

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SIMULACE DĚJŮ V ELEKTRICKÝCH PŘÍSTROJÍCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

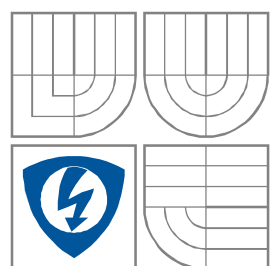
Bc. Ladislav Daševič

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SIMULACE DĚJŮ V ELEKTRICKÝCH PŘÍSTROJÍCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

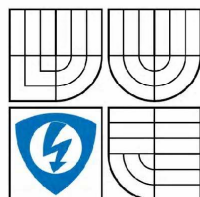
Bc. Ladislav Daševič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Ladislav Daševič
Ročník: 2

ID: 83855
Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Simulace dějů v elektrických přístrojích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vysvětlíte problematiku elektrodynamických sil působících na kontaktní systém jističe.
2. S využitím programu ANSYS určete průběh elektrodynamických sil (momentů sil) působících na kontaktní systém pro různé úhly otevření, jednoduchý model oblouku a zadané proudy.
3. Na základě pohybové rovnice určete časový průběh kinematických veličin kontaktního systému a pohyb kontaktů případně vizualizujte ve vhodném programu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího.

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 22.5.2009

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

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Cílem práce je vysvětlit problematiku sil působících v jistícím zařízení vlivem magnetických polí vznikajících při průchodu zkratových proudů. Tato práce je blíže zaměřena na působení sil u konkrétního uspořádání proudové dráhy zadaného jističe. Jedná se o jistič vyráběný firmou OEZ Letohrad, typ Modeion BD250. V práci je naznačeno jakým způsobem je nutné vytvořit trojrozměrný model proudové dráhy tak aby jej bylo možné použít pro provedení výpočtu ve fyzikálně simulačním programu ANSYS 11. V dalším postupu práce je popsáno jak získané hodnoty využít nejdříve pro výpočet průchodu stejnosměrného a poté střídavého zkratového proudu. Výpočet je proveden v programu MATLAB 6.5. Výsledky jsou uvedeny u obou výpočtů jak v grafické podobě, tak v podobě číselných údajů. Vizualizace byla provedena formou animovaného grafického souboru s příponou GIF. Zpracování jednotlivých snímků proběhlo v programu UNLEAD GIF ANIMATOR 5.

Abstract

Aim of the thesis is to explain the issue of forces acting in circuit breaker caused by magnetic fields induced by short-circuit current. This thesis is focused on force affecting in concrete system of a circuit breaker. The given circuit breaker is made by OEZ Letohrad, the type Modeion BD250. In the thesis the way of creating 3-D model is shown for the purpose of creating numeric simulation by ANSYS 11. The next approach of the thesis is the description of applying the results for DC and AC current calculations. The noted calculation is made in the programme MATLAB 6.5. The solutions are mentioned at calculations both in the graphic form and numeric specifications. Visualisation was made by using GIF graphic system animation. The individual pictures processing was done in the programme UNLEAD GIF ANIMATOR 5.

Klíčová slova

Jistič; proudová dráha; kontaktní úžina; kontaktní systém; elektrodynamická síla; výpočet; pohybová rovnice, kinematické veličiny; úhel otevření; oblouk; zkrat; sestavení; 3D model; působení sil; postup; simulace; vizualizace; animace; ANSYS; MATLAB; UNLEAD GIF ANIMATOR

Keywords

Circuit breaker; current path; contact narrows; contact system; electrodynamic force; solution; equation of motion; kinematic quantities; aperture angle; arc; short-circuit; compilation; 3D model; force affecting; method; simulation; visualisation; animation; ANSYS; MATLAB; UNLEAD GIF ANIMATOR

Bibliografická citace

DAŠEVIČ, L. *Simulace jevů v elektrických přístrojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma simulace dějů v elektrických přístrojích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

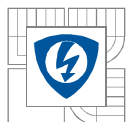
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Rovněž děkuji firmě OEZ Letohrad za poskytnutí skutečného jistícího přístroje BD 250. V neposlední řadě děkuji své přítelkyni Květě Mackové za osobní podporu a zázemí při tvorbě této práce.

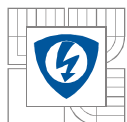
V Brně dne

Podpis autora

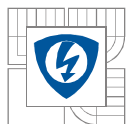


Obsah

1 ÚVOD	13
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	15
3 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ.....	16
4 PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRICKÉM OBVODU	17
4.1 ZAPÍNÁNÍ OBVODU	17
4.2 VYPÍNÁNÍ OBVODU	18
4.3 ELEKTRICKÝ OBLOUK PŘI VYPÍNÁNÍ OBVODU	18
4.4 ZKRAT V ELEKTRICKÉM OBVODU	19
5 FUNKCE SPÍNACÍHO SYSTÉMU JISTIČE.....	19
5.1 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ JISTIČE.....	20
5.1.1 ZÁMEK	20
5.1.2 SPOUŠTĚ JISTIČE	21
5.1.3 ZHÁŠECÍ KOMORA OBLOUKU	22
6 FUNKCE JISTIČE V ELEKTRICKÉM OBVODU.....	23
6.1 JIŠTĚNÍ PŘED NADPROUDY V OBVODU	23
6.2 OMEZOVACÍ FUNKCE JISTÍČÍHO PŘÍSTROJE	24
7 ROZBOR SIL PŮSOBÍCÍCH NA SPÍNACÍ MECHANIZMUS.....	26
7.1 JEDNOTKY POPISUJÍCÍ MAGNETICKÉ POLE.....	26
7.1.1 INTENZITA MAGNETICKÉHO POLE A MAGNETICKÉ NAPĚTÍ.....	26
7.1.2 MAGNETICKÁ INDUKCE A MAGNETICKÝ TOK	27
7.2 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI LÁTEK	27
7.3 VZNIK ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY	28
7.4 PŮSOBNÍ SIL NA PROUDOVÉ DRÁZE	29
7.4.1 PŮSOBNÍ SÍLY PŘI ZMĚNĚ PRŮŘEZU A JEJÍ VÝZNAM	29
7.4.2 VÝPOČET SÍLY OD KONTAKTNÍ ÚŽINY	31
7.4.3 PŮSOBNÍ SIL V ZAKŘIVENÉ PROUDOVÉ DRÁZE	31
8 POHYBOVÁ ROVNICE SPÍNACÍHO MECHANIZMU	33
8.1 ZPŮSOB VÝPOČTU MOMENTU SIL VE SPÍNACÍM KONTAKTU	33
8.2 STANOVENÍ MOMENTU SETRVAČNOSTI	36
8.3 VÝSLEDNÁ POHYBOVÁ ROVNICE KONTAKTU.....	36
8.3.1 ZJEDNODUŠENÝ VÝPOČET POHYBOVÉ ROVNICE	37
9 VYTVOŘENÍ CAD MODELU KONTAKTNÍHO SYSTÉMU.....	37
9.1 GEOMETRIE KONTAKTNÍHO SYSTÉMU PŘÍSTROJE	38
10 VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL V PROGRAMU ANSYS.....	42
10.1 PŘÍPRAVA MODELU	42
10.1.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY PRO ELEKTRICKOU ANALÝZU.....	44

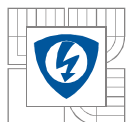


10.1.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY PRO MAGNETICKOU ANALÝZU	44
10.2 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO PROSTŘEDÍ.....	45
10.3 VÝPOČET MAGNETICKÉHO PROSTŘEDÍ.....	46
10.4 VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÉHO MOMENTU SÍLY V ANSYS	48
11 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	50
11.1 MKP-DISKRETIZACE.....	50
11.1.1 DISKRETIZACE V ZADANÉ ÚLOZE	50
12 INTERPOLACE.....	51
12.1 INTERPOLACE V ZADANÉ ÚLOZE	52
13 VÝPOČET POHYBOVÉ ROVNICE V PROGRAMU MATLAB	53
13.1 VÝSLEDKY ŘEŠENÍ PRO DC ZKRATOVÝ PROUD 20kA.....	54
13.2 VÝSLEDKY ŘEŠENÍ PRO AC ZKRATOVÝ PROUD	56
14 VIZUALIZACE POHYBU KONTAKTŮ	59
15 ZÁVĚR.....	61
16 POUŽITÁ LITERATURA	63
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	64
PŘÍLOHA 1: BH KŘIVKA.....	65
PŘÍLOHA 2: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU DC PROUDU	66
PŘÍLOHA 3: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU AC PROUDU	68

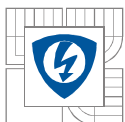


Seznam obrázků

<i>Obr. 4-1: Jednoduché náhradní schéma sítě s naznačeným zkratem.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4-2: Zapínání RL obvodu a)DC b)AC proud</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4-3: Vypínání obvodu při $R < L$ a)DC zdroj b)AC zdroj</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4-4: Průběh napětí a proudu na kontaktech při zhášení oblouku [2].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 5-1: Konstrukce jističe nn</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5-2: Typy spouští [2].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 5-3: Charakteristiky spouští [2].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 5-4: Zhášecí komora jističe BD250</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6-1: Poškozený kontakt působením oblouku</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 6-2: a)Zatěžování vodiče, b),c) zatěžovací charakteristika</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 6-3: Omezovací funkce jističe</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 7-1: Spin elektronu.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 7-2: Síly v kontaktu</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 7-3: Schématický průchod proudu stykem ploch</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 7-4: Zakřivená proudová dráha, pravý úhel.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 8-1: Pohyblivý kontakt, síly.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 8-2: Pohyblivý kontakt, otevírání.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 9-1: Kompaktní jistič Modeion BD250 [8]</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 9-2: Flexopass.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 9-3: Model DB250, 2D</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 9-4: Komponenty trojrozměrného modelu kontaktního systému</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 10-1: Operace GLUE, slepení objemů [6]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 10-2: Výpočtová síť, MASH</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 10-3: Proudová hustota při 20kA</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 10-4: Vektory proudové hustoty při 20kA.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 10-5: Rozložení hustoty magnetické indukce</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 10-6: Vektory magnetické indukce.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 10-7: Průběh momentu M_{ZD}, 20kA</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 10-8: Vektory elektromagnetické síly FMAG</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 11-1: Metoda konečných prvků.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 12-1: Lineární interpolace.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 12-2: Kubický splajn [3].....</i>	<i>52</i>

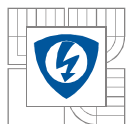


<i>Obr. 12-3: Průběh interpolace momentu síly od pružiny v závislosti na úhlu otevření.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 13-1: Řešení diferenciální rovnice Eulerovou metodou [11]</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 13-2: Celkový moment síly působící na pohyblivý kontakt.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 13-3: Závislost úhlu otevření kontaktu na čase</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 13-4: Úhlová rychlost otevírání kontaktu v závislosti na čase</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 13-5: Závislost úhlové rychlosti na úhlu otevření kontaktu.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 13-6: Průběh uvažovaného zkratovaného proudu AC</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 13-7: Průběh momentu působícího na horní kontakt a úhlu jeho otevření</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 13-8: Průběh úhlové rychlosti v čase.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 13-9: Průběh úhlové rychlosti v závislosti na úhlu otevření.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 14-1: Animace ve formátu GIF</i>	<i>59</i>



Seznam tabulek

<i>Tab. 9.1: CAD balíčky a podporované typy souborů [6]</i>	38
<i>Tab. 10.1: BH křivka Fe</i>	43
<i>Tab. 10.2: Přehled magnetických indukcí PM[10]</i>	47
<i>Tab. 10.3: Výsledné momenty sil MD, 20kA</i>	49
<i>Tab. 11.1: Měření síly pružiny siloměrem</i>	51
<i>Tab. 12.1: Hodnoty momentů sil od pružiny po lineární interpolaci</i>	52
<i>Tab. 14.1: Časový sled a odstup snímků animace</i>	60



1 ÚVOD

Prvním krokem při tvorbě této práce bude seznámení se s problematikou ochrany a jištění elektrických obvodů pomocí jističů. V této části bude kladen důraz na mechanické uspořádání malého domovního jističe LSN, neboť je konstrukčně velice přehledný a v podstatě má stejný princip, jako výkonové jističe. V návaznosti na tuto část bude rozebrána úloha jističe po elektrické stránce. V tomto ohledu je jistič specifický přístroj a je nutné věnovat této oblasti při výběru ochrany elektroinstalace hlavní pozornost.

Před stanovením elektrodynamických sil bude vysvětleno, jakým způsobem dochází ke vzniku magnetického pole, a jakým způsobem je možné jej popsat, dále pak bude uvedeno, jak se různé materiály chovají v přítomnosti magnetického pole.

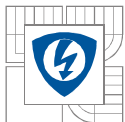
Základním kamenem práce je sestavení pohybové rovnice pro konkrétní uspořádání jističe. Pro sestavení pohybové rovnice bude nejdříve zjištěno, jaké síly budou působit na kontaktní systém a jaký moment síly vytvoří vzhledem k ose otáčení. Stanovení momentu síly proběhne výpočtem v programu ANSYS.

Tvorba CAD modelu bude popsána pouze stručně. Jedná se pouze o prostředek, který umožní stanovit moment setrvačnosti pohyblivých částí a dále umožní výpočet elektrodynamických sil a momentu, který tyto síly způsobují. Bude zde uvedeno několik formátů, jež užívají různé CAD systémy. Zde bude představen konkrétní jistič a jeho parametry, kdy budou uvedeny jednotlivé konstrukční části modelu a také způsob, jakým proběhne export do programu ANSYS.

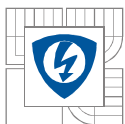
Popis způsobu výpočtu elektrodynamických sil v programu ANSYS bude proveden následovně. Hlavním cílem je uvést, jaké materiálové vlastnosti a jaké okrajové podmínky se musejí zadat. Budou tedy popsány kroky, jež vedou k dosažení výsledku a výsledky, kterých bylo tímto dosaženo. Výsledky bude nutné konfrontovat s očekáváním, neboť použití počítačových simulací snadno uvede jako výstup nesprávné hodnoty. To je nejčastěji způsobeno zadáváním vstupních parametrů, kterých často bývá mnoho a snadno se stane chyba. Výpočet proudové hustoty bude ověřen přímo v jednoduché části proudové dráhy a hodnoty magnetické indukce budou porovnány s referenční tabulkou různých zdrojů.

Další navazující kapitolou je vysvětlení principu výpočtu pomocí metody konečných prvků. Tuto metodu využívá program ANSYS a jedná se o obecný postup, jakým lze na počítači provádět simulace skutečných dějů. Pro přehlednost bude nastíněn princip diskreditace. Hlavním důvodem, proč je tato kapitola přítomna v této práci, je to, že získané hodnoty momentů sil jsou pouze pro určité úhly otevření kontaktů. Jsou to úhly od 0° do 42° , protože pohybová rovnice vyžaduje hodnoty jako spojitou funkci času. Tento krok je velice hrubý, bude tedy nutné aproximovat neznámé hodnoty pomocí splajnu. Tyto hodnoty budou dopočteny pomocí programu MATLAB. Bude popsán způsob, jakým toho bylo dosaženo.

Vlastní pohybová rovnice bude následně také řešena v programu MATLAB za pomoci vhodné numerické metody, jež bude popsána včetně její aplikace pro konkrétní případ. Tyto výpočty povedou k řešení, na jehož výstupu bude časová závislost úhlu otevření. Pro přehlednost bude uvedena závislost úhlové rychlosti kontaktu na čase a závislost úhlové rychlosti na úhlu otevření. Tímto bude přehledně popsán celý děj. Řešení proběhne jak pro stejnosměrný zkratový proud, tak pro proud střídavý.



Tvorba vizualizace pohybu kontaktů je doplňkový způsob prezentace dosažených výsledků. I tento krok se potýká s technickými problémy. Bude popsáno, jakým způsobem byla vizualizace provedena a jaká omezení s sebou nese. Pro tvorbu animace byl využit program UNLEAD GIF ANIMATOR 5.

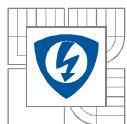


2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Problematika řešení dějů v elektrických přístrojích je v současné době opět v prudkém rozvoji. Tuto skutečnost s sebou nesou nové technologie (modulární mikroprocesorová spoušť), které umožňují zvýšit flexibilitu jističích přístrojů potřebám konečných sítí. Z tohoto důvodu je opět nutné optimalizovat proudové dráhy pro nové potřeby. Dřívější konstrukce byly navrženy pouze pro statickou charakteristiku a při změně poměrů v sítích bylo nutné měnit jistič jako celek. Nyní je možné vyměnit pouze modulární spoušť a vlastní výkonový prvek jističe ponechat v zapojení.

Toto téma je bohužel natolik specifické, že je možné získat z běžně dostupných publikací pouze několik desítek let staré výukové podklady. Naproti tomu jsou dostupné katalogy výrobců, které mají uvedeny vždy aktuální parametry, ale bez hlubšího rozboru technických podrobností.

Dostupné zdroje na internetu také vždy uvádějí obecné principy, avšak v horší odborné kvalitě, než získané výukové materiály. Nejcenějším studijním zdrojem mi byly osobní konzultace s vedoucím práce a výukové podklady SNTL Praha, spolu s učebním textem VUT Brno.



3 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ

Nejdříve bude vysvětlena problematika zadaného tématu. V obecné části budou podrobněji popsány ty oblasti, které souvisejí s působením sil při vypínání obvodu jističem. Proces vypínání je dimenzován pro poruchové proudy, které dosahují vysokých hodnot. Tím je nutné provést velice pečlivě konstrukci kontaktního systému, kdy budou prostudovány všechny známé vlivy.

Vlastní řešení bude provedeno výpočtovým programem ANSYS. 3D model pro výpočet bude sestaven dle skutečného jističe v programu AUTOCAD. Získané hodnoty momentu sil, z výpočtu v Ansys, budou využity v numerickém řešení pohybové rovnice kontaktu. Pohybová rovnice bude řešena Eulerovou zpětnou metodou pomocí skriptu napsaného pro program MATLAB.

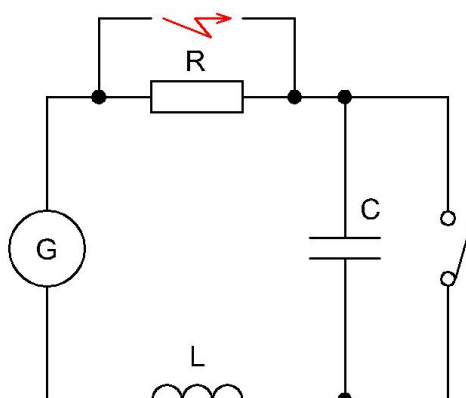
Získaný výsledek bude čas doby, po kterou bude kontakt rozevírán. Bude uvažován vliv pouze elektrodynamických sil a přítlačné pružiny. Nebude tedy uvažováno vybavení zámku jističe. Výsledek bude uveden číselně, graficky v závislostech:

- úhel otevření funkcí času, $\Phi = f(t)$
- úhlová rychlost funkcí času, $\omega = f(t)$
- úhlová rychlost funkcí úhlu otevření, $\omega = f(\Phi)$

Poslední prezentací výsledku bude sestavení vizualizace pohybu kontaktů v podobě animace. Ta bude provedena ze snímků sestavených do souboru GIF podporujícího animaci.

