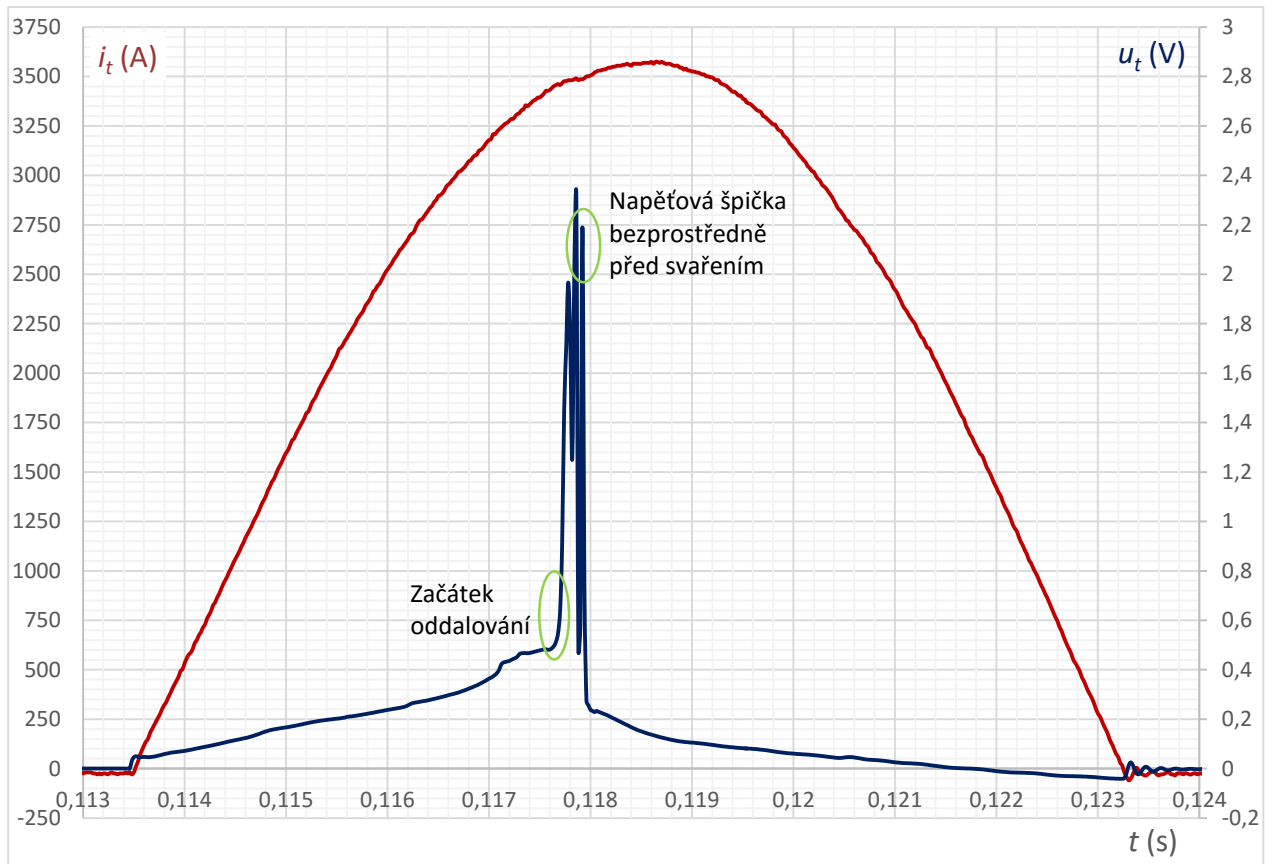
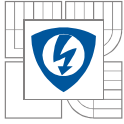
Obr. 5.12 Oscilogram měření č. 8