4 PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRICKÉM OBVODU

Přechodný jev vzniká rychlou změnou parametrů obvodu. Ta může být vyvolána několika způsoby, které lze demonstrovat na elementárním náhradním schématu sítě:



Obr. 4-1: Jednoduché náhradní schéma sítě s naznačeným zkratem

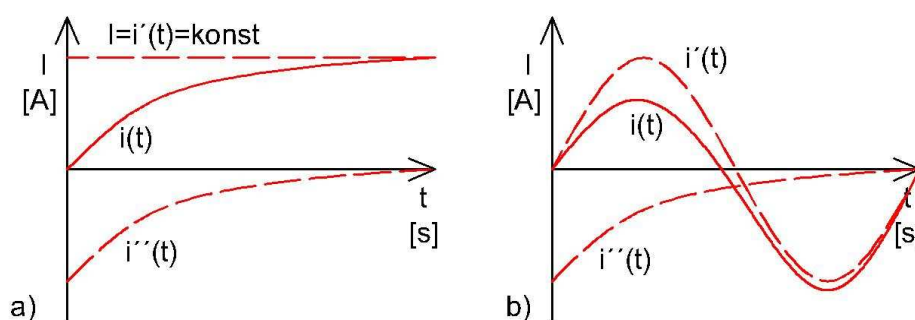
Průběh přechodových dějů je dán parametry obvodu, jež jsou dány velikostí R, C, L a stavem ve kterém se obvod nacházel před započítáním přechodových dějů. Pro zjednodušení budou v následujícím textu uvažovány počáteční podmínky $t=0, i=0$.

4.1 Zapínání obvodu

Při zapínání dojde ke zkratování kondenzátoru, nebude jej nutné uvažovat a přechodový děj bude charakterizován sériovým zapojením L, R :

$$u(t) = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \quad (\text{V}) \quad (4-1)$$

Výsledný proud této rovnice je závislý na charakteru zdroje, výsledné průběhy jsou patrné na obrázku:



Obr. 4-2: Zapínání RL obvodu a) DC b) AC proud

Ustálený proud obvodem je značen $i'(t)$, přechodová složka proudu je značena $i''(t)$ a výsledný proud je $i(t)$:

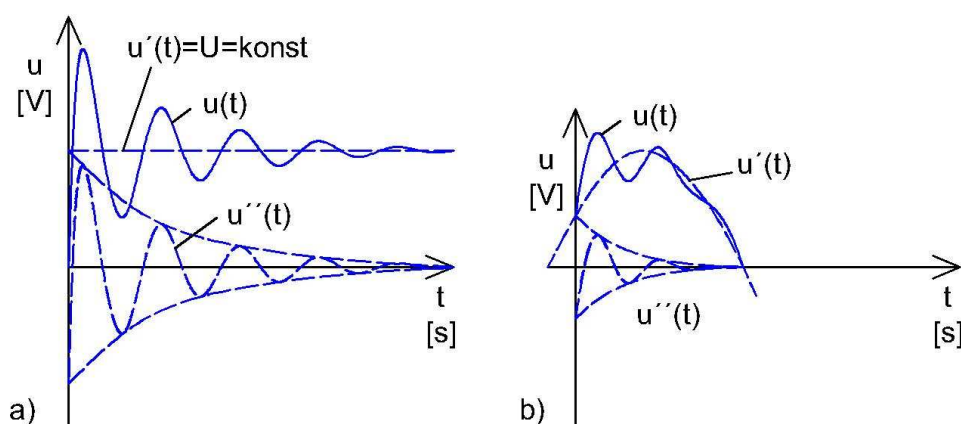
$$i(t) = i'(t) + i''(t) \quad (\text{A}) \quad (4-2)$$

4.2 Vypínání obvodu

Pro jednoduchost bude uvažováno bezobloukové vypínání obvodu. Přechodový děj (R,C,L) bude již ovlivněn kapacitorem a bude charakterizován nárůstem napětí na svorkách vypínače:

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (\text{V}) \quad (4-3)$$

Při úvaze nulových počátečních podmínek bude výsledek závislý na velikosti odporu R vzhledem k indukčnosti L. Ve skutečných přenosových sítích lze uvažovat nerovnost $R \ll L$, grafické řešení průběhu napětí pak bude:



Obr. 4-3: Vypínání obvodu při $R \ll L$ a) DC zdroj b) AC zdroj

Z (Obr. 4-3) a) je patrné, že teoretická maximální hodnota překmitu by mohla být rovna dvojnásobku U . Obdobný stav platí pro b). Zde může být teoretická maximální hodnota rovna $2 \cdot U_m$.

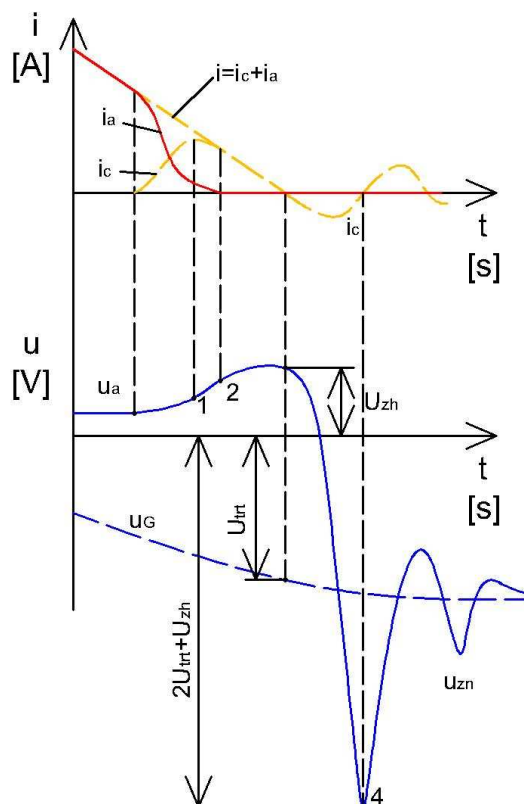
4.3 Elektrický oblouk při vypínání obvodu

Vznik elektrického oblouku je nevyhnutelný zvláště pro vyšší hodnoty napětí sítí a jeho zhášení je obtížné z důvodu vysokých proudů tekoucích obvodem. Při úvaze zjednodušeného obvodu (Obr. 4-1) bude průběh napětí a proudu na kontaktech vypínače dle (Obr. 4-4) [1]. Celkový proud obvodem je složen z proudu tekoucího kapacitorem i_c a proudu tekoucího paralelním obloukem i_a . Napětí u_a je napětí na kontaktech (oblouku), což je také napětí na kapacitoru u_c . To má dle rovnice (4-4) vliv na velikost nabíjecího proudu kapacitoru i_c , na obrázku je maxima dosaženo v čase 1. Pokud je napětí na oblouku neměnné, potom je nabíjecí proud kapacitoru nulový, ale až se začne obloukové napětí růst dle ohmova zákona v závislosti na rostoucím odporu, začne také růst napětí na oblouku. V tuto chvíli začne kondenzátor odebírat proud (nabíjí se) dle (4-4).

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (\text{V}) \quad (4-4)$$

Tím je dosaženo ještě rychlejšího poklesu proudu obloukem k nule. V obrázku je znázorněno jako čas 2. Hodnota napětí u_{zh} je dosažena v okamžiku, kdy proud dodaný zdrojem a indukčností je roven nule. Přestane se nabíjet kapacitor a v tuto chvíli je napětí na kontaktech dáno napětím vyvolaným nabitým kapacitorem.

V tuto chvíli došlo ke zhasnutí oblouku a napětí na kontaktech bude mít tendenci kopírovat napětí zdroje, se ale začne projevovat přechodový děj popsáný v kapitole vypínání obvodu. Kapacita se rychle vybije, pokles i_c na nulu vyvolá v indukci nárůst napětí, to se nasuperponuje na napětí zdroje spolu s počáteční podmínkou kapacity U_{zh} a způsobí překmit o velikosti $2U_{trt} + U_{zh}$, v obrázku čas 4.



Obr. 4-4: Průběh napětí a proudu na kontaktech při zhasnutí oblouku [2]

4.4 Zkrat v elektrickém obvodu

Zkrat lze v (Obr. 4-1) charakterizovat přemostěním odporu. V tomto zjednodušeném schématu není uvažován odpor vedení, které v podstatě zmírňuje následky zkratu. Zkrat způsobí prudký pokles odporu na hodnotu odporu vedení a přechodový děj bude vyvolán indukčností. Celý děj bude obdobný jako při zapínání obvodu až na to, že nárůst proudu bude vlivem nízké časové konstanty velice rychlý a vlivem nízkého odporu bude dle Ohmova zákona proud nabývat vysokých hodnot.

5 FUNKCE SPÍNACÍHO SYSTÉMU JISTIČE

Jistící přístroj, jak plyne již z názvu, je samočinný vypínač, jenž odpojí obvod od sítě při poruchovém stavu. Jistí tedy samotný obvod před destrukcí, ale také chrání majetek a zdraví lidí. Poruchový stav může vzniknout buď přetížením obvodu zvýšenou hodnotou jmenovitého proudu, nebo přímo jeho zkratem při mnohonásobku jmenovitého proudu. Jistící přístroje tedy reagují na zvýšené hodnoty proudů tekoucích v obvodu, a to takovým způsobem, že jsou schopny vypnout řádově 100 násobek proudu jmenovitého. V případě běžného domovního jističe od firmy SEZ

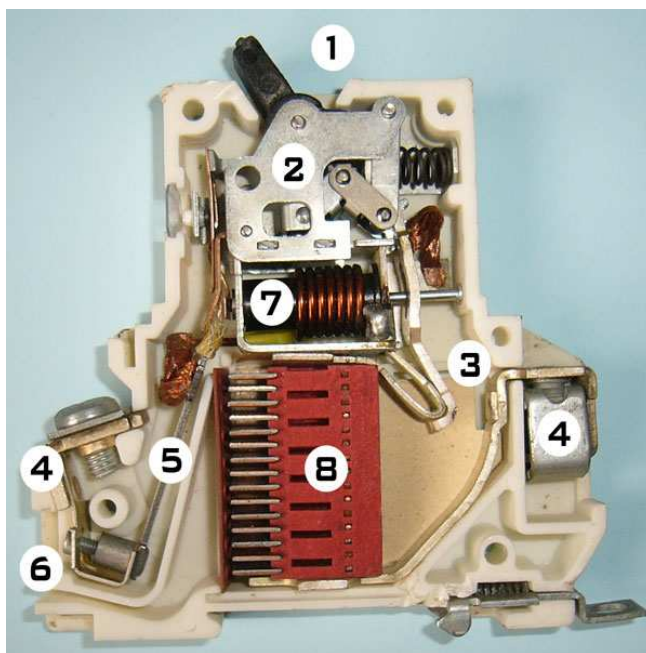
Krompachy $I_n 10A$ zaručuje vypnutí 6kA [4], což je 600 násobek I_n . Tato hodnota je řadí do kategorie výkonových spínacích přístrojů nízkého napětí.

5.1 Konstrukční provedení jističe

Technické uspořádání jističe musí být provedeno tak, aby jej bylo možné opakovaně použít a aby byl také bezpečný zcela spolehlivý. Musí tedy obsahovat mechanismus, který jej opakovaně uvede do pohotovostního stavu a musí obsahovat prvky, jež se dokáží vyrovnat s účinky vzniklého oblouku. Konstrukční provedení jističe je patrné na (Obr. 5-1), kde je jednoduchý přístroj určený hlavně pro domovní instalace. Průmyslové jističe mají podstatu funkce založenou na stejném principu a navíc jsou doplněny procesorovou spouští. Ta umožňuje nastavení charakteristiky přístroje dle potřeby.

Hlavní konstrukční části:

1. Páčka mechanismu ovládacího členu umožňující ruční obnovení pohotovostního stavu jističe a jeho uvedení do rozpojeného stavu.
2. Mechanismus ovládacího členu, zámek jističe.
3. Kontakt umožňující přerušování obvodu.
4. Připojovací svorky.
5. Bimetalový pásek.
6. Šroubek umožňující nastavení citlivosti tepelné spouště.
7. Cívka magnetické spouště.
8. Zhášecí komora oblouku.



Obr. 5-1: Konstrukce jističe nn

5.1.1 Zámek

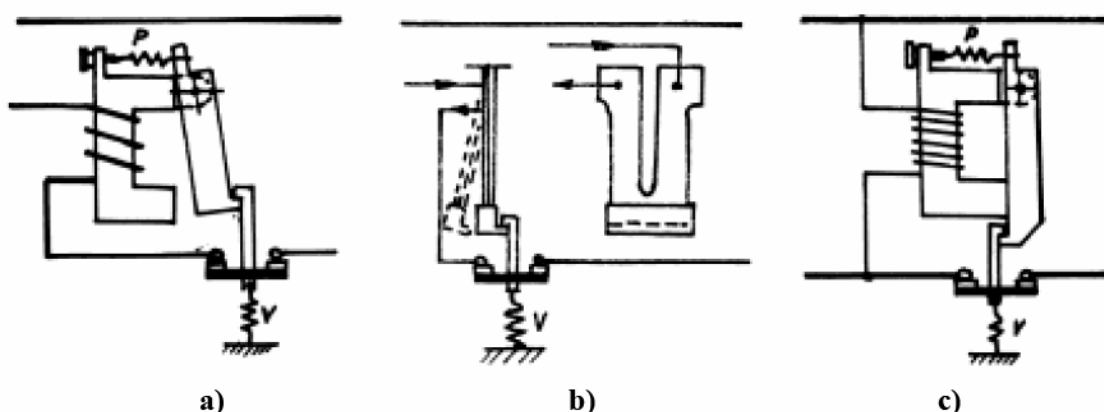
Zámek (2) v (Obr. 5-1) je zařízení, které má za úkol držet kontakt v sepnuté poloze silou, jež působí proti síle v odpojené poloze. Na zámek je kladen protichůdný požadavek. Prvně musí

tlačit kontakt v sepnuté poloze dostatečnou silou tak, aby nevznikal velký přechodový odpor a kontakt se neopaloval. Za druhé musí být síla k jeho vybavení byla dostatečně malá tak, aby byla spoušť schopná vyvinout potřebnou sílu v co nekratším čase při co nejmenším konstrukčním provedení. Zámek musí být ovladatelný spouští (1), která může být provedena místním ovládáním nebo dle potřeby dálkovým.

5.1.2 Spouště jističe

Úkolem spouště (7,5) v (Obr. 5-1) je uvést v činnost funkci zámku. Z přímé fyzikální podstaty vyplývají dva základní způsoby, jak na tyto proudy může spoušť reagovat. Pokud je proud pouze mírně zvýšený, využívá pouze jeho tepelných účinků při průchodu proudovou úžinou tvořenou bimetalovým páskem. Ten je tvořen dvěma různými kovy, které mají každý různou tepelnou roztažnost. Tento fakt způsobí pnutí v pásku, který je pevně ucelen. Pnutí způsobí ohnutí pásku na stranu kovu s menší teplotní roztažností. Takto ovládaná spoušť se nazývá tepelná. Její výhodou je, že reaguje i na poměrně malé nadproudy (řádově aspoň 40% nad jmenovitou hodnotu u LPN-B [7]), a to s časovým zpožděním, které zabrání nežádoucímu vypnutí. To je dáno tepelnou kapacitou bimetalového pásku v součinnosti s tepelnou roztažností kovů. Tato spoušť je tedy časově závislá (Obr. 5-2) b).

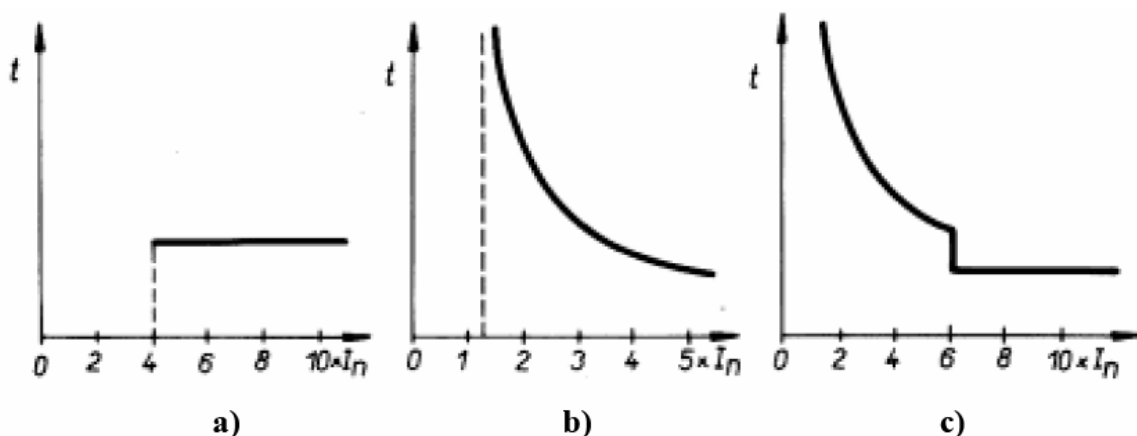
Další přímý způsob, jak reagovat na zvýšený proud, je možný pomocí elektromagnetické spouště (Obr. 5-2) a), c). Zde je využito silových účinků magnetického pole cívky, který je závislý na čtverci proudu. Tyto spouště jsou velice rychlé a reagují na vysoké hodnoty proudu. Ty lze konstrukčně využít jak k jištění proti nadproudům (Obr. 5-2) a) tak také k jištění proti účinkům příliš malého napětí, (Obr. 5-2) c). U podnapět'ové ochrany (někdy nazývané nulové) je vinutí připojeno paralelně k jištěnému obvodu. Reaguje opět vybavením zámku, když napětí klesne o určitou hodnotu (obecně 40%) pod napětí jmenovité. Tento stav nastává v úseku vedení, kde je vysoký odběr proudu. Tímto vinutím protéká stále proud, jež vytváří magnetické pole a moment který drží zámek spouště v sepnuté poloze při žádaných poměrech v síti. Vzhledem k této skutečnosti je nutné konstruovat tuto ochranu tak, aby měla co nejmenší spotřebu energie.



Obr. 5-2: Typy spouští [2]

Vzhledem k tomu, že tyto spouště mají rozdílné časové charakteristiky, které se vhodně vzájemně doplňují, tak se v jističích obě spouště kombinují. Tato kombinace tedy spojí výhody obou spouští v jeden celek, kdy jistič reaguje na malé proudy s časovým zpožděním, což je vhodné, protože dovoluje krátkodobé přetížení. Přetížení může být způsobené například sepnutím obvodu s výraznou hodnotou kapacitou. V tomto případě nedojde k poškození zařízení. Na

druhou stranu velice pohotově reaguje na vysoké nadproudy, například zkraty. V tomto případě je žádoucí co nejrychlejší odpojení, které by spoušť tvořená bimetalovým páskem v požadovaném čase z daleka nestihla. Charakteristika magnetické spouště je na (Obr. 5-3) a), charakteristika tepelné spouště je na (Obr. 5-3) b), a jejich častá kombinace je na (Obr. 5-3) c).

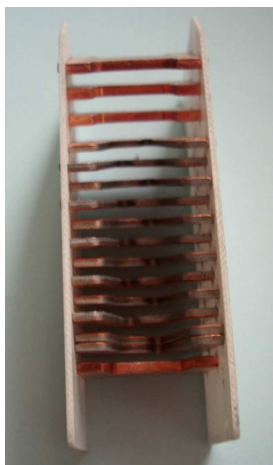


Obr. 5-3: Charakteristiky spouští [2]

5.1.3 Zhášecí komora oblouku

Vzhledem k tomu, že jistič musí být schopen vypnout v krátkém čase velmi velké hodnoty proudu (až 100 násobek proudu jmenovitého), který protéká vzniklým obloukem, musí být použit systém pro jeho zhášení. Tento oblouk je sveden do zhášecí komory (8) v (Obr. 5-1) a (Obr. 5-4), kde se rozloží do moha menších oblouků. Oblouky jsou poté vhodnou konstrukcí této zhášecí komory vtlačovány do prostoru s větší délkou dráhy, kdy dochází k natažení oblouku a zvětšení jeho odporu zároveň s větším odvodem tepla. Zvětšení odporu zároveň klade větší požadavek na napětí, aby se oblouk udržel a zároveň větší odvod tepla způsobuje deionizaci prostředí. Tím také podporuje zánik vhodného prostředí pro vedení elektronů mimo proudovou dráhu (obloukem).

Zhášecí komora je vyráběna z geometricky tvarovaných plechů, které mají provedenou povrchovou úpravu zabraňující jejich korozi. Tato povrchová úprava se provádí pomědňím. Výrobním materiálem je ocel, protože má na rozdíl od mědi vysokou permeabilitu (magnetickou vodivost). Řádově tisíckrát větší než vzduch nebo měď. To způsobuje vtahování oblouku do oblasti, kde je dosaženo stavu s nejnižší energií, do magneticky vodivého železa.



Obr. 5-4: Zhášecí komora jističe BD250

6 FUNKCE JISTIČE V ELEKTRICKÉM OBVODU

Jistič je elektrický přístroj, který je možné do jisté míry chápat jako náhradu pojistky. Jeho velkou výhodou je, že jej lze opakovaně použít pouhým nastavením zámku do pohotovostní polohy. Další důležitou výhodou je, že moderní jističe, zvláště výkonové, dovolují flexibilní nastavení charakteristiky dle požadavků změn elektrické instalace. Jistič má za úkol chránit elektrické zařízení a elektrickou síť od destrukce poruchovými proudy. Plní úlohu ochranou a jisticí. Jeho úkolem je rychlé samočinné vypínání proudů spadající do skupiny výkonové elektrotechniky. Tedy proudů poruchových, které jsou mnohonásobkem proudů jmenovitých, jak bylo podrobněji popsáno v předchozí kapitole. Z tohoto důvodu je nutné počítat s působením značných elektrodynamických sil zároveň s obloukem, který rovněž vyvíjí značné tepelné namáhání. V této kapitole je vysvětleno jakým způsobem dochází k vypínání takovýchto proudů.



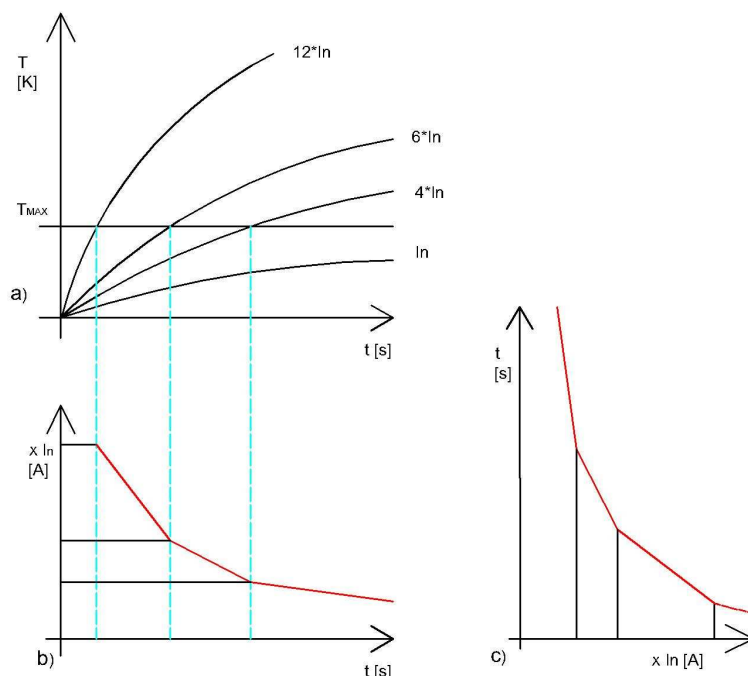
Obr. 6-1: Poškozený kontakt působením oblouku

Úloha jističe je nezastupitelná proudovým chráničem, neboť ten z principu funkce nechrání jako jistič před nadproudy, ale před jejich svodem mimo elektrický obvod. Jelikož vypíná již při velice malých hodnotách proudů, které tečou poruchovou trasou mimo vymezený elektrický obvod. Z toho hlediska brát proudový chránič jako vhodnou ochranu před úrazem elektrickým. Proudový chránič pracuje tak, že proud, který do obvodu vtéká, musí také z obvodu vytékat a pokud tato rovnováha neplatí, tak chránič obvod přeruší. Avšak nastane-li mezifázový zkrat, tak je tato podmínka rovnováhy splněna a proudový chránič obvod nepřeruší. Zde je právě nezastupitelnost principu jističe. Z těchto důvodů není nutné proudové chrániče konstruovat pro vypínání vysokých hodnot proudů.

6.1 Jištění před nadproudy v obvodu

V elektrickém obvodu tvořeném elektroinstalací mohou poměrně jednoduše nastat stavy, kdy je na vedení připojeno velké množství spotřebičů, nebo spotřebiče o příliš vysokém výkonu. Pokud takováto situace nastane, dojde k tomu, že vodiči protéká proud, na který nejsou dimenzovány a pak dochází k jejich nadměrnému oteplování (Obr. 6-2) a). Pokud by takovýto obvod nebyl jištěn, tak může velice snadno dojít k požáru, neboť teplo uvolněné v proudových úžinách kontaktů a spojů instalace, nebo ve vodičích samotných, převyší množství tepla, které je okolí schopno bezpečně odvést, a pak snadno vznítí izolaci vodičů, nebo hořlavé části elektroinstalace či okolí. Naopak není nutné vypínat takové nadproudy, jejichž tepelné účinky trvají krátkou dobu a nestihnou vyvinout dostatečné množství tepla. Tyto nadproudy vznikají přechodovými ději při zapínání spotřebičů s kapacitami, nebo při vypínání indukčních odběrů,

jako jsou například elektrické motory. Aby tedy nedocházelo k těmto planým poplachům, mají jističe časovou spoušť, která reaguje na nízké proudy za dlouhý čas a na vyšší za kratší čas (Obr. 5-3) b) (viz předchozí kapitola). Tímto je zajištěna bezpečnost vedení a zároveň je síť spolehlivě použitelná i pro spotřebiče s počátečním několikanásobným odběrem proudu.



Obr. 6-2: a) Zatěžování vodiče, b), c) zatěžovací charakteristika

Jištění před nadproudy definovala norma ČSN 34 1020 (34 1020), nyní nahrazena normou ČSN 33 2000-4-473 (332000).

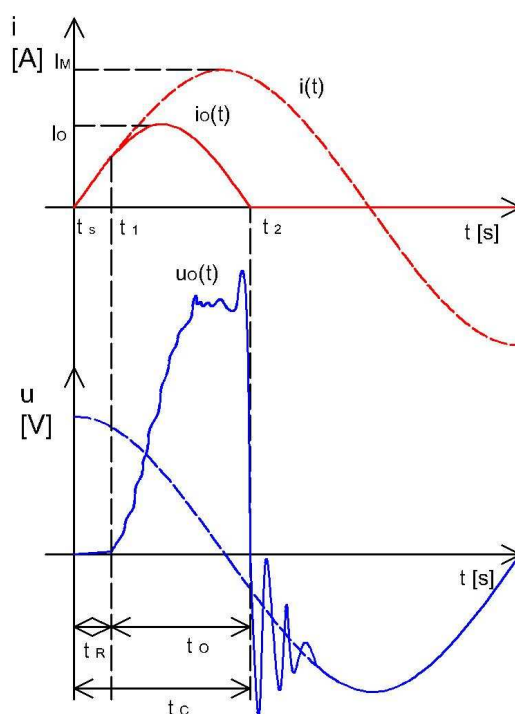
Odvození zatěžovací charakteristiky vodiče je patrné z (Obr. 6-2), kdy charakteristika jističe (Obr. 5-3) b) musí být volena tak, aby v celém průběhu ležela s dostatečnou rezervou, dle normy, pod charakteristikou vodiče. Tímto bude zaručeno, že jistič nepropustí takové proudy, jež způsobí nebezpečné oteplení vodiče.

6.2 Omezovací funkce jističího přístroje

Omezovací funkce jističe znamená to, že maximální hodnota proudu, jaký projde jističem, bude menší než, jaká by byla dosažena, pokud by obvod nebyl jištěn. Tato vlastnost je zásadní, neboť dle Jouleova integrálu (6-1) bude omezen výkon ve formě tepelných účinků způsobený právě tímto proudem. Zde je nutné si uvědomit, že maximální zkratový proud I_M bude nabývat velmi vysokých hodnot a omezený proud I_O bude zlomkem této maximální hodnoty.

Aby platilo, že má jistič omezovací funkci, musí být splněny tyto podmínky:

- K rozpojení kontaktů a následnému zapálení oblouku musí dojít v době, než se proud vyvine do maximální hodnoty.
- Vzniklý oblouk musí mít tak vysoký odpor, že dojde nejen ke zmenšení proudu, ale bude také dosaženo jeho labilního stavu.



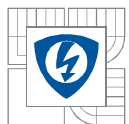
Obr. 6-3: Omezovací funkce jističe

$$i^2 t = \int_{t_s}^{t_1} i^2(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} i_o^2(t) dt \quad (\text{A}^2 \text{s}) \quad (6-1)$$

Celkový Jouleův integrál se skládá ze dvou částí, první oblast ohraničená t_s až t_1 a značená jako t_R v (Obr. 6-3), reakční čas. Druhá oblast ohraničená t_1 až t_2 a značená t_O , čas oblouku. Tyto doby jsou určeny fyzikálními překážkami, s nimiž se musí jistič vyrovnat, a tudíž je nutné volit vhodnou konstrukci jističe.

První oblast t_R je dána dobou, jaká musí uplynout, než dojde k oddalování kontaktů jističe. Po tuto dobu roste zkratový proud takovou strmostí, jako kdyby v obvodu nebyl žádný jistič. Faktor, který určuje tento časový úsek, je v první řadě taková hodnota proudu, jaká bude vyhodnocena jako zkratová. Zde je nutné počítat s tím, že tento proud bude nabývat už takové hodnoty, že bude násobkem proudu jmenovitého a doba, než by zareagovala časová spoušť i v nejkratším čase, by byla už příliš dlouhá. V tuto chvíli už musí zakročit okamžitá elektromagnetická spoušť, ale vzhledem k principu její funkce má také reakční dobu. Tato doba je patrná z (Obr. 5-3) a), je způsobena setrvačnými hmotami jádra elektromagnetické cívky, jež má za úkol vybavit zámek a setrvačnými hmotami kontaktu samotného. Proto zvláště u výkonových jističů, kde jsou tyto kontakty tvořeny větší masou hmoty, je nutné pomáhat rozpojovacím silám vhodnou konstrukcí proudové dráhy. Než jistič překoná všechny tyto fyzikální překážky, a navíc uvedení oblouku do labilního stavu, stihne zkratový proud vyrůst do velikosti I_O , což je proud omezený. Tento děj je velice důležitý, neboť výrazně ovlivňuje hodnotu $I^2 t$.

Druhý časový úsek je omezen časy t_1 až t_2 . Počátek děje t_1 je okamžik rozpojení kontaktů a zapálení oblouku. V prvotním okamžiku rozpojování jsou od sebe kontakty vzdáleny jen nepatrně, to má za následek to, že vysoká hodnota intenzity elektrického pole překročí elektrickou pevnost vzduchu a síla působící na elektron na povrchu kontaktu mu udělí



dostatečnou kinetickou energii, aby opustil povrch kovu. Ten se srazí s atomem plynu atmosféry a ionizuje jej. To znamená, že z něj vyrazí elektrony a v tu chvíli vzniká elektronová lavina. Ta zapálí elektrický oblouk, který je dalším oddalováním kontaktů vytahován. Odpor na oblouku roste velmi rychle, hodnota proudu klesá pomalu, takže napětí na kontaktech dle Ohmova zákona naroste na vysokou hodnotu. Tento stav má za následek to, že hodnota napětí na kontaktech může lehce překročit hodnotu napětí zdroje (Obr. 6-3), modře znázorněný průběh napětí $u_o(t)$. S prudkým nárůstem odporu na oblouku dojde k neudržitelnému průchodu proudu obloukem a poklesu jeho velikosti. Tento stav je známkou dobré omezovací funkce jističe, ale na druhou stranu vede k dielektrickému namáhání izolace obvodů. Z tohoto důvodu jsou mezi jednotlivé fáze svorek jističů vkládány plastové přepážky, jež mají za úkol zvýšit elektrickou pevnost mezi těmito kontakty, obzvláště v místech ostrých hran přípojníc jističů. Tento popsáný děj klade požadavek na dobrou volbu mezi zhasací účinností oblouku v jističi a přijatelnou hodnotou přepětí. To má bohužel negativní vliv na hodnotu Jouleova integrálu, kdy druhý časový úsek t_o času oblouku nemůže být příliš krátký.

7 ROZBOR SIL PŮSOBÍCÍCH NA SPÍNACÍ MECHANIZMUS

Síly působící v jisticím přístroji mají dvě hlavní příčiny. První je mechanismus kontaktního systému. V tomto systému se vyskytuje pružina, jejíž význam je vysvětlen v kapitole 7.4.1. Druhým a největším zdrojem sil je vzájemné působení magnetických polí.

7.1 Jednotky popisující magnetické pole

Magnetické pole je projevem pohybu elektronů. Tato skutečnost má za příčinu to, že jednotky, které popisují magnetické pole jsou velice úzce spjaty s jednotkami elektrickými. To by se ovšem dalo chápat také obráceně. Magnetické pole působí na elektrony, a je jednou z cest, jak je možné vytvářet elektrický proud. Další alternativní způsoby jsou například chemické nebo fotovoltaiické články.

Magnetické pole lze popsat celkově a v každém bodě pomocí veličin:

Celkové veličiny:

Magnetické napětí U_m

Magnetický tok Φ

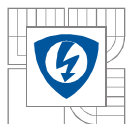
Místní veličiny:

Intenzita magnetického pole H

Magnetická indukce B

7.1.1 Intenzita magnetického pole a magnetické napětí

Intenzita magnetického pole se značí H a jednotkou je $A \cdot m^{-1}$, jedná se o vektorovou veličinu, která je tečnou siločáry. Vypočte se dle vztahu (7-1), kde $U_m [A]$ je magnetické napětí. Podobně, jako elektrické napětí, tak také magnetické napětí vyvolá pohyb elektronů a tento pohyb elektronů vyvolá vznik magnetického pole. Zavádí se pojem magnetomotorické napětí $F_m [A]$, pokud je magnetické pole vybuzeveno více vodiči, pak je magnetomotorickým napětím součet těchto jednotlivých proudů. Tento princip se uplatňuje zejména u cívek. Pokud si uvědomíme, že vodič protékající proudem obepínají siločáry, pak se jejich délka mění se vzdáleností od vodiče a lze si představit, že napětí mezi dvěma body na siločáře jdoucí blíže vodiči musí být větší než mezi dvěma body na siločáře ve větší vzdálenosti. Tyto body musí být ohraničeny stejnou kruhovou výsečí. Zmíněné napětí mezi těmito body je právě magnetickým napětím U_m a součet magnetických napětí po délce celé siločáry je právě roven hodnotě



magnetomotorického napětí. Jednotkou magnetomotorického napětí, stejně jako magnetického, je ampér $[A]$. Jedná se tedy o stejné jednotky s tím rozdílem, na jaké dráze jsou definovány. Ve vztahu (7-1) je l délka kruhové výseče ohraničená body, mezi nimiž je hodnota U_m .

$$H = \frac{U_m}{l} = \frac{F_m}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (A \cdot m^{-1}) \quad (7-1)$$

7.1.2 Magnetická indukce a magnetický tok

Magnetické siločáry jsou sice jen myšlené čáry, ale jsou klíčem k pochopení magnetické indukce B . Ta je dána počtem magnetických siločar, které touto plochou prochází. Jde tedy o magnetický tok Φ na jednotku plochy. Magnetická indukce má jednotku tesla $[T]$ a je vektorovou veličinou.

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (T) \quad (7-2)$$

Magnetický tok je skalární veličina. Změna magnetického toku v čase vyvolá ve vodiči vznik elektrického napětí. Magnetický tok má jednotku wber $[Wb]$, rozměr weberu je volt-sekunda.

$$u(t) = \frac{d\Phi}{dt} \quad (Wb) \quad (7-3)$$

7.2 Magnetické vlastnosti látek

Jistící přístroj se skládá z více druhů konstrukčních materiálů, které mají různé magnetické vlastnosti. Ty je nutné přesně znát, neboť mají zásadní vliv na výsledné elektromagnetické síly. Magnetická vodivost je závislá na permeabilitě, ploše a délce dráhy:

$$G_m = \frac{\mu \cdot S}{l} \quad (H) \quad (7-4)$$

Význam magnetické vodivosti ukazuje magnetický tok. Ten je součinem magnetické vodivosti a napětí:

$$\Phi = G_m \cdot U_m \quad (Wb) \quad (7-5)$$

Pro výpočet magnetické vodivosti je důležité znát hodnotu permeability:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (-) \quad (7-6)$$

Kde: μ_0 - permeabilita vakua = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

μ_r - poměrná permeabilita, vztažená k permeabilitě vzduchu

Ze vztahů (7-4)(7-5)(7-6) plyne, že hodnota magnetického toku na velikost plochy závisí na poměrné permeabilitě. Pokud bude poměrná permeabilita vysoká, tak se do malé plochy vejde více siločar a hodnota magnetického toku bude vysoká, a naopak. Rozlišují se tyto základní skupiny látek:

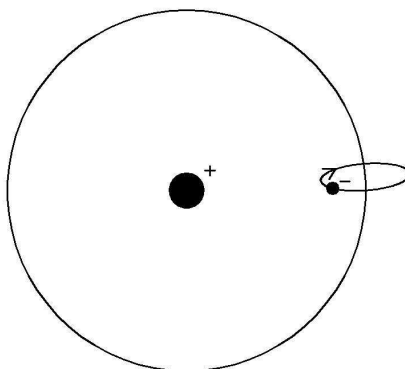
- *DIAMAGNETICKÉ* $\mu_r < 1$ (o málo menší) (zlato, stříbro, měď, voda, olovo)
- *PARAMAGNETICKÉ* $\mu_r > 1$ (o málo větší) (vzduch, hliník, platina)

- **FEROMAGNETICKÉ** $\mu_r \gg 1$ (o hodně větší) (železo, nikl, kobalt, ocel)

Pokud bude látka diamagnetická vložena do nehomogenního magnetického pole, dojde v této látce k zřidnutí siločar, tím bude tato látka slabě vytlačována z tohoto pole. Látka paramagnetická bude do tohoto pole vtahována, což se navenek projeví jako velice slabé zmagnetování a feromagnetická látka má vysokou magnetickou vodivost. To znamená, že bude siločáry silně vtahovat do sebe, čímž se projeví jako silný magnet a magnetický tok bude dosahovat vysokých hodnot. Toto platí až do hodnoty nasycení, kdy dojde k tomu, že vzroste magnetický odpor natolik, že se pak feromagnetická látka začne chovat jako paramagnetická.