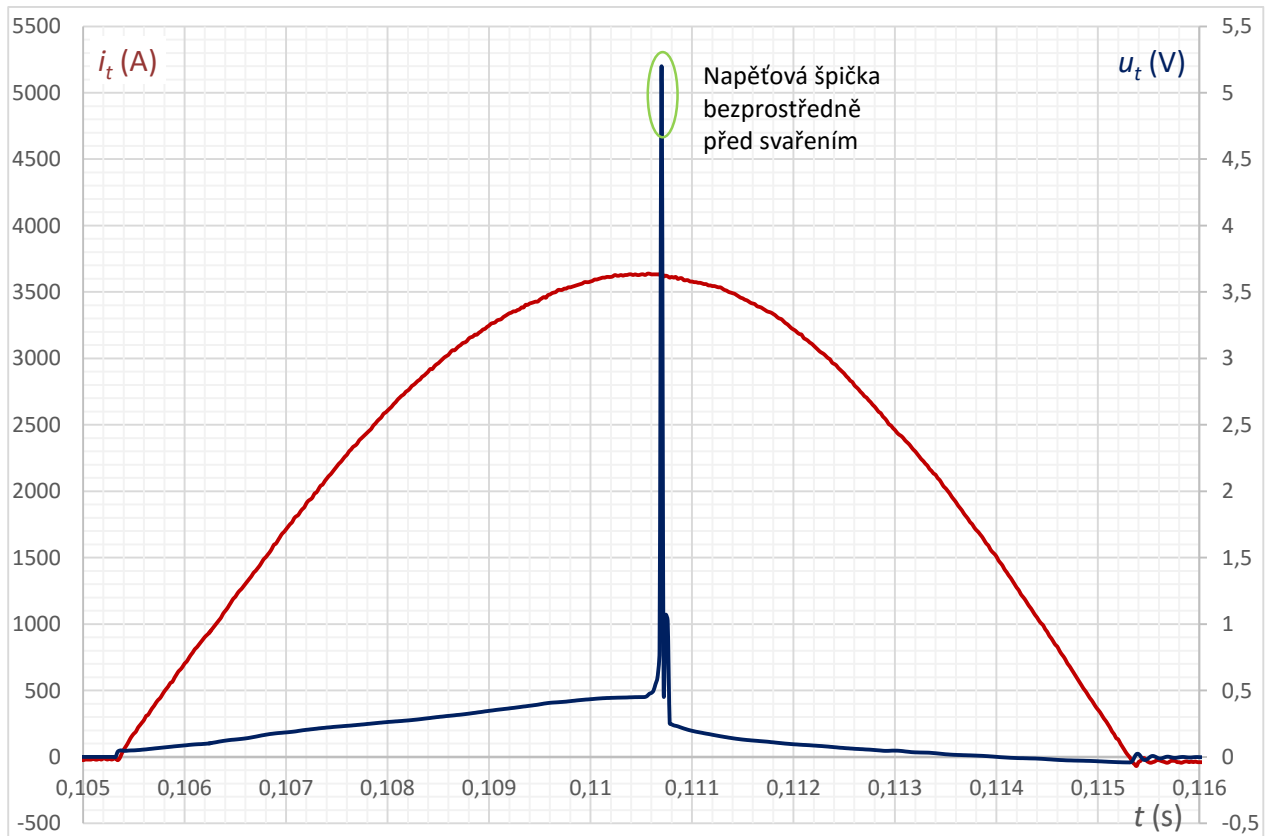
Obr. 5.13 Oscilogram měření č. 9



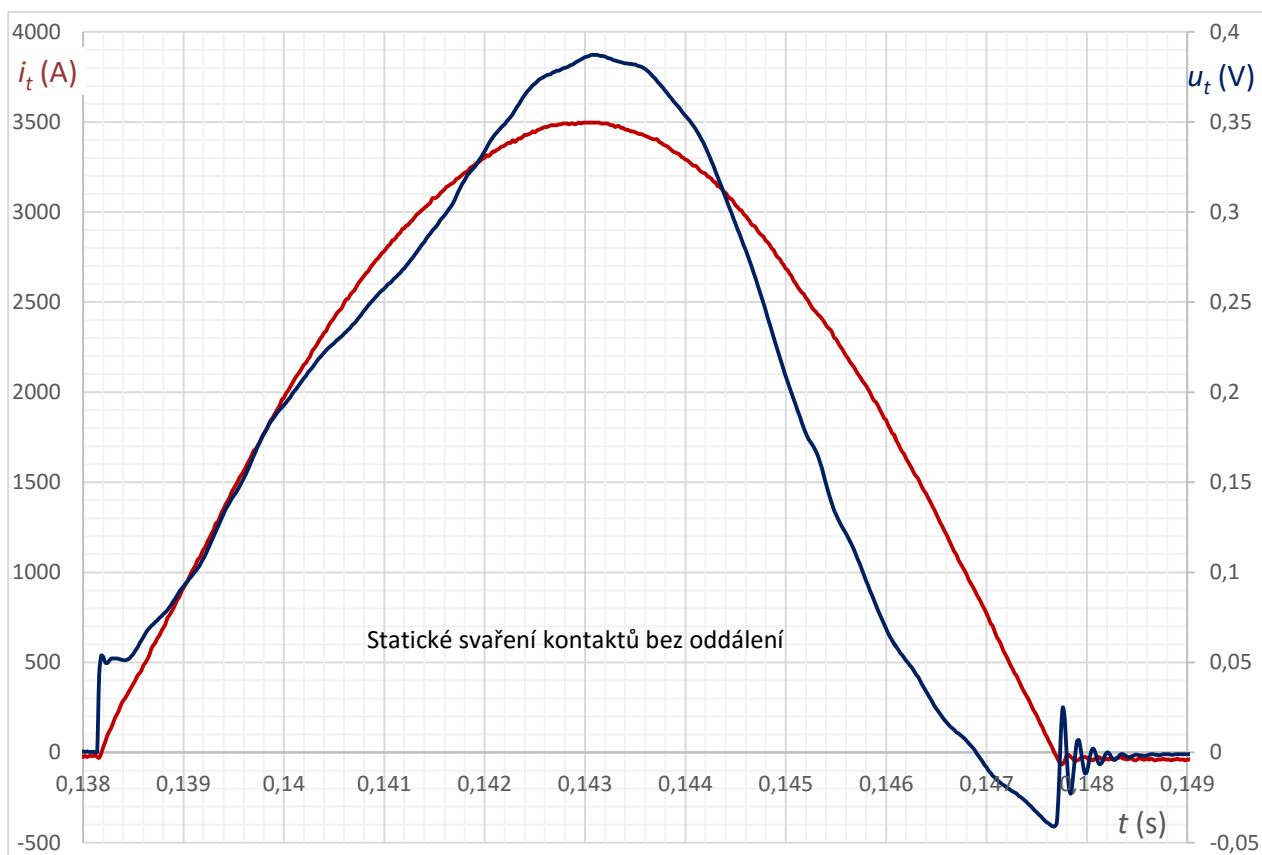
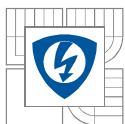
Obr. 5.14 Oscilogram měření č. 10



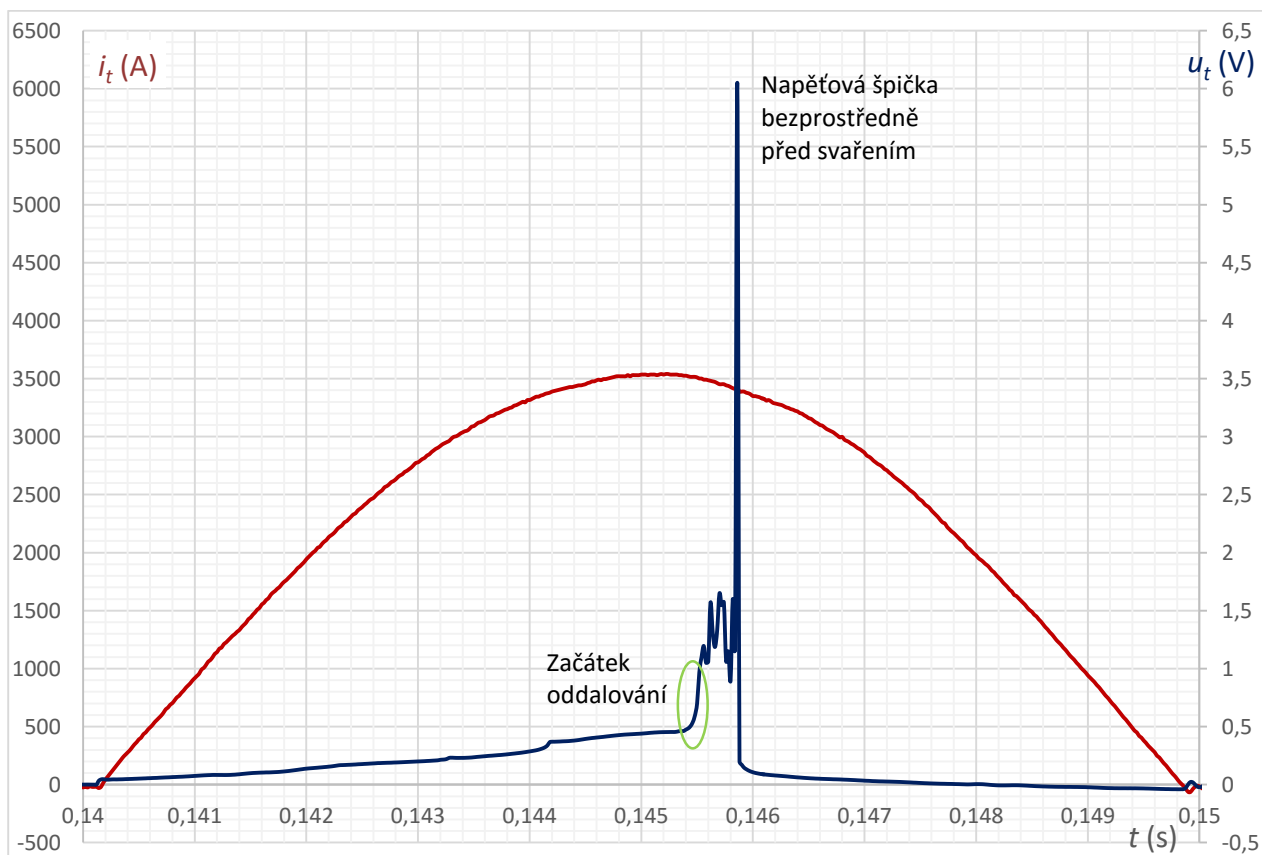
Obr. 5.15 Oscilogram měření č. 11



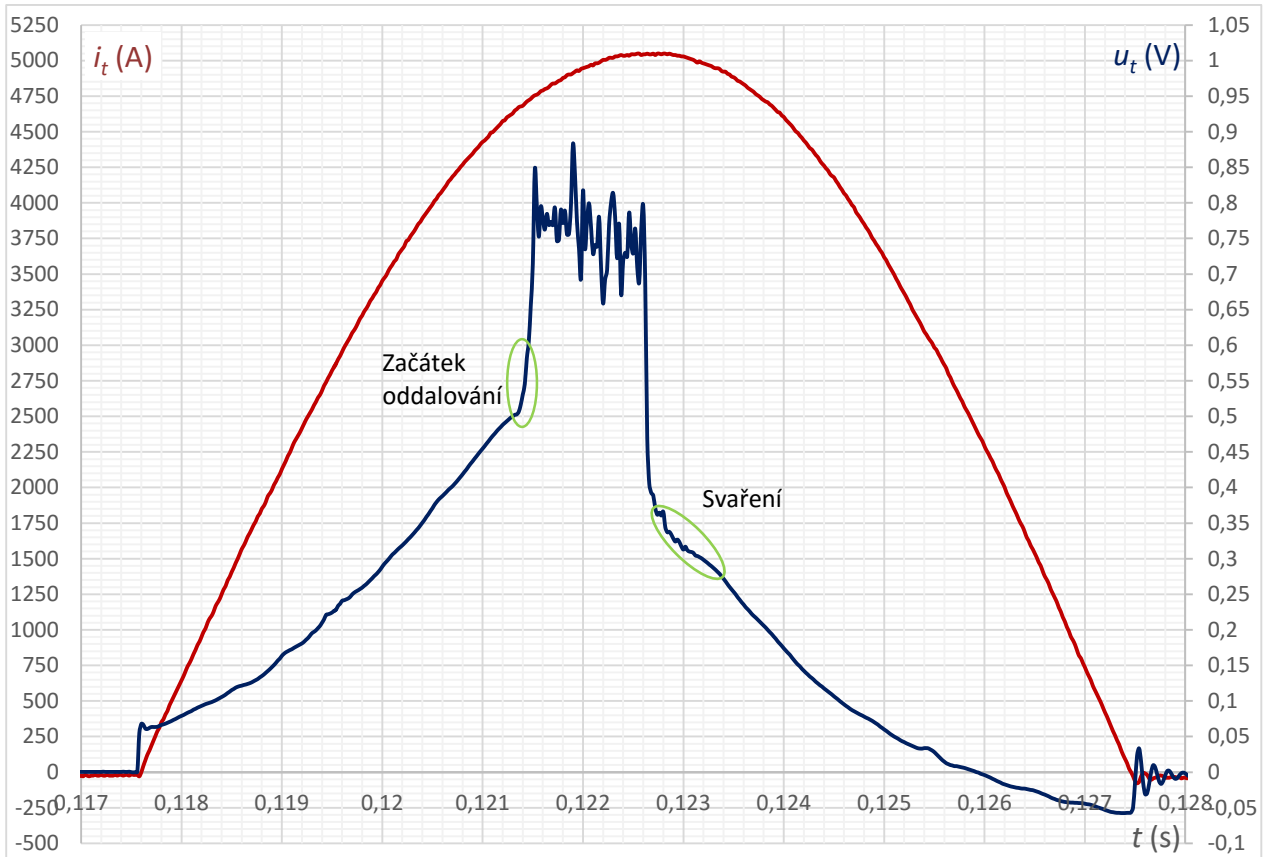
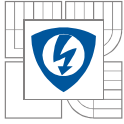
Obr. 5.16 Oscilogram měření č. 12