7.3 Vznik elektrodynamické síly

Magnetické pole vzniká pohybem elektricky nabitých částic, tou je například elektron. Pohyb elektronů neprobíhá pouze po oběžné dráze kolem jádra atomu (Obr. 7-1), ale také po oběžné dráze vlastní kolem osy ležící na oběžné dráze jádra. Tato vlastnost je nazývána spin elektronu a je hlavní příčinou vzniku magnetického pole. Je nezbytné upřesnit to, že pohyb elektronů neprobíhá po přesně definované oběžné dráze, jak by se mohlo zdát z obrázku, ale je popsán pravděpodobností výskytu v určité oblasti.



Obr. 7-1: Spin elektronu

V magnetické látce jsou spiny v určitých oblastech orientovány, tyto oblasti se nazývají magnetické domény. Pokud jsou tyto domény vhodně polarizovány, dochází ke vzniku výrazného makroskopického pole. Při výrobě permanentních magnetů jsou tyto domény polarizovány vnějším magnetickým polem, které když pomine, tak si látka zachová tzv. remanentní magnetizmus.

Pokud protéká vodičem elektrický proud, dochází k pohybu elektronů a vytváří se v okolí tohoto vodiče magnetické pole. Dále platí, že magnetické pole působí silou na pohybující se nabitou částici. Z těchto poznatků tedy plyne, že vzájemným působením částí toho pole, nebo působením na jiné pole, vzniká mechanická síla nazvaná Ampérova síla:

$$d\vec{F} = i \cdot d\vec{l} \times \vec{B} \quad (N) \quad (7-7)$$

Pro vodič konečné délky pak platí vztah

$$\vec{F} = i \int_l d\vec{l} \times \vec{B} \quad (N) \quad (7-8)$$

Tyto elektrodynamické síly lze rozdělit dle vzniku jejich působení do několika případů:

- Síly působící mezi zakřivenými úseky jednoho vodiče.

- Síly působící mezi různými vodiči.
- Síly působící mezi vodičem a feromagnetikem.

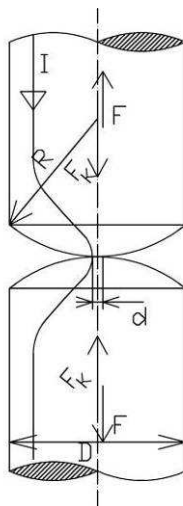
Vzhledem k tomu, že v jističích protékají velmi vysoké proudy ve velmi malém prostoru, mají vzniklé síly zásadní vliv na funkci celého přístroje. Je tedy nutné umět tyto síly předvídat, znát jejich velikost a umět je konstrukčně ovlivnit ve prospěch přístroje, nebo je případně potlačit na minimální možnou míru jejich existence.

7.4 Působení sil na proudové dráze

V uvažovaném elektrickém přístroji Modeion BD250 se nachází více proudových drah, mezi nimi zcela určitě působí také elektrodynamické síly, ale ty budou v této práci zanedbány. Hlavním cílem práce je určit chování kontaktu a na tento děj mají zásadní vliv pouze síly, které vytvářejí moment vzhledem k ose otáčení tohoto kontaktu, tou je dle (Obr. 8-1) osa Z.

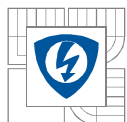
7.4.1 Působení síly při změně průřezu a její význam

Hlavní význam tato síla dostává v jističi v oblasti (3) (Obr. 5-1). Podobný kontakt je v každém jisticím přístroji, a to i v přístroji, jehož děje jsou v této práci simulovány. Zde je za vznik síly odpovědná hlavně změna průřezu. Při dosednutí kontaktů na ně působí přitlačná síla pružiny F_p . Ta je velice důležitá, protože má zásadní vliv na kvalitu styku. Skutečný styk není realizován v celé ploše kontaktu, jak by bylo nejlepší, ale je realizován na několika menších ploškách (Obr. 7-3) a). Tyto jsou náhodně rozesety v oblasti styku a při každém sepnutí se jejich počet mění, hlavním faktorem určujícím jejich množství je tvrdost materiálu.



Obr. 7-2: Síly v kontaktu

Toto činí přesné výpočty téměř nemožnými, proto se využívají empirické vztahy. Pokud dojde k situaci, že je odpudivá síla F_{KU} větší než síla kontaktní pružiny F_p , tak dojde k rozpojení kontaktů, což má za následek zapálení oblouku, který kontakty nataví a pokud dojde jejich dosedu dojde také k jejich svaření. Pokud je pak síla vypínacího mechanismu příliš malá a nedovede kontakty od sebe odtrhnout, tak dojde k selhání funkce jističe. Pokud je přece jen dostatečná, tak se kontakty roztrhnou, ale dojde k jejich mechanické degradaci, což snižuje životnost celého přístroje. Ve skutečnosti odpudivá síla dosahuje maxima právě při nejvyšším poruchovém proudu, tím také maximálně omezí přitlačnou sílu a vzroste stykový odpor, a i když se kontakty nerozpojí, jak je popsáno výše, nastane nepříznivý stav. Ten bude mít za následek největší tepelné namáhání dle (7-9), protože vzroste stykový odpor v nejnevhodnější okamžiku



maximálního proudu a tím může také nastat svaření kontaktů a jejich následná degradace, či selhání jističe. S tímto je nutno počítat a navrhnout kontakt tak, aby dokázal tento stav úspěšně zvládnout.

$$P = R_S \cdot I_P^2 \quad (\text{W}) \quad (7-9)$$

Maximální velikost odpudivé síly určuje vztah (7-10). Tímto lze při návrhu kontaktu jisticího přístroje vypočítat minimální potřebnou přitlačnou sílu. Pokud by byly obě části kontaktu pohyblivé, bylo by nutné celou sílu násobit ještě dvěma.

$$F_{KU} = I^2 \cdot \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}) \quad (7-10)$$

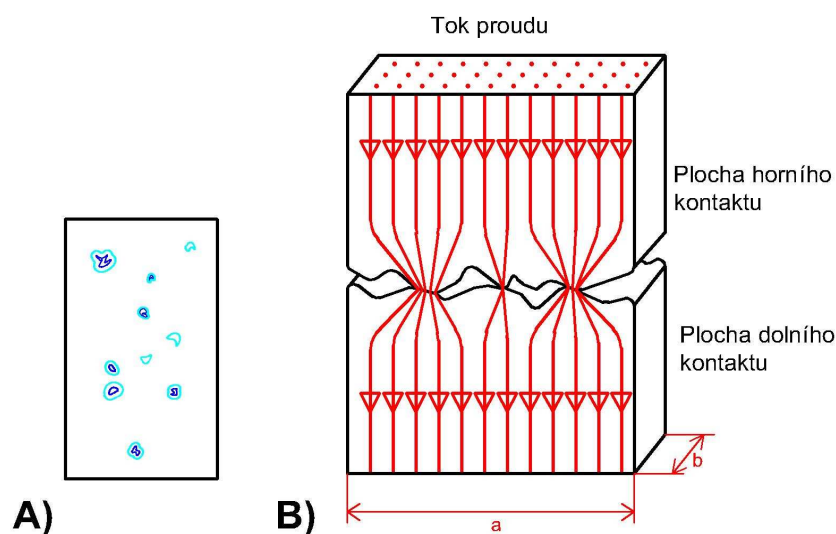
Stykovou plošku o průměru d uvažujeme o velikosti dle (7-11), E je modul pružnosti v tahu pro materiál kontaktu, v upraveném vzorci je ξ činitel zohledňující vliv pružné deformace, pro materiály zadaného kontaktu platí $\xi \approx 1$. H_B je tvrdost materiálu podle Brinnela.

$$d = 2,22 \cdot \sqrt{\frac{F_K \cdot R}{E}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_K}{\pi \cdot \xi \cdot H_B}} \cdot 10^{-3} \quad (\text{m}) \quad (7-11)$$

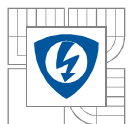
Kontakt je v jisticím přístroji proveden jako čelní tupý styk dvou ploch, tento stav je možné překreslit v názorné zjednodušené formě (Obr. 7-3) B) dle [13]. Vztah (7-11) lze použít i pro tento případ, D se v případě styku ploch musí vypočíst snadno dle vztahu (7-12). Na ploše kontaktu vznikne velké množství takovýchto mikroskopických ploch (Obr. 7-3) A). Součet těchto ploch je vyjádřen rovnicí (7-13). Z této rovnice je patrné, že jejich plocha závisí na přitlačné síle a tvrdosti materiálu kontaktu. Na obrázku jsou tmavě znázorněny plochy styku pro malou sílu a pro větší sílu světle. Tvrdost je udávána v MPa, kdy se dosazuje v $1 \cdot 10^6$.

$$D = \sqrt{a \cdot b} \quad (\text{m}) \quad (7-12)$$

$$S = \frac{F_P}{\xi \cdot H_B} \quad (\text{mm}^2) \quad (7-13)$$



Obr. 7-3: Schématický průchod proudu stykem ploch



7.4.2 Výpočet síly od kontaktní úžiny

Výpočet síly od kontaktní úžiny proběhne pro dva proudy. To z důvodu řešení úlohy, kdy bude v prvním případě řešena pohybová rovnice pro průtok stejnosměrného proudu 20kA, tedy první výpočet proběhne pro tento proud. Druhý výpočet proběhne pro řešení rovnice pro průtok střídavého proudu, kdy je maximální hodnota stejná jako u DC proudu, ale body výpočtu jsou zadány 1,5,15,20kA, výpočet druhého F_{KU} proběhne tedy pro 1kA.

Pro potřeby výpočtu síly na kontaktu jističe se užije odvozený vztah (7-10). Pro dosazení je nutné znát hodnoty náhradního průměru. Pro stanovení D jsou rozměry stykové plochy:

$$a = 6,38 \text{ mm}$$

$$b = 5 \text{ mm}$$

Po dosazení do (7-12):

$$D = 5,648 \text{ mm}$$

Náhradní průměr plochy styku lze vypočítat z (7-13):

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} \quad (\text{N}) \quad (7-14)$$

Hodnoty nutné pro výpočet náhradního průměru d jsou:

$$F_P = 18,2 \text{ N}$$

$$HB = 80 \text{ (800 MPa)}$$

$$\xi = 1$$

Po dosazení do empirického vzorce (7-13) a následně (7-14) vyjde hodnota:

$$d = 0,170 \text{ mm}$$

Nyní už lze dosadit do vzorce (7-10) uvažovaný zkratový proud. První výpočet poslouží pro stanovení síly při průtoku stejnosměrného zkratového proudu, druhý výpočet uvažuje postupný vývoj zkratového proudu dle střídavého průběhu.

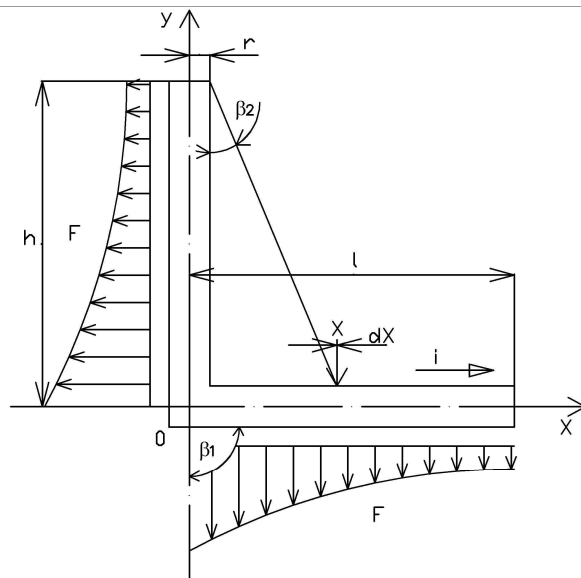
$$I = 20 \text{ kA} \rightarrow F_{KU} = 140,130 \text{ N}$$

$$I = 1 \text{ kA} \rightarrow F_{KU} = 0,350 \text{ N}$$

Z vypočtených hodnot je patrný zásadní vliv hodnoty zkratového proudu na velikosti sil v kontaktech elektrických přístrojů.

7.4.3 Působení sil v zakřivené proudové dráze

Pokud dojde k geometrickému zakřivení proudové dráhy, tak se na vnitřní straně záhybu nahustí magnetické siločáry a na vnější straně naopak prořídnou. Jinými slovy začne jedna část magnetického pole působit na sousední část. V tomto případě dojde ke vzniku elektrodynamických sil. Pro rozbor těchto sil budeme vycházet z (Obr. 7-4). Zde vyjádříme sílu, působící na vodorovnou část ramene délky l , rozložení vektorů sil je symetrické a má za snahu vytvořit homogenní magnetické pole v okolí vodiče, nebo-li jej narovnat.



Obr. 7-4: Zakřivená proudová dráha, pravý úhel.

Pro výpočet síly se využije vztahu pro výpočet magnetické indukce v bodě x mimo proudovou dráhu (7-15). Zde je situace chápána tak, že sílu vyvolává proudová dráha, která je v jiném směru, než proudová dráha, na které je síla počítána, i když se z hlediska vedení proudu jedná stále o tutéž proudovou dráhu.

$$B_x = \frac{\mu_0 i}{4\pi x} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad (T) \quad (7-15)$$

Kde x je vzdálenost bodu od počátku na ose X , potřebné kosiny úhlů se vyjádří dle:

$$\cos \beta_1 = 0 \quad \cos \beta_2 = \frac{h}{\sqrt{h^2 + x^2}} \quad (7-16)$$

Po dosazení magnetické indukce do (7-8) je velikost síly:

$$F = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \cdot \int_r^l \frac{(\cos \beta_2 - \cos \beta_1)}{x} dx \quad (N) \quad (7-17)$$

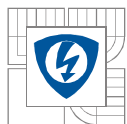
Vyjádřené úhly je nyní možno dosadit do vztahu (7-17), kdy síla přejde do tvaru:

$$F = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \int_r^l \frac{1}{x} \frac{h}{\sqrt{h^2 + x^2}} dx \quad (N) \quad (7-18)$$

Po vyřešení integrálu a dosazení mezí je síla působící na rameno:

$$F = i^2 \ln \left(\frac{l(h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r(h + \sqrt{h^2 + l^2})} \right) \cdot 10^{-7} \quad (N) \quad (7-19)$$

V případě, že se bude jednat o dvojitý pravoúhlý záhyb, bude síla na bočních stěnách tohoto záhybu rovna přímo vztahu (7-19) a na stěně mezi pravými úhly bude pak výsledná síla rovna dvojnásobku síly (7-19). Musí být ale ještě splněna geometrická podmínka, že $l \gg 2r$.



8 POHYBOVÁ ROVNICE SPÍNACÍHO MECHANIZMU

Aby bylo možné vizualizovat pohyb kontaktu v zadaném jističi Modeion BD250, je nutné sestavit pohybovou rovnici, která určí časový průběh kinematických veličin kontaktu. Zde se nejdříve provede v programu ANSYS výpočet rozložení proudové hustoty J , pomocí čehož bude umožněn dále výpočet magnetické indukce B . Tímto bude umožněno vypočítat velikost elektrodynamických sil, které tato magnetická indukce způsobuje. To již provede program ANSYS sumarizací sil každého výpočtového elementu zadaného modelu. Dále bude umožněno stanovit velikost momentu sil k ose otáčení při zadaném proudu. Další nutnou známou veličinou je J , moment setrvačnosti. Jeho stanovení je možné například v CAD systému, v němž byla geometrie vytvořena. Základem tedy bude pohybová rovnice tělesa otáčejícího se kolem osy:

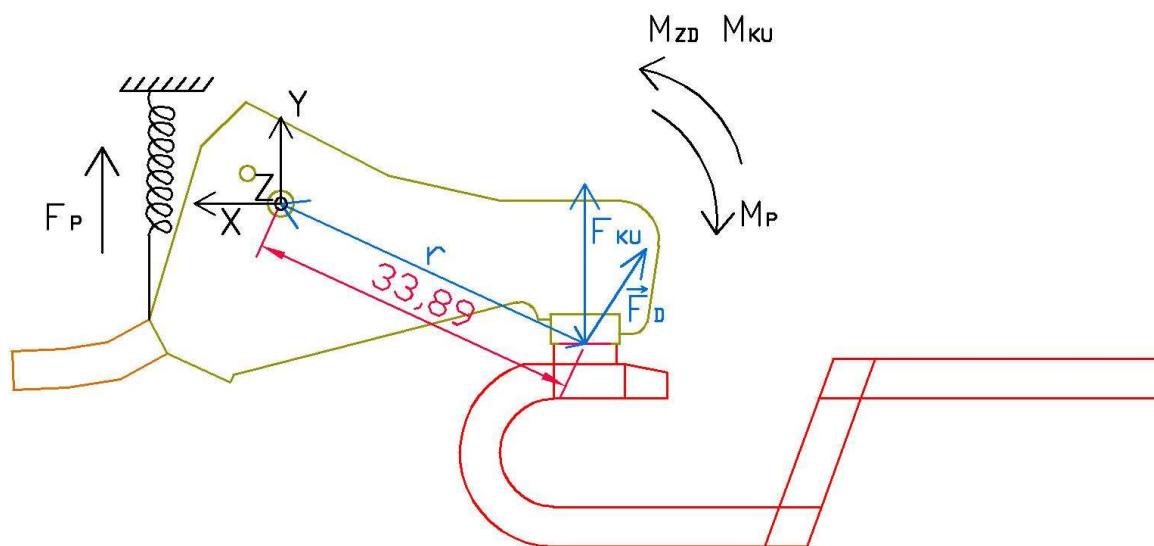
$$\vec{M} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{Nm}) \quad (8-1)$$

Při řešení této rovnice se použije numerický způsob výpočtu, kdy zavedeme proměnnou jako konstantu, jež nabývá skoků o určité velikosti změny vyvolaných v čase. Tento způsob je vhodný pro výpočet počítačem, protože sice obsahuje mnoho dílčích výpočtů, ale naproti tomu je jejich sestavení mnohem méně náročné a výpočet počítač provede bez problémů v krátké době.

8.1 Způsob výpočtu momentu sil ve spínacím kontaktu

Zde je pro výpočet celkového momentu M , využit vztah (8-2). Tento výsledný moment se skládá z dílčích momentů, a to z momentu přitlačné pružiny M_P , momentu způsobeného elektrodynamickou silou M_{ZD} v zakřivené proudové dráze a momentu vzniklého ze síly, kterou způsobují mikroskopické proudovodné úžiny dosedajících ploch kontaktů M_{KU} . Jak je patrné z (Obr. 8-1), moment způsobený silou pružiny působí směrem ke zvýšení kontaktní síly. Toto je z důvodu zvýšení kontaktní plochy v pohotovosti jističe, kdy jím protéká provozní proud, viz kapitola 7. Celkový moment způsobený elektrodynamickými silami má složky M_x a M_y nulové nebo velice malé, proto se zanedbají. V reálném modelu jsou způsobeny nesouměrností modelu a v numerickém modelu jsou způsobeny nesouměrností MASH sítě. Pouze moment síly M_z vzhledem k ose Z je nenulový. Tato složka momentu je tou nejdůležitější pro průběh dějů v jisticím přístroji.