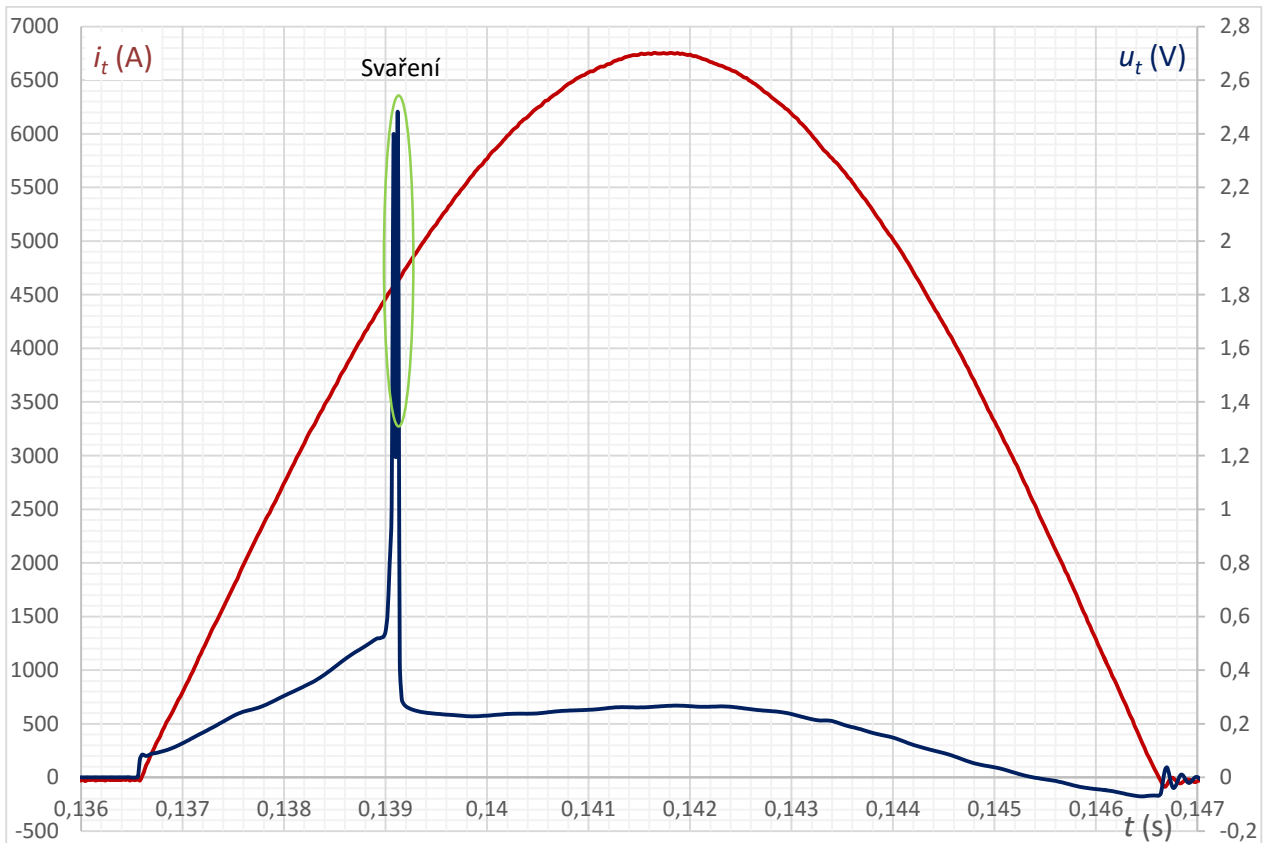
Obr. 5.17 Oscilogram měření č. 13



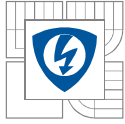
Obr. 5.18 Oscilogram měření č. 14



Obr. 5.19 Oscilogram měření č. 15



Obr. 5.20 Oscilogram měření č. 16



5.7 Výsledky měření elektrodynamických sil

5.7.1 Podíl proudovodné dráhy

Podobně jako v kapitole 4 byl simulován taktéž i vliv proudovodné dráhy na celkovou elektrodynamickou sílu. Kontaktní styk „polokoule – rovina“ byl nahrazen souvislým plošným stykem v celém průřezu kontaktní tyče. Byl nastaven souřadný systém do středu otáčení kontaktu a definován protékající proud. Pro potřeby zjištění vazební konstanty byl zvolen proud $I = 10$ kA. Přičemž výsledný moment působící na pohyblivé rameno má velikost $M = 9,81$ Nm a směr do otevření kontaktu, tedy totožně jako úžinová síla. Při znalosti délky ramene tohoto momentu (od osy otáčení po osu kontaktního styku) $l_r = 380$ mm lze dopočítat odpudivou sílu ve směru osy kontaktu jako:

$$F_{pd} = \frac{M}{l_r} = \frac{9,81}{0,38} = 25,82 \text{ N}$$

Při dodržení magneticky lineárního prostředí je poté velikost silové vazební konstanty:

$$k_{v,pd} = \frac{F_{pd}}{I^2} = \frac{25,82}{(10000)^2} = 258,2 \cdot 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} \quad (5.1)$$

5.7.2 Podíl kontaktní úžiny

Velikost odpudivé síly způsobené zhuštěním proudu do jednoho místa je závislá na kvadrátu proudu, velikosti kontaktních dílců, jejich tvrdosti a přitlačné síle. V experimentu byly užity 3 různé velikosti přitlačné síly: $F_{k1} = 13,4$ N, $F_{k2} = 19,6$ N, $F_{k3} = 29$ N. Při uvažování charakteristických vlastností kontaktů:

- průměr kontaktních dílců (kontaktní polokoule) $D = 30$ mm
- tvrdost elektrovodné mědi podle Meyera $H_{M,Cu} = 420$ MPa
- průměr stykové plochy $d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_k}{\pi \cdot H_M}}$
- odpudivá síla v kontaktu poté: $F_u = 10^{-7} I^2 \ln \frac{D}{d}$