Při výpočtu bude zvlášť dopočten moment síly, který způsobuje kontaktní úžina, a poté přičten do celkového momentu pouze při zavřeném stavu, protože je počítačový model realizován, jako čisté dosednutí ploch. Dále při otevření je již namodelovaný elektrický oblouk, kdy se uvažuje také jeho dokonalé dosednutí na plochy kontaktu a síly, které vznikají v tomto zúžení, jsou již zahrnuty v počítačovém výpočtu.



Obr. 8-1: Pohyblivý kontakt, síly

Výsledný moment působící na kontakt je učen momentovou větou ve tvaru:

$$M = M_{ZD} + M_{KU} - M_P \quad (\text{Nm}) \quad (8-2)$$

V tomto vztahu je velikost momentu M_P vypočtena ze síly, které způsobuje pružina a byla změřena siloměrem. Měření proběhlo v oblasti kontaktu. Tímto se výpočet tohoto momentu zjednodušil na (8-5). Velikosti přitlačných sil pružiny je v Tab. 11.1 a velikost ramene síly je $r = 0.03389 \text{ m}$.

$$M_P = F_P' \cdot r \quad (\text{Nm}) \quad (8-3)$$

Výpočet momentu M_{KU} , vznikajícího kontaktní úžinou bude proveden na základě rovnice popsané v 7.4.1, za použití rovnice (7-10). Zde byl průměr D stanoven přepočtem obdélníkové plochy na kruhovou o stejném obsahu $D = 6.676 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ a $d = 0.169 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Moment M_{KU} , působí pouze v první fázi děje, kdy ještě nedošlo k oddálení kontaktů, je s ním počítáno (po dohodě s vedoucím práce) po dobu 0.01ms.

Moment M_{ZD} je závislý na úhlu otevření, proto bude výpočet proveden po zvoleném kroku 3° od hodnoty 0° až do 42° . Celý proces výpočtu tohoto momentu bude proveden v programu ANSYS. Na oblouk (Obr. 8-2) B), který vznikne během otevírání, bude nahlíženo jako na válcovitou proudovou dráhu. Moment pružiny má pouze složku působící otáčení kolem osy Z, stejně jako momenty od ostatních sil.

$$\vec{M}_D = \vec{r} \times \vec{F}_D \quad (\text{Nm}) \quad (8-4)$$

Ve vztahu (8-4) mají jednotlivé vektory dle (Obr. 8-1) tyto složky:

$$\begin{aligned} \vec{M}_D &= (M_X, M_Y, M_Z) \\ \vec{r} &= (X, Y, Z) \\ \vec{F}_D &= (F_{XD}, F_{YD}, F_{ZD}) \end{aligned} \quad (8-5)$$

Pro výpočet vztahu (8-4) může být využito například determinantu matice, na který lze využít výpočtu pomocí Sarrusova pravidla. Toto pravidlo lze použít pouze pro matice třetího

řádu, obecně lze použít na libovolně velkou matici Gaussovu eliminační metodu, nebo některou z efektivnějších metod.

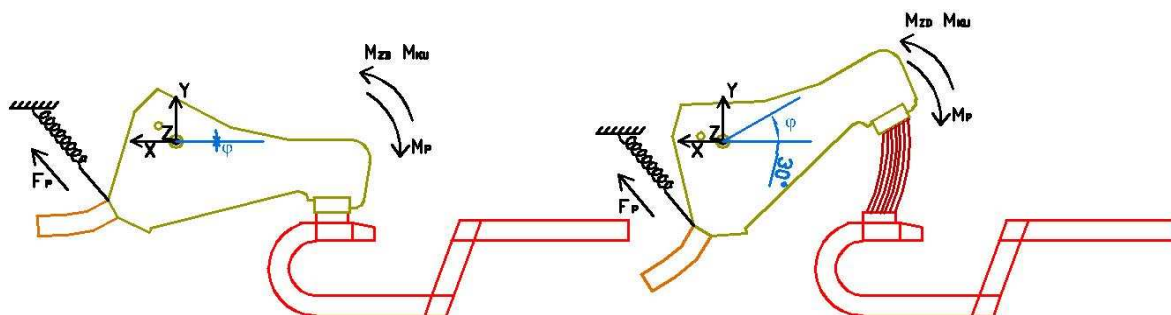
$$\vec{r} \times \vec{F}_D = \begin{vmatrix} M_{XD} & M_{YD} & M_{ZD} \\ X & Y & Z \\ F_{XD} & F_{YD} & F_{ZD} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} M_{XD} & M_{YD} \\ X & Y \\ F_{XD} & F_{YD} \end{vmatrix} = \quad (8-6)$$

$$M_{XD} \cdot Y \cdot F_{ZD} + M_{YD} \cdot Z \cdot F_{XD} + M_{ZD} \cdot X \cdot F_{YD} - M_{ZD} \cdot Y \cdot F_{XD} - M_{XD} \cdot Z \cdot F_{YD} - M_{YD} \cdot X \cdot F_{ZD}$$

Nyní lze pohodlně vyjádřit jednotlivé složky momentu síly dle os pravoúhlého souřadného systému, která je umístěn tak, aby osa Z byla osou otáčení.

$$\vec{M}_D = (M_{XD}(F_{ZD} \cdot Y - F_{YD} \cdot Z), M_{YD}(F_{XD} \cdot Z - F_{ZD} \cdot X), M_{ZD}(F_{YD} \cdot X - F_{XD} \cdot Y)) \quad (\text{Nm}) \quad (8-7)$$

Zde je jasné, že bude vznikat výsledný moment pouze vůči ose otáčení, jak již bylo popsáno na začátku této kapitoly. Síla F_{KU} kontaktní úžiny bude mít pouze složku ve směru osy Y, tedy moment vůči ose Z.



Obr. 8-2: Pohyblivý kontakt, otevírání

Výpočet jednotlivých složek vektoru síly kontaktní úžiny proběhne následovně:

Pokud je úhel otevření takový, že je vrchol kontaktu v rovině s osou otáčení, tak je velikost síly $F_X = 0 \text{ N}$.

$$F_{XD} = |\vec{F}_D| \cdot \sin(\varphi)$$

$$F_{YD} = |\vec{F}_D| \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{N}) \quad (8-8)$$

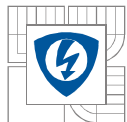
$$F_{ZD} = 0$$

Po dosazení (8-8) do (8-7) vyjdou jednotlivé složky vektoru momentu \vec{M}_D . Analytické řešení ukazuje, že jsou složky vektoru \vec{M}_D v osách X a Y nulové, při numerickém výpočtu na počítači však nulové nebudou. To je způsobeno tím, že rozložení výpočtové sítě není souměrné dle roviny XY, ale jsou tyto momenty o několik řádů menší.

$$M_{XD} = F_Z \cdot Y - F_Y \cdot Z = 0 \cdot 0 - |\vec{F}_{KU}| \cdot \cos(\varphi) \cdot 0 = 0$$

$$M_{YD} = F_X \cdot Z - F_Z \cdot X = |\vec{F}_{KU}| \cdot \sin(\varphi) \cdot 0 - 0 \cdot X = 0 \quad (\text{N}) \quad (8-9)$$

$$M_{ZD} = F_Y \cdot X - F_X \cdot Y = |\vec{F}_{KU}| \cdot \cos(\varphi) \cdot X - |\vec{F}_{KU}| \cdot \sin(\varphi) \cdot Y$$



8.2 Stanovení momentu setrvačnosti

Aby bylo možné stanovit časový průběh otevírání kontaktu dle rovnice (8-1), je nutné znát moment setrvačnosti vzhledem k ose otáčení pohyblivých hmot kontaktu jističe. Kontakt bude uvažován jako homogenní těleso z mědi o hustotě $\rho_{Cu} = 8.94 \frac{g}{cm^3}$, objem horního kontaktu je $V_{Cu} = 3.902 cm^3$ a jeho hmotnost $m = 34.883 g$.

$$m_{Cu} = \rho_{Cu} \cdot V_{Cu} \quad (g) \quad (8-10)$$

Jedná se o těleso, jež má konstantní hustotu v celém objemu tělesa, proto lze pro výpočet uplatnit vztah:

$$J = \rho \int_V r^2 dV \quad (g \cdot m^2) \quad (8-11)$$

Jelikož se jedná o těleso s poměrně složitou geometrií, tak by nebylo snadné tento integrál vypočítat, ale jak již bylo zmíněno, CAD systémy dokáží tuto hodnotu rychle vypočítat dle libovolně zvolených os otáčení. Námi požadovaná hodota J je určena osou Z (Obr. 8-1), pak je hledaná hodnota momentu setrvačnosti:

$$J_z = 13652 \cdot 10^{-9} kg \cdot m^2.$$

8.3 Výsledná pohybová rovnice kontaktu

Výsledná pohybová rovnice určí závislost úhlové rychlosti v čase průběhu děje. Výchozí bude vztah (8-1) upraven do tvaru:

$$\omega' = \frac{M(t)}{J} \quad (8-12)$$

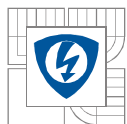
Po integrování platí:

$$\omega = \frac{1}{J} \cdot \int M(t) dt \quad (rad \cdot s^{-1}) \quad (8-13)$$

Zde je moment síly funkcí času, je rozepsán v (8-2). Jelikož jsou k dispozici jeho hodnoty pouze pro určité úhly otevření, je nutné dopočítat potřebné hodnoty pomocí kubického splajnu. Myšlenka kubického splajnu spočívá v tom, že známe body a jim náležící funkční hodnoty. Hledá se taková funkce $f(x)$, která obsahuje všechny známé funkční hodnoty a zároveň splňuje jisté požadavky hladkosti jejího průběhu. Touto funkcí je polynom na intervalech mezi body x_i a x_{i+1} . Pro výpočet splajnu bylo užito funkce *spline* v programu MATLAB.

Aby bylo možné stanovit čas, po který bude probíhat samotné otevírání kontaktu, je nutné znát úhel otevření v závislosti na čase:

$$\varphi = \frac{d\omega}{dt} \quad (rad) \quad (8-14)$$



8.3.1 Zjednodušený výpočet pohybové rovnice

Ještě před provedením výpočtu pomocí numerických metod lze provést analytický výpočet, který zavede zjednodušující opatření, ten je vhodné provést jako kontrolu řádu. Bude se na celý děj pohlížet jako na rovnoměrně zrychlený pohyb, pro nějž platí rovnice:

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot t^2 \quad (rad) \quad (8-15)$$

Úhlové zrychlení je definováno podobně jako u rovnoměrně zrychleného pohybu, tedy úhlová rychlost za čas, pak rovnice (7-15) bude ve tvaru:

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot t \quad (rad) \quad (8-16)$$

Pro úhlovou rychlost platí z (8-1):

$$\omega = \frac{M}{J} \cdot t \quad (rad \cdot s^{-1}) \quad (8-17)$$

Po dosazení (8-17) do (8-16) a úpravě získáme:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot \varphi \cdot J}{M}} \quad (s) \quad (8-18)$$

V kapitole 8.2 byl stanoven moment setrvačnosti J a moment síly byl vypočten v programu ANSYS. Výsledky momentu sil jsou uvedeny v kapitole 10.4. Je patrné, že pro různé úhly otevření jsou hodnoty momentu síly různé, protože jsou funkcí času. Pokud zavedeme zjednodušení, že změnu momentu v čase nahradíme algebraickým průměrem hodnot, dojdeme k hodnotě, kterou bude možné využít ke zjednodušenému výpočtu:

$$M_z = 3.38 \, N \cdot m$$

Po dosazení hodnoty průměrného momentu do rovnice (7-15) vyjde orientační čas otevření kontaktu jističe:

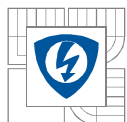
$$t = 0.002433 \, s$$

Lze tedy očekávat výsledek v řádu tisícín vteřiny, což je velice rychlý děj. Zhodnocení zjednodušeného výpočtu s výpočtem provedeným dále proběhne v závěru.

9 VYTVOŘENÍ CAD MODELU KONTAKTNÍHO SYSTÉMU

Aby bylo možné provést počítačovou simulaci jevů v elektrickém přístroji, je nejdříve nutné vytvořit jeho počítačový model. Je několik možností, jak jej vytvořit. Nejméně vhodný způsob je jeho vytvoření přímo v programu ANSYS, neboť jeho modelářské prostředí neposkytuje komfortní nástroje jako je tomu u programů, jež jsou na 3-D modelování určeny. To ve svém důsledku dělá tvorbu modelu v ANSYSu velice obtížnou.

Ovšem ANSYS tuto situaci řeší tím způsobem, že podporuje import geometrií z programů k jejich tvorbě speciálně určených. (Tab. 9.1)[6] udává v prvním sloupci CAD program, ve druhém sloupci jsou uvedeny příslušné přípony souborů a poslední, třetí sloupec, udává standard, v jakém je soubor kódován.



Tab. 9.1: CAD balíčky a podporované typy souborů [6]

CAD Package	File Type	Connection Functionality to Use
CATIA 4.x and lower	.model or .dlv	CATIA
CATIA 5.x	.CATPart or .CATProduct	CATIA Version 5
Pro/ENGINEER	.prt	Pro/ENGINEER
Unigraphics	.prt	Unigraphics
Parasolid	.x_t or .xmt_txt	Parasolid
Solid Edge	.x_t or .xmt_txt	Parasolid
SolidWorks	.x_t	Parasolid
Unigraphics	.x_t or .xmt_txt	Parasolid
AutoCAD	.sat	SAT
Mechanical Desktop	.sat	SAT
SAT ACIS	.sat	SAT
Solid Designer	.sat	SAT

Zde jsou však uvedeny pouze typy podporované standardní instalací, typy podporovaných souborů pro import se liší verzí programu a konfigurací instalace.

9.1 Geometrie kontaktního systému přístroje

V této práci je prováděna simulace dějů na kontaktním systému kompaktního jističe Modeion typ BD250 (Obr. 9-1). Jeho parametry jsou [12]:

Jmenovitý pracovní proud:100A,160A,200A,250A

Jmenovité pracovní napětí:.....690V \approx

Jmenovitý kmitočet:50-60Hz

Jmenovitá mezní zkratová vypínací

schopnost pro 230V:.....60kA\100kA

Jmenovitá mezní zkratová vypínací

schopnost pro 500V:.....16kA\25kA

Jmenovitá mezní zkratová vypínací

schopnost pro 690V:.....10kA\16kA



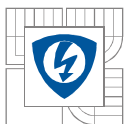
Obr. 9-1: Kompaktní jistič Modeion BD250 [8]

Geometrie kontaktního systému tohoto přístroje byla získána ze skutečného přístroje. Zde byly vymontovány potřebné prvky parné na (Obr. 9-3) a pomocí posuvného měřítka přeměřeny, poté byly překresleny v AutoCAD 2008. Model flexopassu byl vytvořen pouze jako zjednodušené homogenní těleso. Skutečný flexopass je vytvořen z pleteného vodiče (Obr. 9-2), tvořeného tisíci velice tenkými měděnými vodiči. Jeho hlavní význam je v této simulaci při stanovení momentu setrvačnosti.

Osa otáčení horního kontaktu je označena počátkem souřadného systému a nachází se v oblasti horního pohyblivého kontaktu. Tato osa otáčení je určena pro velmi rychlé odpojení a neklade žádný jiný odpor, kromě síly přitlačné pružiny. Kontakt má ještě jednu osu otáčení, ale ta se při odpojování velkého poruchového proudu neuplatní, neboť je určena pro otevření při vybavení zámku. Otevření kontaktu podle této osy, která leží mimo tělo horní části, probíhá podstatně pomaleji a je omezeno funkcí zámku.

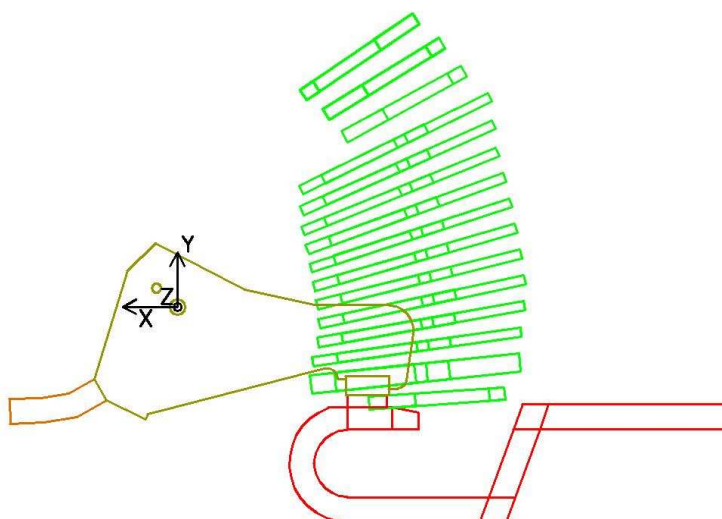
V modelu je také třeba počítat s vlivem zhášecí komory. Ta sice není proudovodnou dráhou, ale významně ovlivňuje rozložení intenzity magnetického pole, neboť je vyrobena z železných plechů, které mají malý magnetický odpor.

Pouzdro jističe je vyrobeno z velice pevného kompozitního plastu. Ten již není magneticky vodivý a nemá tedy výrazný vliv na působení elektrodynamických sil, tudíž jej není potřeba modelovat.



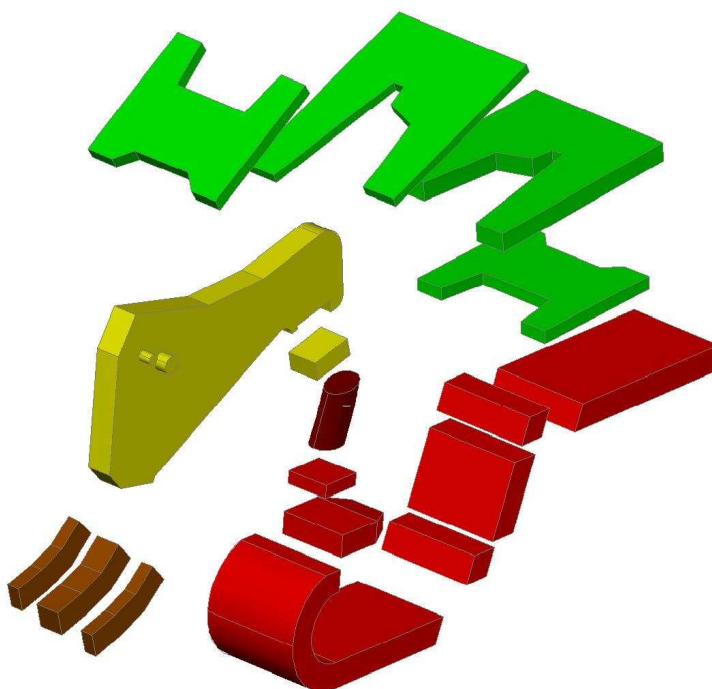
Obr. 9-2: Flexopass

Počátek byl umístěn v ose otáčení. Kladná část osy x směřuje proti směru tečení proudu, tedy doleva, kladná část osy y směřuje nahoru a osa z je osou otáčení. Toto umístění má svůj význam, který později během výpočtu elektrodynamických sil v programu ANSYS zjednoduší tento proces. Na (Obr. 9-3) je náčrtek zavřeného kontaktu, ale výpočty elektrodynamických sil budou probíhat pro různé úhly otevření. Z tohoto důvodu byly vytvořeny také různé geometrie, pro dané úhly pootevření, ty jsou stanoveny jako násobky tří až do plného otevření 30° , tento krok je dostatečný pro stanovení průběhů sil a momentů během otevírání kontaktu. Zde je ale nutné počítat s přítomností oblouku, který je modelován jako zakřivený válec.