Je zřejmě vztah pro silovou vazební konstantu:

$$k_{v,u} = \frac{F_u}{I^2} = 10^{-7} \ln \frac{D}{d} [\text{N} \cdot \text{A}^{-2}] \quad (5.2)$$

Pro každou hodnotu přitlačné síly tak vychází rozdílná hodnota silové vazební konstanty:

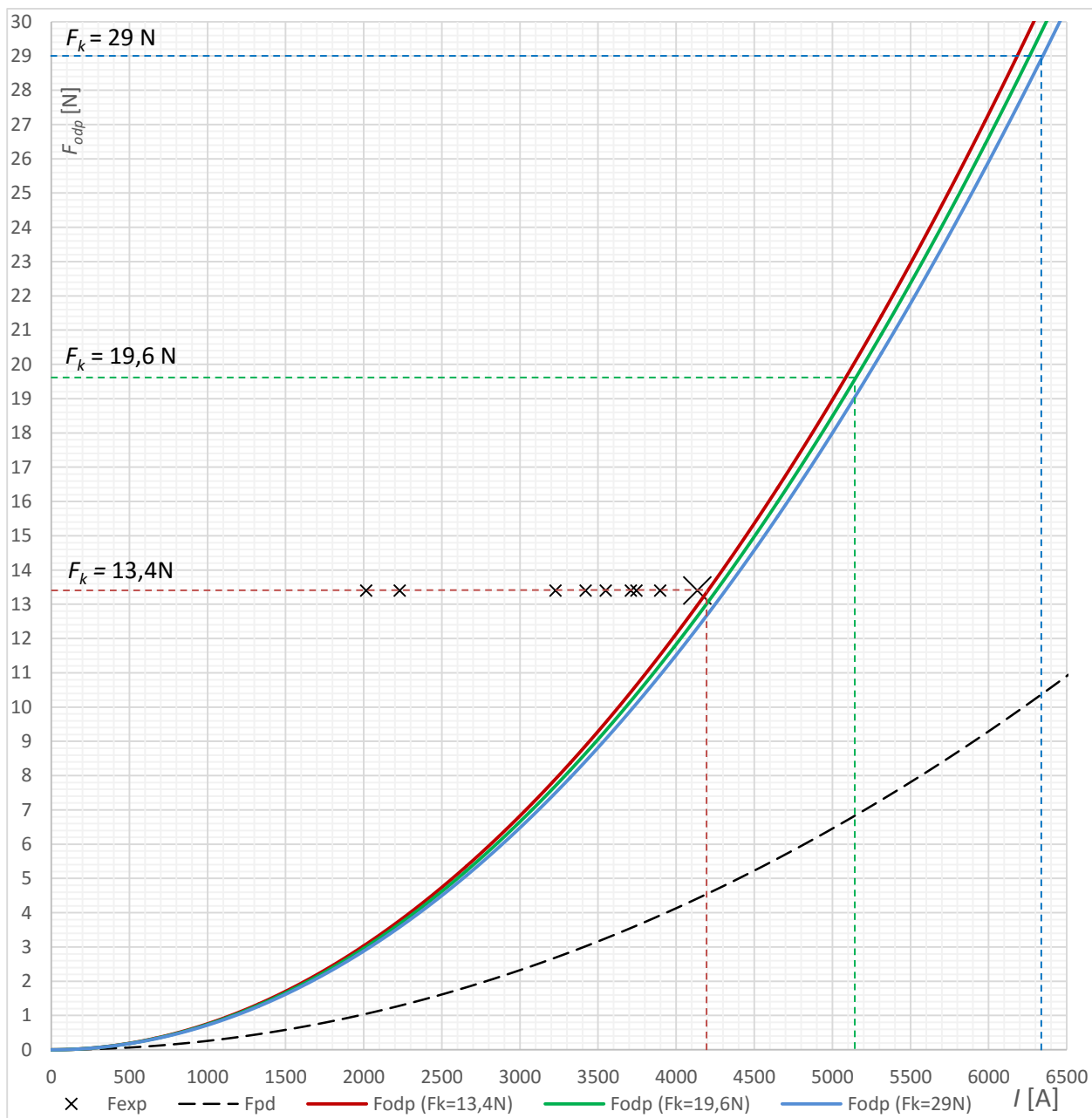
$$F_{k1} = 13,4 \text{ N}; d = \sqrt{\frac{4 \cdot 13,4}{\pi \cdot 420 \cdot 10^6}} = 0,202 \text{ mm}; k_{v,u,13,4} = 10^{-7} \ln \frac{30}{0,202} = 500,3 \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} \quad (5.3)$$

$$F_{k2} = 19,6 \text{ N}; d = \sqrt{\frac{4 \cdot 19,6}{\pi \cdot 420 \cdot 10^6}} = 0,244 \text{ mm}; k_{v,u,19,6} = 10^{-7} \ln \frac{30}{0,202} = 481,3 \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} \quad (5.4)$$

$$F_{k3} = 29 \text{ N}; d = \sqrt{\frac{4 \cdot 29}{\pi \cdot 420 \cdot 10^6}} = 0,297 \text{ mm}; k_{v,u,29} = 10^{-7} \ln \frac{30}{0,202} = 461,7 \text{ N} \cdot \text{A}^{-2} \quad (5.5)$$

5.7.3 Celkové silové působení

Porovnáním (5.3), (5.4) a (5.5) s (5.1) lze vidět, že podíl proudovodné dráhy na celkové odpudivé elektrodynamické síle je nezanedbatelný a je přibližně poloviční oproti síle Holmově.

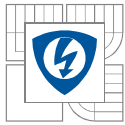


Obr. 5.21 Závislost vypočítané odpudivé kontaktní síly na protékajícím proudu

Na Obr. 5.21 jsou vykresleny teoretické závislosti odpudivé elektrodynamické síly působící v ose kontaktu do vypnutí na protékajícím proudu. Lze si povšimnout, že průběhy odpudivé síly se příliš nemění pro různé hodnoty přitlačné kontaktní síly F_k , tato hodnota totiž figuruje ve výpočtovém vztahu pod odmocninou. S dostatečnou přesností by tak mohl být uvažován jen jeden průběh. Složka síly od proudovodné dráhy je uvedena čárkovanou černou čarou.

5.8 Shrnutí experimentálního měření

Do souvislosti byly uvedeny body z Tab. 5.1, u nichž bylo bezpečně zaznamenáno oddálení kontaktů. Dle uvedené závislosti odpovídá při kontaktním přitlaku $F_k = 13,4$ N hodnota proudu pro oddálení kontaktů $I = 4200$ A. Nejbližší hodnota proudu oddálení z experimentu je při pokusu č. 9 (Obr. 5.13) $I_{a9} = 4136$ A. Při pokusu č. 9 došlo ke zdatelnému oddálení kontaktů (cca 0,2 mm)



a jednoznačnému hoření elektrického oblouku (napět'ový úbytek větší než 13 V). Průkazně lze tedy zhodnotit, že odchylka Holmova vztahu od tohoto bodu měření je prakticky zanedbatelná (výrazný bod na Obr. 5.21). Taktéž byla pravděpodobně nalezena hranice oddálení elektrod, potřebná k existenci elektrického oblouku, a to velmi přibližně 0,1 mm. Pro přesnější naměření této hraniční vzdálenosti by bylo nutné užití distančního mikroskopu.

Ostatní body měření, při kterých došlo k nadskoku pohyblivého kontaktu, nastaly při nižších hodnotách proudu (2000 ÷ 3900 A). Tento rozptyl může být zapříčiněn způsobem finální úpravy povrchu kontaktů před každým měřením či makroskopickými změnami těchto stykových ploch, lze si totiž povšimnout postupného nárůstu „nadskokového“ proudu s postupem měření. Je pravděpodobné, že s postupem měření docházelo k vytvoření prohlubní na obou kontaktech a z toho plynoucího nárůstu stykové plochy. Pro větší konzistentnost výsledků by bylo nutné zachovat kontaktní styk stále stejné kvality, pravděpodobně vyměňováním kontaktních dílců a jejich následnými úpravami.

Taktéž je nutné poznamenat, že pokud byly v minulosti podobné jevy experimentálně zkoumány, tak při nepoužití rychlostní kamery a vysoce citlivého měřicího aparátu mohly být zaznamenány nadskoky způsobující hoření oblouku, jako při pokusu č. 9 (Obr. 5.13). Poté by byla zřejmě odchylka analytického výpočtu od experimentálního ověření zanedbatelná.

Naměřené hodnoty jsou pravděpodobně ovlivněny i faktem, že silové působení při rostoucím proudu má zpětnovazební charakter. Při nárůstu proudu roste i odpudivá síla, snižuje tak přítlačnou sílu, což má za následek opětovné zvýšení odpudivé síly vlivem snižování plochy kontaktního styku. V okamžiku oddálení kontaktů do takové míry, že začíná docházet k tavení a vypařování kontaktního materiálu ve styku nastává další jev zvyšující odpudivou sílu, a to vliv tlaku par hoření oblouku či jen tlak generovaných plynů vysokou proudovou hustotou (= teplotou).

Diagnostika pochodů mezi kontakty v okamžiku oddálení je velmi komplexní problematikou. V případě, že úbytek napětí na kontaktech nepřekročí 13 V nelze hovořit o vzniku elektrického oblouku. V našem případě byla ale rychlostní kamerou zaznamenána emise světla při nadskoku i v případech, kdy se napět'ový úbytek pohyboval v hodnotách okolo 2 V. Z daného lze usoudit, že při oddalování je v daných případech stále zachován kovový styk, přesněji vodivé spojení kontaktů kapalnou fází mědi. Při těchto extrémních proudových hustotách zřejmě dochází k vypařování mědi a případně i k ionizaci těchto par. Při jejich rekombinaci pak vzniká záření, jež bylo pozorováno rychlostní kamerou. Pro přesnější popis těchto pochodů a především odlišení hoření elektrického oblouku od záření par mědi by bylo nutné použití spektrometru.

5.8.1 Analýza svaru

Prakticky všechny silové kontakty se při běžných a převážně výjimečných stavech slepí či svaří. Výrazné problémy svaření představuje v případě, kdy jeho pevnost v tahu zabraňuje správné činnosti kontaktního systému. Vytvoření svaru je velmi komplexní proces, závislý například na kontaktním materiálu, struktuře povrchu kontaktů, struktuře a povaze cizích vrstev a zřejmě i na existenci elektrického oblouku či konstrukci kontaktního systému. [9]

Detail dynamického svaru, jemuž předcházelo hoření elektrického oblouku při pokusu č. 9 je zobrazen na Obr. 5.22.



Obr. 5.22 Svaření kontaktů při pokusu č. 9 a) detail svaru b) místo svaru pevného kontaktu c) místo svaru pohyblivého kontaktu

Pro sílu svaru v tahu lze psát vztah:

$$F_w = R_m \cdot A_w \text{ [N; Pa, m}^2\text{]} \quad (5.6)$$

Kde R_m je pevnost kontaktního materiálu v tahu a A_w je plocha svaru. Rozsah udávané pevnosti mědi v tahu je od 120 MPa pro odlévanou měď po 460 MPa pro měděný drát tažený za studena, silně tak závisí na procesu tváření či příměsích. Přibližně lze taktéž psát, že pevnost materiálu v tahu je $R_m \approx \frac{1}{3} H_M$. Doposud byla uvažována tvrdost použitých měděných dílů $H_{M,Cu} = 420$ MPa, poté její pevnost v tahu bude $R_{m,Cu} \approx \frac{1}{3} \cdot 420 \cdot 10^6 \approx 140 \cdot 10^6$ Pa [9]

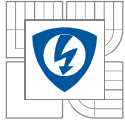
Při 10. pokusu byla změřena síla svaru kontaktů v tah o velikosti 84 N. Plocha svaru poté bude přibližně:

$$A_w = \frac{F_w}{R_{m,Cu}} = \frac{84}{140 \cdot 10^6} = 0,6 \text{ mm}^2 \quad (5.7)$$

Při uvažování kulového svaru o vypočítaném průřezu je průměr svaru:

$$d_w = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,6}{\pi}} = 0,87 \text{ mm} \quad (5.8)$$

Porovnáním s výpočetními průměry v (5.3),(5.4),(5.5) vychází průměr svaru přibližně čtyřikrát větší. Dané je pravděpodobně způsobeno natavením výrazně větší plochy během oddalování, než jen plochy uvažované – kontaktní. Nicméně výpočet parametrů svaru byl uveden jen stručně, jelikož vzhledem k cílům práce se jedná o vedlejší jev.