Obr. 9-3: Model DB250, 2D

Výsledný model je patrný z (Obr. 9-4), z prostorových důvodů je zobrazena pouze malá část zhášecí komory (zelená). Červeně je statická část kontaktu, tmavě červený je oblouk, žlutý je horní pohyblivý kontakt a oranžově je zobrazen flexopass. Vše je nutné konstruovat tak, aby části na sebe navazovaly plochou tak, aby je ANSYS dokázal „slepit“. Také je nutné počítat s vytvářením výpočtové sítě. Takže místa, kde bude nutné tuto síť zjemnit, bude vytvořen model z více částí. V (Obr. 9-4) je tento postup patrný na spodním kontaktu.



Obr. 9-4: Komponenty trojrozměrného modelu kontaktního systému

Další nezbytnou částí modelu, aby jej bylo možné použít pro výpočet v ANSYSu, je vzduchové prostředí. To se volí tak, aby nebylo zbytečně velké, tím by zbytečně zvýšilo výpočetní nároky na počítač při řešení problému, ale nesmí být zase příliš malé, tím by zase došlo k omezení magnetické indukce blízkosti kontaktu. Obecně se volí přibližně třikrát větší okolí, než jsou rozměry objemu. Vzduch musí být jakousi skořápkou celého modelu, ta se vytvoří pomocí booleovské operace rozdíl objemů.

Takto sestavená geometrie je již připravena pro export do souboru, které umí ANSYS importovat. V Tab. 9.1 je přehled formátů jež ANSYS podporuje. Vhodným souborem je formát ACIS s příponou *.sat*, jedná se o formát, jenž užívá architekturu jazyka C++. Umožňuje modelovat ve formě drátových modelů, modely z povrchů a také jednolitých modelů. Výpis části zdrojového kódu je uveden níže, z něj je patrné, že se jedná o systém, ve kterém se model ukládá v numerickém formátu s konečnou přesností. S tímto je nutno počítat, a proto je dobré se vyhnout konstrukcím, které nemají jasně definované plochy styku, jako například koule na rovné ploše, takové konstrukce budou zkresleny na hodnotě nastavené tolerance. Z tohoto důvodu je výhodné předem takové konstrukce zjednodušit už na úrovni vytváření modelu, čímž bude dosaženo lepší kontroly nad výsledkem.

```
color-adesk-attrib $-1 -1 $11065 $-1 $8946 256 #
```

```
vertex $11066 -1 $-1 $10132 $11067 #
```

```
straight-curve $-1 -1 $-1 43.899407485375249 11.721218840953323 6.3999999999555044  
8.9088320052892276e-016 5.1435165564188829e-016 5.6000000000000005 F 0 F 1 #
```

10 VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL V PROGRAMU ANSYS

Jak bylo popsáno výše, tvorba modelu byla provedena v CAD systému a do ANSYSu byla importována. V programu ANSYS je nutné definovat diskretizaci modelu, materiálové konstanty a okrajové podmínky. Tomuto nastavení je nutno věnovat zvláštní pozornost, neboť nesprávně nastavené podmínky vedou v lepším případě k tomu, že výpočet není proveden, v horším případě je výsledek nesprávný, což někdy není snadné rozpoznat.

10.1 Příprava modelu

Prvním krokem je nastavení prostředí řešitele, to je závislé na povaze řešené úlohy a výběrem tohoto prostředí definujeme nabízené prostředky pro provedení výpočtu. Toto je nutné provést volbou *Magnetic-Nodal* a *Electric*. Dalším vhodným krokem je provedení importu.

Možné volby importu jsou[6]:

Solids Only: import bude proveden jako objem, tato volba je implicitní.

Surfaces Only: importuje pouze oblasti.

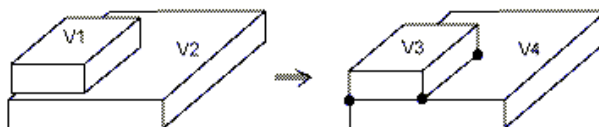
Wireframe Only: importuje pouze jako linie.

All: Importuje veškeré entity.

Dalším krokem před provedením výpočtu je příprava modelu. Po úspěšném provedení importu je vhodné začít úpravou měřítka a slepením ploch.

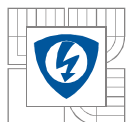
Úprava měřítka je nutná z důvodu, že AutoCAD kreslí v základní jednotce 1mm, ale pokud provedu import, tak ANSYS chápe základní jednotku 1m, model se tímto 1000x zvětší. Jeho zmenšení na původní rozměry je nutné provést pomůckou *SCALE*. Je nutné zadat zmenšení ve všech souřadných osách stejně. Často není možné použít volbu *MOVE*, pak musí být použita volba *copy*, což má za následek zachování původního modelu. Ten je pak nezbytně smazat.

Po provedení úpravy měřítka následuje „slepení“ ploch, neboli *GLUE*. Jelikož byl import proveden použitím formátu *.sat*, který definuje souřadnice klíčových bodů geometrických elementů, dochází k tomu, že body, které se původně kryly, nyní nejsou v přesném zákrytu. Jsou to velice malé odchylky, které jsou menší než 1×10^{-5} (*BTOL*) velikosti základní jednotky. Příkaz *GLUE* provede zalícování těchto drobných odchylek dle nastavené tolerance v proměnné *BTOL* a vytvoření styčných ploch, neboť byl proveden import pouze objemů. Implicitní hodnota *BTOL* je uvedena výše.



Obr. 10-1: Operace *GLUE*, slepení objemů [6]

Aby bylo možné provést vytvoření výpočtové sítě, je nutné nadefinovat typy elementů. Jako první bude proveden výpočet proudové hustoty, ale tento výpočet nebude zahrnovat vzduchové



okolí a zhašecí komoru, aby byl v budoucnu ušetřen jeden krok vytváření výpočtové sítě, tak je možné provést její vytvoření najednou. To znamená, že nadefinuji veškeré objemy jako *MAGNETIC VECTOR* typu *VECTOR BRICK 97*. V geometrii se vyskytují dva typy magnetických látek, první je železo, které má magnetickou vodivost charakterizovanou BH (viz. Příloha 1) křivkou a měď spolu se vzduchem, jež mají permeabilitu o stejné hodnotě. Je nutné počítat s touto skutečností a nadefinovat dva typy elementů, pak jim přiřadit správné materiálové vlastnosti, což je permeabilita či BH křivka. Později budou tyto materiály přiřazeny správným objemům.

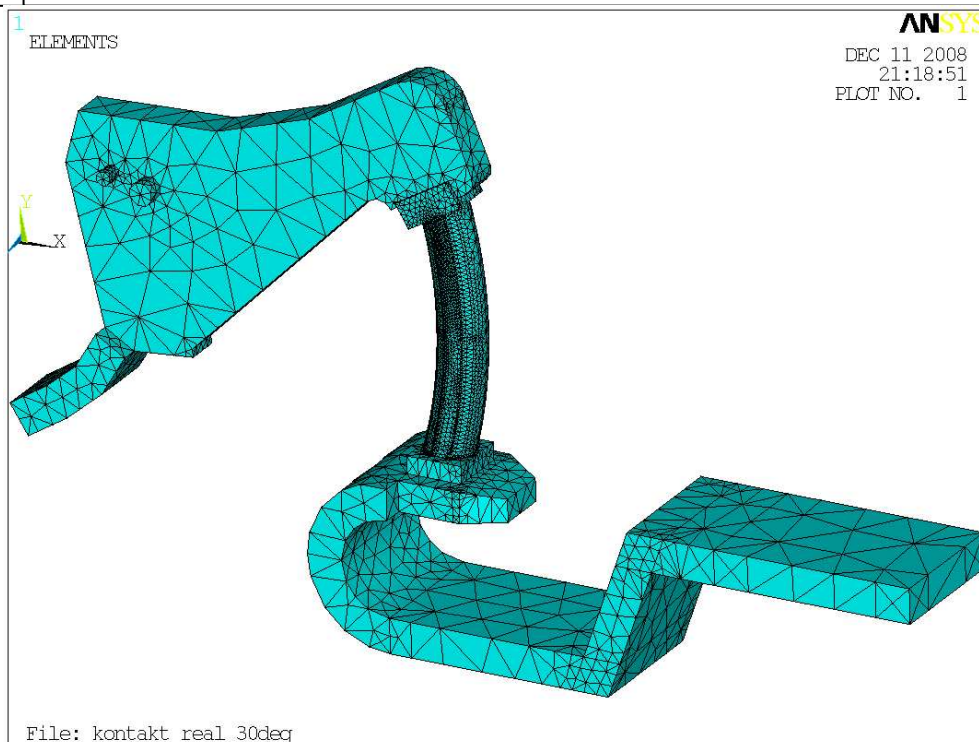
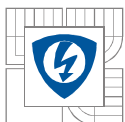
Tab. 10.1: BH křivka Fe

H [Am ⁻¹]	B [T]
2000,	0.026
3000,	0.065
4000,	0.22
5000,	0.43
10000,	1.24
15000,	1.45
20000,	1.52
25000,	1.59
30000,	1.627
40000,	1.67
50000,	1.7
60000,	1.73
70000,	1.76
100000,	1.83
150000,	1.89
200000,	1.95

Použitý element SOLID97 popisuje trojrozměrné magnetické pole. Každý element je tvořen pomocí osmi uzlů a na každém uzlu je až pět stupňů volnosti:

- Magnetický vektorový potenciál (AX,AY,AZ)
- Intenzita magnetického pole, časový integrál voltu
- Volt jako skalár
- Elektrický proud
- Elektromotorická síla

Stanovení vhodné výpočtové sítě MASH je velice důležitý krok, neboť její nedostatečná hustota v kritických místech způsobí velkou chybu výpočtu a naopak její přílišná hustota v místech, kde tomu není třeba, způsobí zbytečné výpočtové nároky bez vlivu na přesnost výsledku. Lze při tomto výpočtu říci, že kde bude výrazná změna geometrie proudové dráhy, tam také dojde ke změně proudové hustoty a také intenzity magnetického pole.



Obr. 10-2: Výpočtová síť, MASH

10.1.1 Okrajové podmínky pro elektrickou analýzu

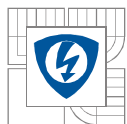
Elektrická analýza proběhne pouze na proudovodné dráze. Aby typ elementu korespondoval svojí geometrií s voleným elementem pro magnetický výpočet, je nutno volit typ SOLID69. Okolní objemy, jimiž jsou plechy zhašecí komory a vzduchové okolí, budou nastaveny jako neřešené elementy, čímž budou vyloučeny z výpočtu.

Rezistivita mědi použité na výrobu zadaného kontaktu je $\rho = 1.78 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$. Na čelo proudové dráhy bude přivedena hodnota zkratového proudu a veškeré uzly na ploše čela budou svázány ve stupni volnosti VOLT. Na opačném konci bude nastaven nulový potenciál elektrického napětí.

10.1.2 Okrajové podmínky pro magnetickou analýzu

Část podmínek pro magnetickou analýzu byla nastavena již v přípravě modelu. Jednalo se o definování typu elementu a materiálové konstanty. Typ elementu bylo nutné zvolit z důvodu vytvoření výpočtové sítě a materiálové konstanty se definovaly, aby bylo možné přiřadit správné materiály objemům při vytváření MASH. Byla to permeabilita mědi, vzduchu a BH křivka železa. Nyní je nutné přiřadit nulový potenciál vektorů magnetického pole na okrajích vzduchového prostředí. Je nutné nastavit nulový potenciál magnetického pole na všech šesti plochách vnějšího vzduchového okolí ve všech třech složkách vektoru (X, Y, Z).

Příprava numerického výpočtu probíhá nastavením statické analýzy. Vhodná metoda pro řešení těchto řídkých a velice rozměrných matic je metoda Inc. Choleskyho. Tato volba není nutná, ale urychluje konvergenci řešení. V případě použití procesoru Intel Celeron M 1,7GHz bude čas zkrácen z 25 minut při volbě, kdy si řešitele zvolí program sám, na 6 minut řešitelem používající Choleskyho metodu.



10.2 Výpočet elektrického prostředí

V prvním kroku je nutné stanovit rozložení proudové hustoty $J [Am^2]$, proud protéká celým objemem vodiče. Aby se projevil vliv skin efektu, musel by proud pulzovat o velice vysoké frekvenci, ten není tedy třeba uvažovat. Nastane zde to, že v prudce zakřivených oblastech geometrie dojde k místním zvýšením hodnot J .

$$I = \oint_S j \, dS \quad (Am^{-1}) \quad (10-1)$$

Je dobré mít přehled o velikosti očekávaného výsledku, je velice snadné dopočítat velikost proudové hustoty na konci kontaktu, kde je známa hodnota protékaného proudu a také plocha, jíž protéká.

Rozměry plochy konce proudové dráhy jsou:

$$\begin{aligned} a &= 4mm \\ b &= 15mm \\ s &= 60mm^2 \end{aligned}$$

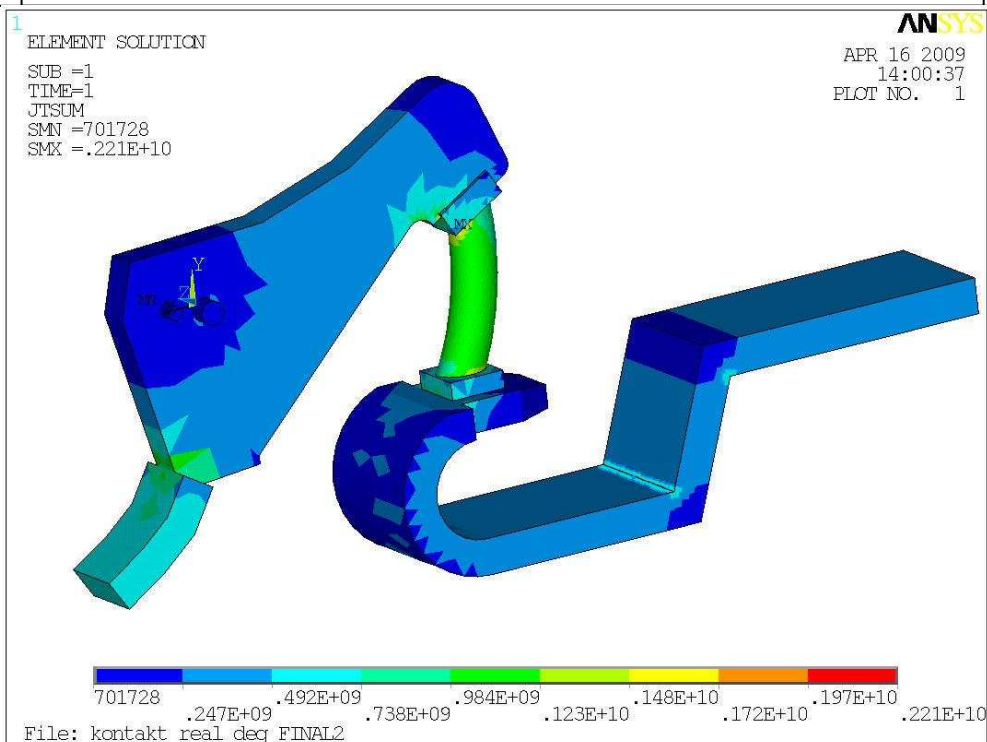
Protékaný proud touto plochou je:

$$I = 20kA$$

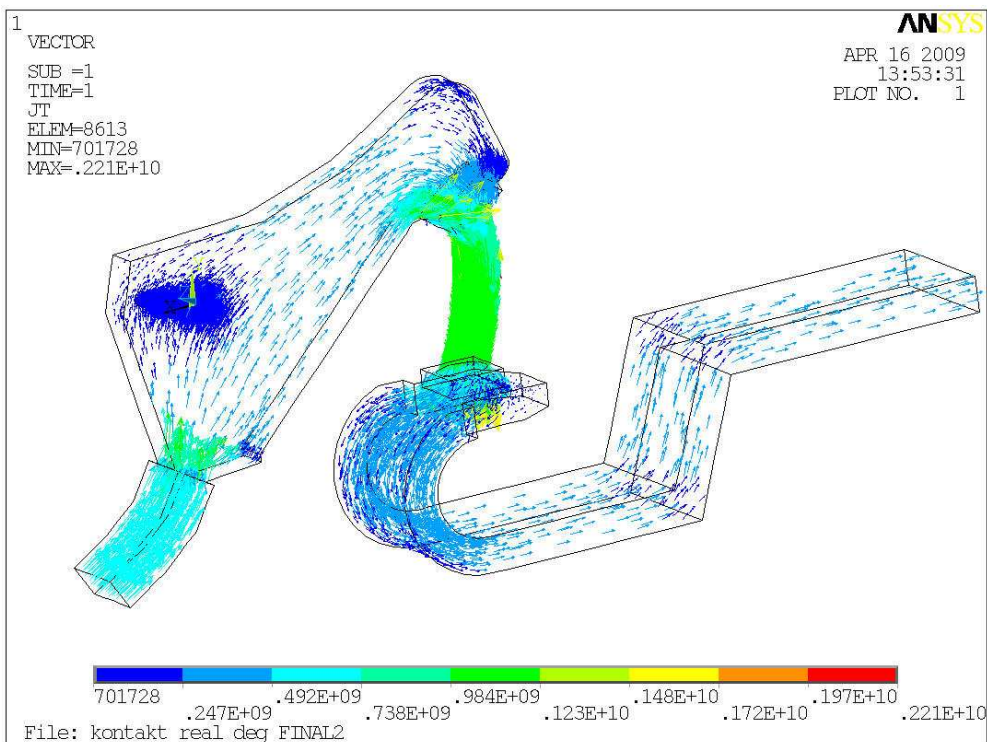
$$\begin{aligned} 1 \cdot m^2 & \dots j \, A \\ 60 \cdot 10^{-6} m^2 & \dots 20 \cdot 10^3 A \\ \hline j &= \frac{1 \cdot 20 \cdot 10^3}{60 \cdot 10^{-6}} = \frac{2}{6} \cdot 10^9 \, A/m^2 \end{aligned} \quad (10-2)$$

Z rovnice (10-2) plyne, že velikost proudové hustoty na konci proudové dráhy je $j = 0.33 \cdot 10^9 \, A/m^2$.

Této hodnotě odpovídá výsledek vypočtený ANSYSem, kde je rozložení proudové hustoty na kontaktu zobrazeno na (Obr. 10-3). Zde jsou také nápadné ostré výběžky oblastí o různé proudové hustotě, to je způsobeno několika faktory. První je způsob diskreditace modelu. Výpočtová síť byla příliš hrubá, což vedlo k menší přesnosti výsledků v oblastech změn rozložení hustoty proudu. Druhou příčinou je hrubší měřítko. Provedený výpočet elektrického prostředí je uložen v souboru s příponou *.rst*, což umožní pozdější prohlížení a zpracování výsledků.



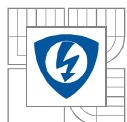
Obr. 10-3: Proudová hustota při 20kA



Obr. 10-4: Vektory proudové hustoty při 20kA

10.3 Výpočet magnetického prostředí

Výpočet magnetického prostředí je možné provést po provedení výpočtu rozložení proudu. To z toho důvodu, že buzení intenzity magnetického pole proběhne z vypočtené proudové hustoty. Definování prostředí pro magnetický výpočet proběhlo již před provedením výpočtu elektrického prostředí, proto je nutné toto fyzikální prostředí nahrát znovu.



Stejně jako u předchozího výpočtu je vhodné mít představu o očekávaném výsledku. Pro představu, velikost magnetické indukce u nejsilnějších permanentních magnetů dosahuje hodnot $B = 1.34T$ dle Tab. 10.2.

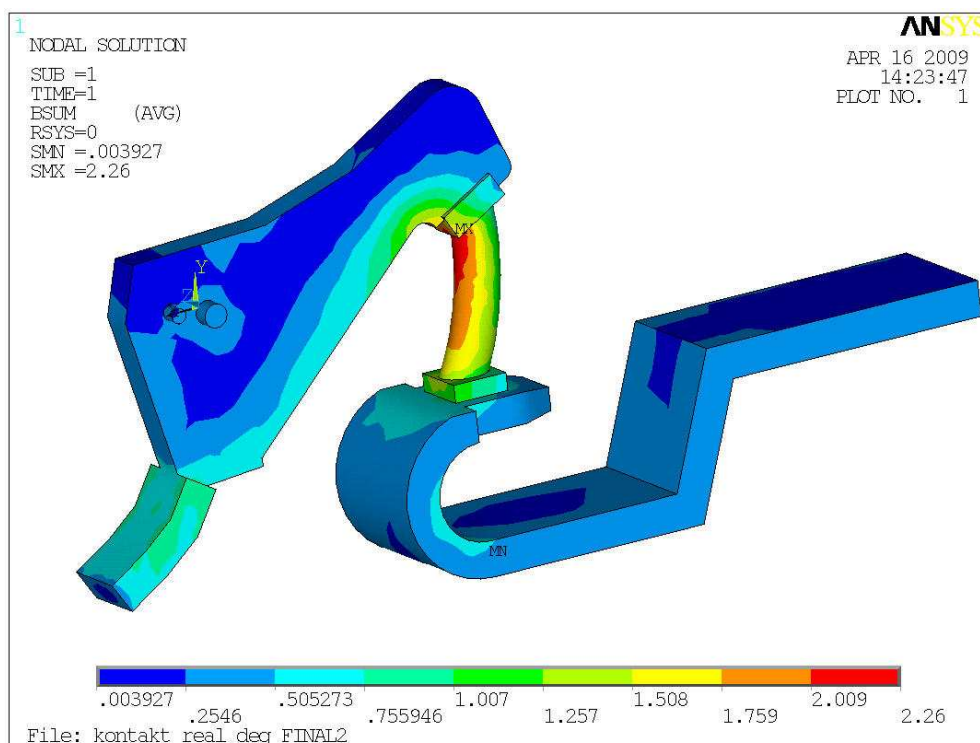
Tab. 10.2: Přehled magnetických indukcí PM[10]

Materiál	Ferit	AlNiCo	SmCo		NdFeB	
Vlastnost	Ceramic 8	Alnico 5	1-5	2-17	Pojivový	Spěkaný
B_r [T]	0,4	1,25	0,9	1,04	0,69	1,34

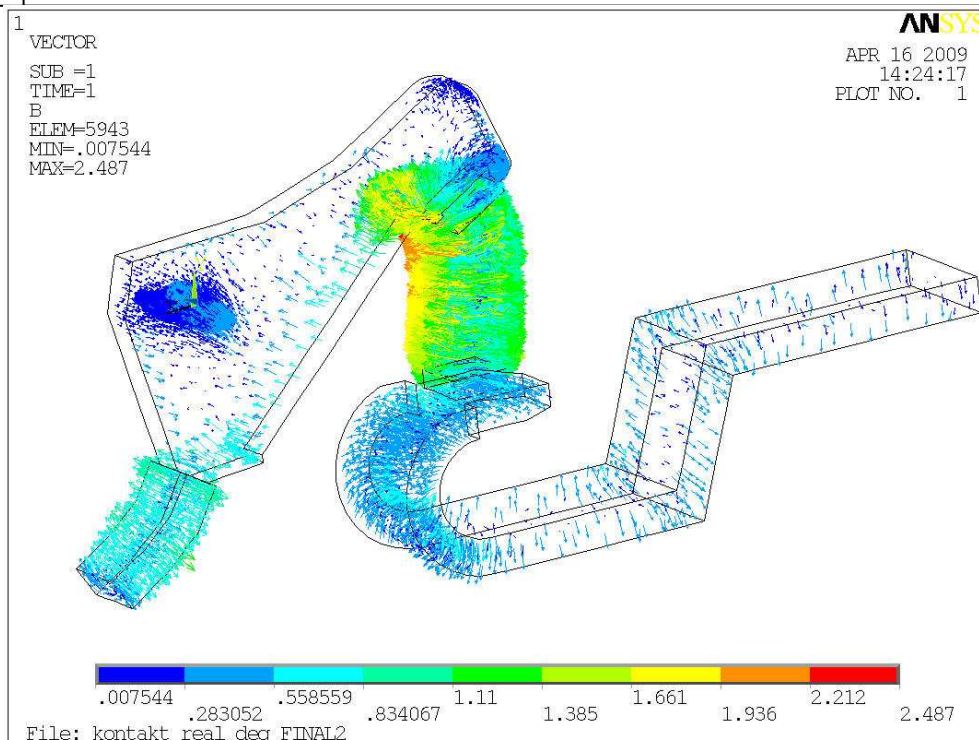
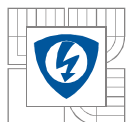
O velikostech magnetických indukcí lze zmínit, že magnetické indukce, které se dosahují na Zemi v laboratořích užívající hluboce zmrazených supravodivých cívek, se dosahuje stabilních hodnot cca. $B = 6T$. Při výrobě permanentních magnetů se užívá proudového impulsu (cca 60kA), který trvá velice krátkce, ale budí magnetickou indukci v poměrně jednoduché cívce o hodnotě cca. $B = 4T$. Na neutronových hvězdách, které mají extrémní fyzikální vlastnosti, je velikost magnetických indukcí na jejich povrchu cca. $B = 50T$.

Očekávaná hodnota magnetické indukce při průchodu proudu $I=20kA$ bude tedy zhruba v jednotkách tesla, avšak rozhodně ne vyšší než 4 tesla.

Výsledek výpočtu v grafické podobě je uvedena na (Obr. 10-5). Nejvyšších hodnot bude dosahováno v oblasti oblouku. Zde je nejvyšší proudová hustota, ale také charakter zakřivení proudové dráhy napomáhá dosažení vyšších hodnot. Tento stav je konstrukčně příznivý, neboť způsobuje nahuštění siločar v této oblasti a tím odpuzování kontaktů, čímž pomáhá jejich rychlému oddálení.



Obr. 10-5: Rozložení hustoty magnetické indukce

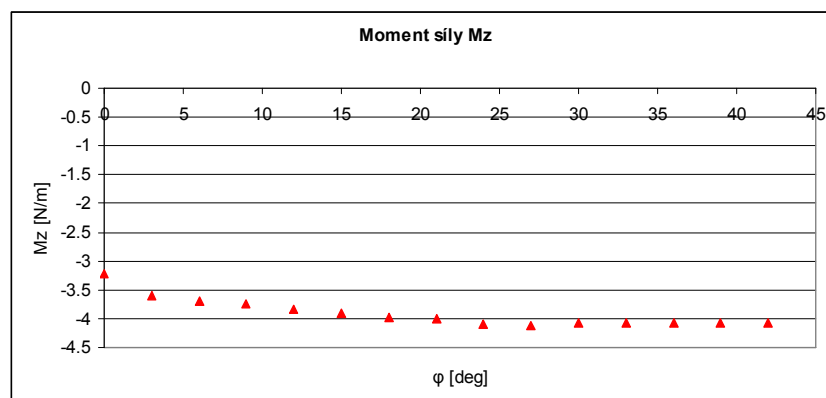


Obr. 10-6: Vektory magnetické indukce

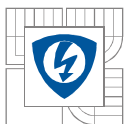
10.4 Výpočet elektrodynamického momentu síly v Ansys

Po předchozích výpočtech jsou připraveny veškeré podklady pro provedení požadovaného výpočtu elektrodynamických sil. Pro tento výpočet je nutné vybrat pouze pohyblivé části a přiřadit jim veškeré elementy, v zadaném případě to jsou objemy celého horního pohyblivého kontaktu včetně flexopassu, avšak bez oblouku.

Vlastní výpočet probíhá na principu vektorového součinu síly a polohy vektoru síly vzhledem k ose otáčení. Z tohoto vyplývá výhodnost umístění počátku souřadného systému tak, aby korespondoval s osou otáčení. Není to ovšem nezbytnost, neboť ANSYS dokáže přepočítat momenty k libovolným souřadnicím. Výpočtová síť je tvořena velkým množstvím uzlových bodů, v každém tomto uzlovém bodě je vypočtena hodnota vektoru síly (Obr. 10-8) a je známa jeho poloha, pak je proveden výpočet momentu dle (8-2). Počítačem vytvořená výpočtová síť není dokonale symetrická, proto vyjdou hodnoty momentu k osám X a Y nenulové, ale v poměru k momentu síly k ose Z jsou řádově menší, jak je možné vidět v Tab. 10.3.



Obr. 10-7: Průběh momentu M_{ZD} , 20kA

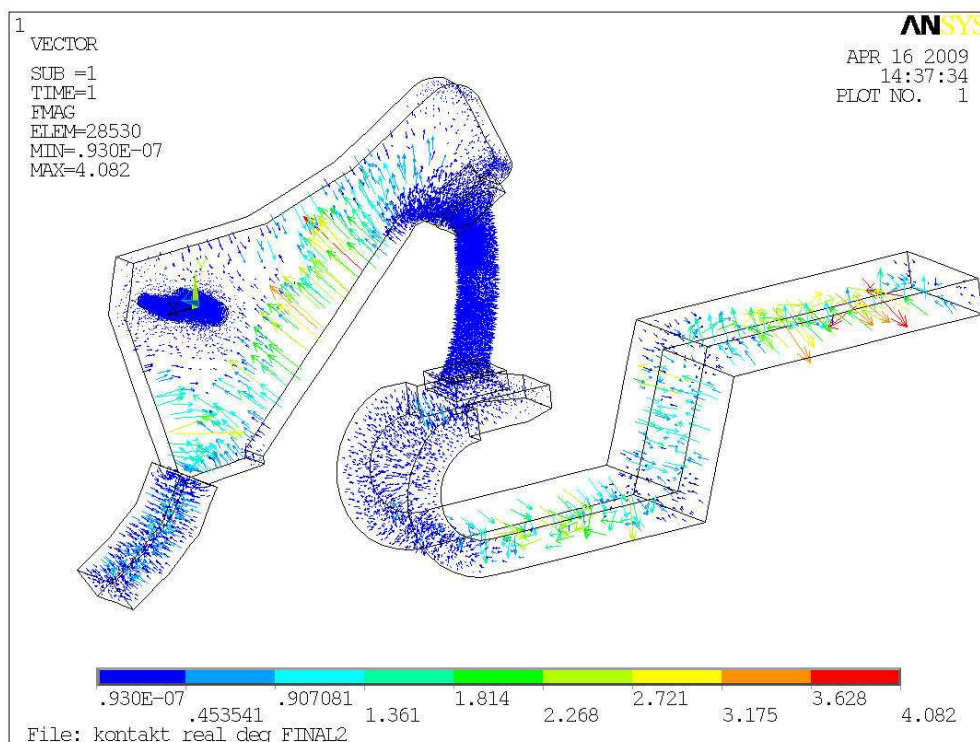


Závislost momentu M_{ZD} na úhlu otevření je vynesena v (Obr. 10-7). Nejvyšší hodnoty nabývá v zavřeném stavu. To je způsobeno nevyšší hustotou magnetického toku pod ramenem kontaktu, při otvírání bude docházet ke snížení hustoty magnetického toku, ale při větších úhlech otevření se začne velice mírně projevovat vliv plechů zhašecí komory, která je tvořena železnými plechy. To způsobí to, že jsou siločáry do těchto plechů vtahovány a pokles momentu síly bude zastaven.

Tab. 10.3: Výsledné momenty sil MD, 20kA

M_{XD}	M_{YD}	M_{ZD}	ϕ
N/m	N/m	N/m	deg
5.00E-02	2.70E-02	-3.22293	0
-5.28E-03	-2.84E-02	-3.59144	3
6.55E-03	-4.10E-02	-3.68562	6
-4.84E-03	1.36E-02	-3.74821	9
1.48E-02	-1.74E-02	-3.8381	12
5.72E-02	4.48E-03	-3.91969	15
7.95E-03	5.99E-02	-3.98267	18
2.27E-02	-8.14E-03	-4.00865	21
8.47E-03	-3.66E-02	-4.09839	24
3.98E-03	-1.90E-02	-4.11351	27
-2.02E-02	-1.14E-02	-4.08416	30
-1.04E-02	-1.87E-02	-4.08416	33
2.30E-02	-3.35E-03	-4.07817	36
1.56E-02	3.41E-03	-4.07685	39
3.09E-02	-2.01E-02	-4.07654	42

Grafické znázornění vektorů sil vybuzených magnetickým polem je patrné na (Obr. 10-8). Na horní kontakt bude působit velká síla dle rovnice (7-7), protože se zde nachází dlouhá proudová dráha.



Obr. 10-8: Vektory elektromagnetické síly FMAG

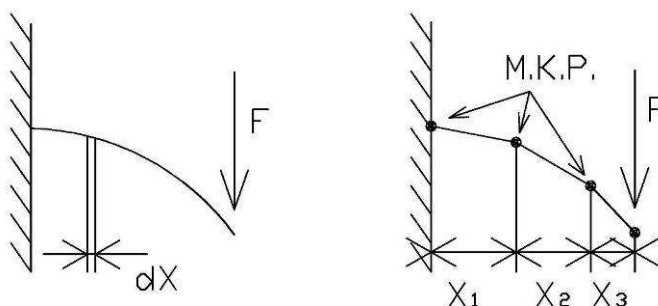
11 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Pod pojmem metoda konečných prvků MKP, nebo FEM Finite Element Metod, se skrývá základní princip práce programu ANSYS a všech programů, které slouží k počítačovému modelování fyzikálních dějů v širokém spektru oborů. Význam MKP je v tom, že pomocí této metody lze řešit problémy, na které nelze aplikovat klasické postupy.

Historie MKP sahá hluboko do minulosti, kdy v roce 1906 [9] proběhl pokus nahradit těleso soustavou elastických prutů, které měly zjednodušené vlastnosti tak, aby posunutí ve výpočtových uzlech odpovídalo posunutí v odpovídajících bodech tělesa (Obr. 11-1). MKP jako takové bylo poprvé popsáno Courantem v roce 1941 [9], ale nebyla jí věnována pozornost z důvodu absence potřebných výpočetních prostředků. Až v 1953 [9] byla poprvé sestavena rovnice tuhosti v maticovém tvaru, kterou bylo možné řešit na elektronkovém počítači té doby.

11.1 MKP-Diskretizace

Diskretizace znamená rozdělení řešeného tělesa na dostatečně malé elementy. Zde dojdeme k závěru, že dostačující přesnost výsledku nám posunuje časovou závislost náročnosti výpočtu mnohořadově níže, do oblasti použitelných časových nároků.



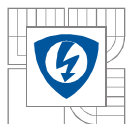
Obr. 11-1: Metoda konečných prvků

Jedná se tedy rozložení spojitěho systému do několika, přesněji do konečného počtu, prvků. Například na (Obr. 11-1) byl spojitý systém skládající se ve skutečném světě z nekonečna elementů dX rozložen na konečný nízký počet elementů X_1 až X_3 . Přesně takto pracuje také program ANSYS. Nyní stačí spočítat rovnici (11-1) ve čtyřech bodech a výsledkem je přibližný průběh mechanického napětí v délce nosníku. Výpočet rovnic není nijak složitý, F je síla působící na nosník, E je modul pružnosti, k_1 je koeficient obsahující průřez nosníku a k_2 zohledňuje pozici počítaného bodu od místa vetknutí v ose x .

$$u = \frac{F}{E} \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (11-1)$$

11.1.1 Diskretizace v zadané úloze

V zadané úloze je nejdříve nutné tuto diskretizaci, čili body (nody), ve kterých budou probíhat výpočty, stanovit. Tato část je velice důležitá, neboť špatné rozložení nodů a jejich počtu vede ke zkreslenému výsledku, nebo k dlouhému řešení. Například diskretizace modelu jističe se nazývá MESHING (Obr. 10-2). Tento krok je velice důležitý, neboť platí, že s rostoucím počtem nodů roste přesnost výsledku. Zároveň, z důvodu úspory výpočetního výkonu, je nutné správně



určit oblasti, kde má být hustota nodů malá a také je nutné z důvodu přesnosti výsledku správně stanovit oblasti s vysokou hustotou nodů.

Procesem diskretizace je také způsob, jakým je proveden výpočet elektrodynamických sil. Zadaná úloha je výpočet pohybové rovnice kontaktu. Je známo, že plné otevření kontaktu je 42° , takže otázkou je, jak jemný zvolit krok. Vzhledem k náročnosti tvorby 3-D modelu a jeho výpočtu v programu ANSYS jsem volil krok po 3° , což znamená provedení patnácti modelů a sedmdesáti pěti výpočty elektrodynamických sil. Jsou zadány hodnoty proudu 20kA, 15kA, 10kA, 5kA, 1kA.