6 KRITICKÉ SHRNU TÍ

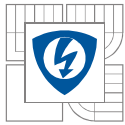
V kapitole 3 byly uvedeny analytické výpočty elektrodynamických sil, jež nutně požadují četná zjednodušení. Některá zjednodušení ovšem prakticky znemožňují objektivitu celkových výsledků. Kontaktní systém se stykem „válec – rovina“ taktéž nesplňuje Holmův předpoklad o rovných styčných plochách, zřejmě ale výsledná odpudivá síla v tomto zúžení při této konfiguraci bude výpočtové síle relativně blízko – přímkový styk je bodovému styku bližší, než styk plošný.

Ve 4. kapitole byl uveden způsob simulování elektrodynamických sil, ale byla přijata opatření příkládající větší přesnost výpočtu úžinové síly analytickému vztahu nad simulačním prostředím. Při detailnějším studiu materiálových vlastností a pružných i nepružných materiálových deformací by bylo možné toto zanáést do programu a úžinové síly tak pomocí MKP nasimulovat.

V 5. kapitole byla provedena série experimentálních měření na přípravku s kontaktním uspořádáním „Cu koule – Cu rovina“. Zřejmě se čistá elektrovodná měď v průmyslu na spínací kontakty neuzívá, jelikož se na jejím povrchu velmi rychle tvoří vrstva CuO_2 a jako kontaktní materiál podléhá snadnému svaření. Taktéž nebyly známy přesné materiálové vlastnosti použitých měděných dílců, uvažovala se tedy elektrovodná měď, jež se charakterizuje vysokou vodivostí a nízkou tvrdostí. Experimentální uspořádání bylo navrženo s ohledem na snadnou realizovatelnost konstrukce i následného měření. Na druhou stranu je ale kontaktní rameno velmi hmotné a zároveň zaujímá výrazný moment setrvačnosti vůči ose otáčení. Použité půlvlně proudu odpovídá i příslušná půlvlna síly, jež je závislá na kvadrátu proudu. Časový integrál této síly po dobu dané půlvlny odpovídá impulsu síly, jež je směrodatný při analýze pohybu pevných těles. Důsledkem může být fakt, že při některých pokusech mohla být překonána přitlačná kontaktní síla silou odpudivou elektrodynamickou po určitý časový interval, ale vzhledem k velkému momentu setrvačnosti ramene mohlo dojít k pohybu natolik nepatrnému, že ani na rychlostní kameře nebyl zaznamenán. Řešením by byl návrh experimentálního měření takového, kde by se kladl důraz na minimální moment setrvačnosti (či hmotnost) kontaktního ramene a kde přitlačná síla by byla nastavována jiným, než tíhovým principem (pružina,...).

Na práci lze tedy navázat přesnějším měřicím experimentem, umožňujícím použití běžných kontaktních materiálů (s definovanými materiálovými vlastnostmi) a zajišťujícím jejich konzistentnost v průběhu měření. Taktéž může být zkoumán vliv tlaku par z hoření oblouku na odpudivou sílu, jelikož po oddálení kontaktů již není složka úžinové síly přítomna a síla způsobená tlakem par může dosahovat řádově stejných velikostí, ovšem po delší časový úsek.

V návaznosti na dané poznatky lze usoudit, že pro výpočet úžinových sil je Holmův vztah vhodný, ale pro výpočet elektrodynamických sil působících od natvarované proudovodné dráhy, popř. i s magneticky nelineárním prostředím, jsou analytické vztahy naprosto nedostačující a pro detailnější analýzu je nutné použití simulačního software s MKP, např. ANSYS Maxwell.



7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala analýzou, výpočty a simulacemi elektrodynamických sil v průmyslovém jističi *nn* s termomagnetickou spouští s důrazem na úžinovou kontaktní sílu. Dále byl navržen a zkonstruován experimentální přípravek pro měření úžinových sil, na němž byla provedena série experimentálních měření.

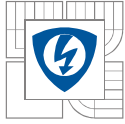
Na začátku práce byly stručně popsány jističe *nn* a následně byl analyzován kontaktní systém kompaktního jističe, přičemž byl kladen důraz na uvedení problematiky volby kontaktních materiálů, zejména jejich tvrdosti.

Pomocí analytických vztahů a segmentace proudovodné dráhy předloženého jističe byla vypočítána elektrodynamická síla působící na pohyblivý kontakt. Byla přijata četná zjednodušení, jako například neuvažování zhášecí komory, přičemž výsledná výpočtová síla je prakticky tvořena úžinovou (Holmovou) silou. V následující kapitole byla proudovodná dráha upravena pro potřeby simulačního software a bylo provedeno 18 simulací. Celková síla získaná pomocí simulací je přibližně z poloviny tvořena složkou od zhášecí komory. Výsledné síly z obou metod byly porovnány, přičemž výrazně větší přesnost byla připsána simulační metodě, která ovšem neposkytuje možnost zjištění úžinových odpudivých sil.

V poslední kapitole byl popsán návrh a následná konstrukce experimentálního přípravku. Byl kladen důraz na jednoduchou a robustní konstrukci. Následně bylo ve zkratové laboratoři provedeno 16 měření. Dílčí průběhy jsou vykresleny v kapitole 5.6. U několika měřicích pokusů bylo dosaženo oddálení pohyblivého kontaktu, přičemž u pokusu č. 9 (Obr. 5.13) hořel po dobu cca 1 ms elektrický oblouk. Okamžité hodnoty elektrického proudu při počátcích oddalování byly uvedeny do souvislosti s teoretickými předpoklady, u všech pokusů se zaznamenaným odskokem nastal počátek oddalování při nižších hodnotách proudu, než odpovídá teoretickým předpokladům, a to až o 50 %. Byly uvedeny pravděpodobné příčiny těchto nepřesností. Avšak Holmův vztah poskytuje velmi rychlý odhad odpudivé kontaktní síly i přes jistá zjednodušující opatření. V případě zvyšující se přitlačné kontaktní síly již nebyly zaznamenány nadskoky, přičemž se u každého pokusu kontakty staticky svařily.

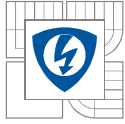
Nad rámec práce byl stručně analyzován svar kontaktů při 10. pokusu měření. Byly taktéž vysloveny požadavky na přístrojové vybavení umožňující detailní náhled do dynamických pochodů mezi kontakty při velmi malých odskocích (řádově 0,1 mm).

V kapitole 6 byly poté kriticky shrnuty závěry z dílčích kapitol a vymezeny směry zájmu pro potenciálně navazující práce.

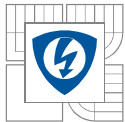


LITERATURA

- [1] VALENTA, Jiří. VUT FEKT. Diagnostika a jištění elektrických zařízení: Elektronické přednášky. Brno, 2015.
- [2] SAMOHEJL, M. Využití vysokorychlostní kamery v oblasti zhášení spínacího oblouku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 38s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D
- [3] HAVELKA, Otto a kol. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985, 440 s. ISBN 04-529-85.
- [4] *GE Industrial Solutions: Circuit breakers* [online]. 2016 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.geindustrial.com/products/circuit-breakers>
- [5] *Elektrická HRANICE: Jistič ABB 1P B16 compact home* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.pristroje-abb.cz/jistic-abb-1p-b16-compact-home-310.html>
- [6] *OEZ: BC160 JISTIČE MCCB DO 160 A* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/produkty/bc160-kompaktni-jistice>
- [7] *Power breakers, contactors and fuses: Volume 4 - Circuit Protection*. EATON, 2016. Dostupné také z: http://www.eaton.com/ecm/idcplg?IdcService=GET_FILE&allowInterrupt=1&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&noSaveAs=0&Rendition=Primary&DocName=VOL04_TAB03
- [8] ČSN EN 60898-1. *Elektrická příslušenství: Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací - Část 1: Jističe pro střídavý provoz (AC)*. 2013.
- [9] SLADE, Paul G. *Electrical contacts: principles and applications*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 1439881308.
- [10] Technický průvodce - instalace nn: Koordinace jisticích přístrojů nn - selektivita a kaskádování. In: Schneider electric [online]. 2006 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://www.schneider-electric.cz/documents/designers/top-downloads/kaskadovani_selektivita.pdf
- [11] Jednotky.cz: Převody jednotek. Kilopond [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.jednotky.cz/sila/kilopond/>
- [12] NĚMEČEK, Stanislav. *Zkoušky tvrdosti* [online]. ZČU v Plzni, 2006 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [13] ŠIC, P. Dimenzování proudovodné dráhy elektrických přístrojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 59 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.
- [14] HOLM, Ragnar. *Electric Contacts: Theory and Application*. 4. dopl. vyd. Berlin: Springer-Verlag, 1967, 482 s. ISBN 978-3-540-03875-7.
- [15] *Výkresová dokumentace BC160*. OEZ Letohrad, 2016.
- [16] KOPŘIVA, A. Měření tvrdosti materiálů a zpracování naměřených výsledků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 34 s., 4 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.



- [17] KHARIN, S., H. NOURI a M. BIZJAK. Effect of Vapour Force at the Blow-Open Process in Double-Break Contacts. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. 2009, 32(1), 180-190. DOI: 10.1109/TCAPT.2009.2013986. ISSN 1521-3331. Dostupné také z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4782991>
- [18] HAVELKA, Otto, Dalibor SVOBODA a Zdeněk VÁVRA. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I: určeno pro posluchače fakulty elektrotechnické*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1985, 188 s., příl.
- [19] HAVELKA, Otto. *Stavba elektrických přístrojů I*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988, 262 s. ISBN 55 - 569/1 - 88.
- [20] ANSYS-Maxwell [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z:
<http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell>
- [21] OEZ: *Kompaktní jističe Modeion* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z:
<http://www.oez.cz/produkty/bc160-kompaktni-jistice>
- [22] FALTUS, Ivo. *Příručka elektrotechnika: Jističí přístroje I*. Letohrad, 2011, 92 s.
- [23] KAWASE, Y., H. MORI a S. ITO. *3-D finite element analysis of electrodynamic repulsion forces in stationary electric contacts taking into account asymmetric shape*. In: *IEEE Transactions on magnetics*, VOL. 33, NO. 2. 1997, s. 1994-1999. DOI: 10.1109/20.582692. ISBN 10.1109/20.582692. Dostupné také z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=582692>
- [24] ANSYS INC. *Maxwell 3D user's guide: Maxwell 15.0*. 6th rev. ed. Canonsburg, PA, USA, 2012, 1006 s.
- [25] O Centru. *CVVOZE* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z:
http://www.cvvoze.cz/o_centru/index
- [26] Informace o VTPPL. *VTPPL* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z:
<http://www.vtppl.cz/informace-o-vtppl>
- [27] BRDEČKO, A. *Popis zkratovny CVVOZE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Dohnal, Ph.D.
- [28] FENDRYCH, M. *Vyhodnocování chování spínacího přístroje během vypínání zkratového proudu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.
- [29] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. Brno: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.



PŘÍLOHY

A Výkresová dokumentace experimentálního uspořádání měřicího pracoviště pro analýzu kontaktních sil.