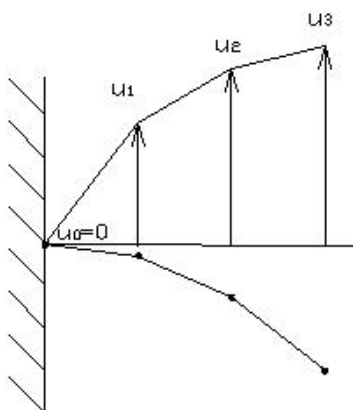
Dalším procesem diskretizace bylo měření síly pružiny. Ta byla měřena také po určitých krocích:

Tab. 11.1: Měření síly pružiny siloměrem

α [deg]	0	3	6	9	12	15	17	20	22	25	30	36	40	42
F_p [N]	18.2	20	22.2	24.2	24.2	25.2	26.5	27.8	29.5	31.2	31.2	18	17.8	18.7

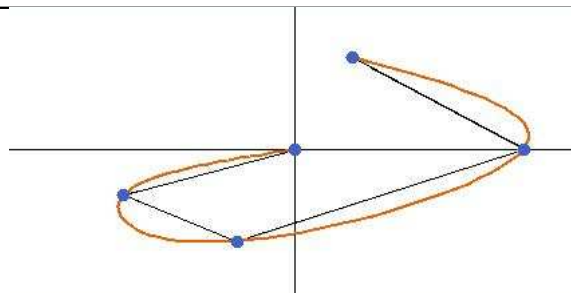
12 INTERPOLACE

Interpolace dokáže významným způsobem zpřesnit výslednou hodnotu získanou výpočtem MKP. Její princip spočívá v určení funkční hodnoty $f(x)$ v libovolném bodě $x \in (x_{\min}, x_{\max})$ na základě hodnot vypočtených v jejím okolí. Princip interpolace je také patrný z (Obr. 12-1). Jedná se o proložení známých bodů křivkou. V uvedeném příkladu je znázorněna nejjednodušší metoda lineární interpolace.



Obr. 12-1: Lineární interpolace

Složitější případy interpolace se v minulosti prováděly pomocí pružného pravítka. Tento způsob interpolace je velice blízký kubickému splajnu (Obr. 12-2). Tyto numerické metody byly podrobněji studovány až počátkem 20. století. Označení numerické metody pojmem spline, neboli splajn bylo provedeno až Shoenbergem v roce 1946, kdy v původním významu spline označoval zmíněná pružná pravítka [9].



Obr. 12-2: Kubický splajn [3]

12.1 Interpolace v zadané úloze

V zadané úloze byla interpolace užita hned několikrát, prvním případem užití byla lineární interpolace hodnot sil přitlačné pružiny (12-1). Krok naměřených hodnot nekorespondoval se zvoleným krokem výpočtu a nebylo by je možné dosadit do rovnice (8-2). Byla tedy provedena lineární interpolace:

$$M_i = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{i_{\max} - i_{\min}} \cdot (i - i_{\min}) + M_{\min} \quad (12-1)$$

Výsledky provedené lineární interpolací jsou uvedeny v Tab. 12.1. Výsledkem této práce jsou známé hodnoty momentu síly působící na horní pohyblivý kontakt ve zvoleném kroku. Výpočet je velice jednoduchý a byl proveden přímo na kalkulátoru.

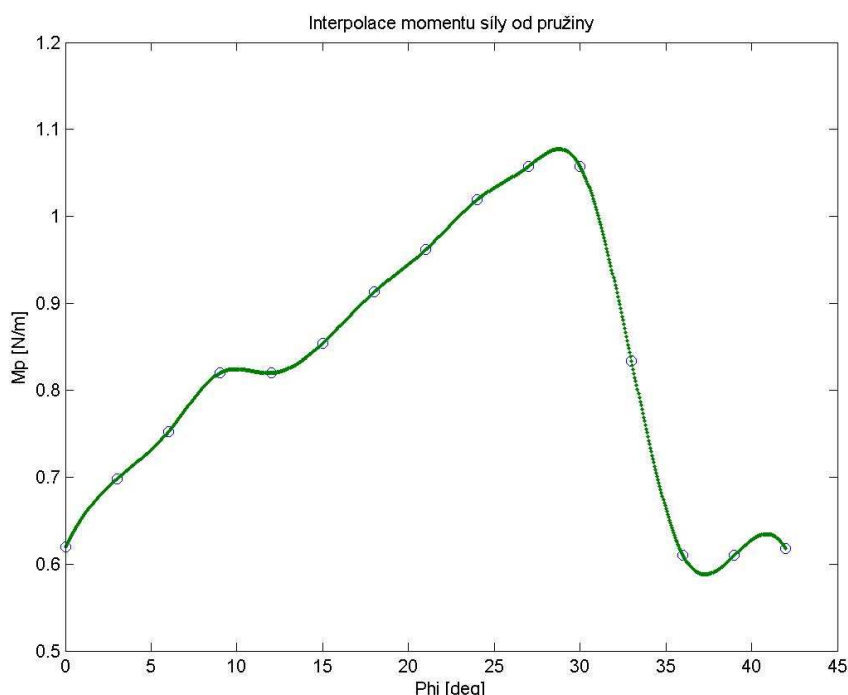
Tab. 12.1: Hodnoty momentů sil od pružiny po lineární interpolaci

α [deg]	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42
Mp [N/m]	0.620	0.698	0.752	0.820	0.820	0.854	0.913	0.961	1.019	1.057	1.057	0.834	0.610	0.610	0.618

Po výpočtu celkového momentu síly působícího na horní kontakt proudové dráhy dle (8-2) bylo třeba provést interpolaci pro potřeby výpočtu výsledné pohybové rovnice (8-13). Zde je moment funkcí času, vhodným způsobem, jak jej takto zavést, je interpolace pomocí kubického splajnu. Ten dokáže vytvořit takovou funkci, která prochází všemi známými body a zároveň splňuje požadavky na hladkost hladkého průběhu této funkce. Tato funkce je polynom, který je platný vždy pro interval mezi známými body. Pro jeho tvorbu byla využita funkce *spline* v programu MATLAB, zde je uvedena část skriptu, který tento výpočet provádí:

```
% ZAČÁTEK INTERPOLACE MOMENTU PRUŽINY
xp = [0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42]; % matice úhlů otevření
yp = [0.6202 0.6981 0.7524 0.8201 0.8201 0.854 0.912767 0.9613 1.019
      1.0574 1.0574 0.8337 0.61 0.61 0.6179]; % matice momentů
xxp = 0:.05:42; %od jaké hodnoty : krok (úhlu) splajnu : do jaké hodnoty
yyp = spline(xp,yp,xxp);
figure;
plot(xp,yp,'o',xxp,yyp,'.-')
title('Mp')
% KONEC INTERPOLACE DAT MOMENTU PRUŽINY
```

Z výsledného průběhu (Obr. 12-3) je patrné, že kubický splajn výborně vystihuje vliv setrvačných hmot.



Obr. 12-3: Průběh interpolace momentu síly od pružiny v závislosti na úhlu otevření

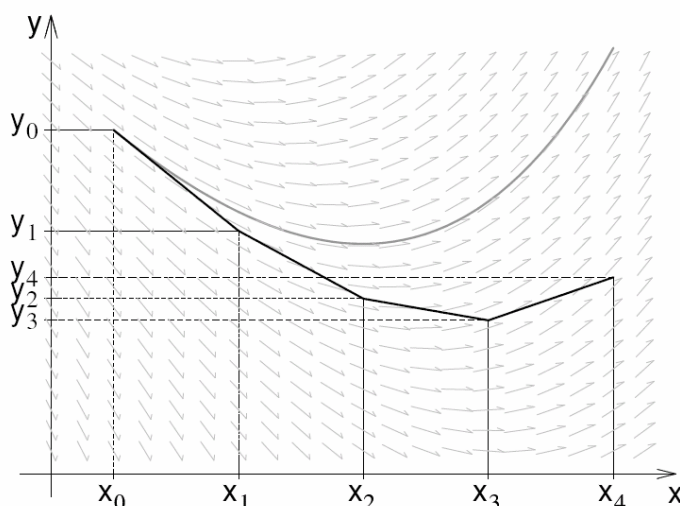
13 VÝPOČET POHYBOVÉ ROVNICE V PROGRAMU MATLAB

Pohybová rovnice zadaného kontaktu (8-12) bude řešena zpětnou Eulerovou metodou. Jedná se o jednodukovou metodu, což znamená, že následný krok bude určen pouze z hodnoty předchozího kroku. Existují také metody víceukové, ale ty nebude nutné použít. Z (Obr. 13-1) je patrné, že přesnost výsledného řešení závisí na délce zvoleného kroku a změně směru směrového pole. To je znázorněno šipkami a jeho význam je v tom, že čím větší je odchylka vypočtené hodnoty od skutečné, tím je také odlišnější směr šipky směrového pole, čímž velikost chyby ještě více narůstá. Pokud je volen krok dostatečně malý, tak také chyba bude menší. V případě řešení pohybové rovnice kontaktu lze očekávat, že úhlová rychlost nebude nabývat prudkých změn, tedy ani směrové pole této funkce ne. Výpočetní výkon počítače snadno zvládne krok o malém přírůstku. Vzhledem k těmto skutečnostem lze očekávat, že tato metoda, ač je nejjednodušší bude dostačující.

Rovnice pro Eulerovu metodu je:

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot f(x_i, y_i) \quad (13-1)$$

Kde h je krok, v zadaném případě skok v čase.



Obr. 13-1: Řešení diferenciální rovnice Eulerovou metodou [11]

Rovnice (13-1) aplikovaná na diferenciální rovnici (8-12) bude mít tvar:

$$\omega_{i+1} = \omega_i + dt \cdot \frac{M(t)}{J} \quad (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (13-2)$$

Výpočet bude proveden zápisem while-cyklu do tzv. *M-file*, což je v podstatě dávkový soubor pro MATLAB. To umožní pohodlné spuštění skriptu z příkazové řádky MATALABu zadáním názvu dávkového souboru.

Výpis části zdrojového kódu řešící diferenciálních rovnic:

```
m= [yy]; %zavedení proměnné m pro hodnoty momentu ze splajnu
while (phi(i) < 7*pi/30) % než bude dosaženo 42deg
    w(i+1) = w(i) + dt*m(n)/J;
    phi(i+1) = phi(i) + w(i)*dt;
    t(i+1) = t(i) + dt; %čítač času
    i = i+1;
end
```

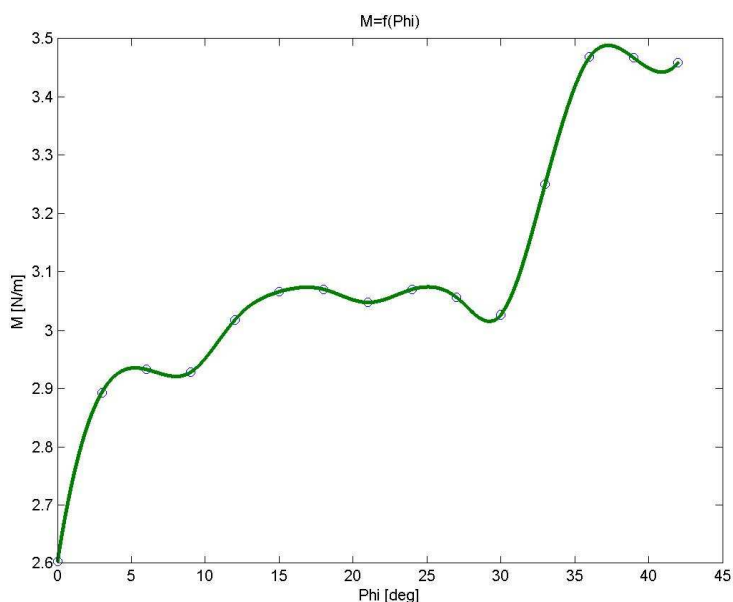
13.1 Výsledky řešení pro DC zkratový proud 20kA

Stejnoseměrný proud byl volen o hodnotě 20kA. Pro jednoduchost nebyly uvažovány žádné přechodné děje pro náběh zkratového proudu, které by ve skutečnosti způsobila přenosová síť. Model tedy uvažuje umístění jističího přístroje nekonečně blízko zdroje proudu.

Počáteční podmínky byly voleny takto:

- $F_{ku}=140,13 \text{ N}$
- $dt_0=1e-5 \text{ s}$
- $dt=1.10^{-6} \text{ s}$
- $J=13 \ 652.10^{-9} \text{ kg.m}^2$

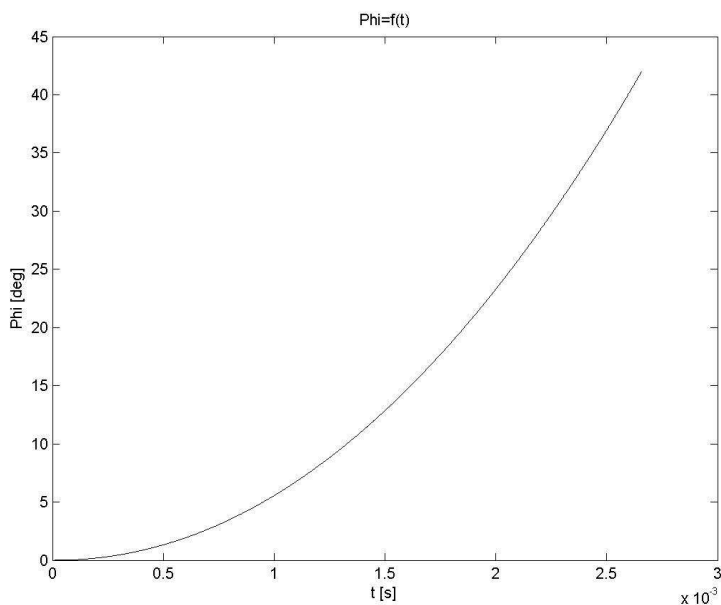
Průběh celkového momentu působícího na pohyblivý kontakt je zobrazen (Obr. 13-2).



Obr. 13-2: Celkový moment síly působící na pohyblivý kontakt

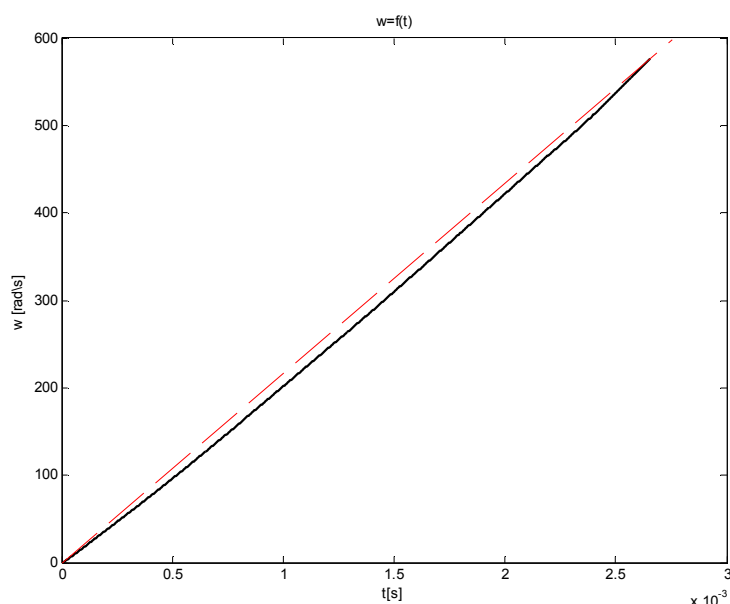
Výpočet proběhl velice rychle, zhruba během vteřiny. Skládal se z 2 647 kroků a hodnota výsledného času doby otevírání kontaktu vyšla:

$$t = 0.002657 \text{ s}$$



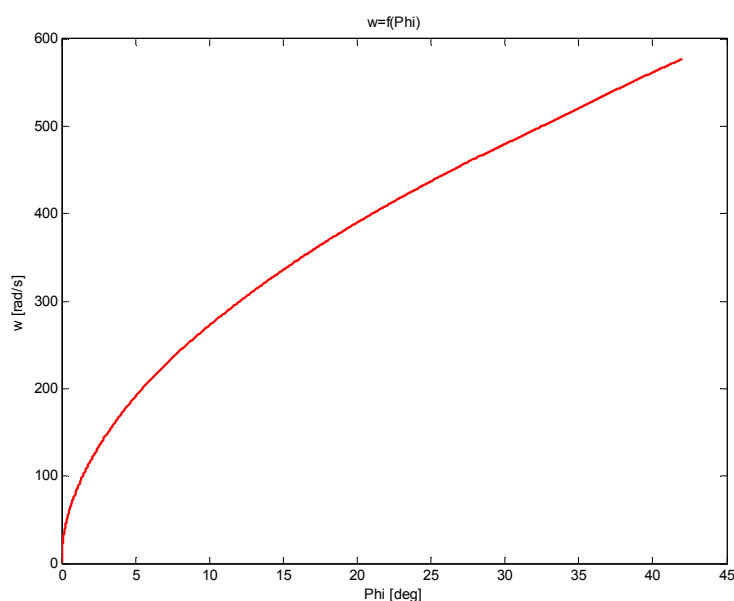
Obr. 13-3: Závislost úhlu otevření kontaktu na čase

V grafu zobrazujícím závislost úhlové rychlosti na čase (Obr. 13-4) je slabá čerchovaná čára. Ta slouží pouze k porovnání, aby bylo patrné, že průběh úhlové rychlosti není lineární. Nicméně se lineárnímu průběhu velice blíží, z tohoto důvodu se přibližný výpočet provedený v kapitole 8.3.1 tolik přibližuje hodnotě vypočtené v této kapitole.



Obr. 13-4: Úhlová rychlost otevírání kontaktu v závislosti na čase

Poslední zobrazený průběh ukazuje závislost úhlové rychlosti na úhlu otevření kontaktu. Maximální dosažená hodnota je $\omega_{MAX}=576,95 \text{ rad/s}$.



Obr. 13-5: Závislost úhlové rychlosti na úhlu otevření kontaktu

13.2 Výsledky řešení pro AC zkratový proud

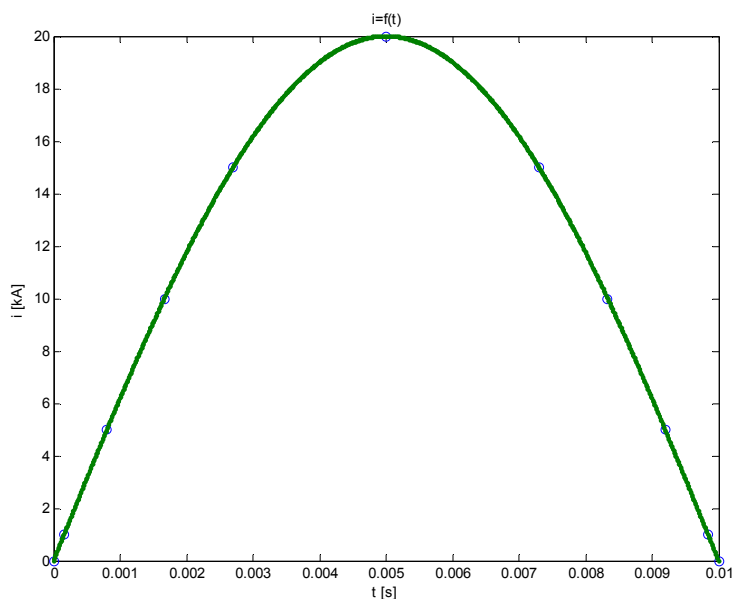
Řešení střídavého zkratového proudu proběhlo v zadaných hodnotách 1,5,10,15,20 kA. Nejdříve byly vypočteny elektrodynamické síly pro všechny zadané proudy ve všech úhlech otevření, tedy 0 až 42° po kroku 3°. Náběh proudu byl uvažován po sinusovce 50Hz (Obr. 13-6). Na tomto obrázku jsou vyznačeny zadané hodnoty, ostatní byly získány interpolací pomocí kubického splajnu.

Počáteční podmínky byly voleny:

- $F_{ku}=0,356 \text{ N}$
- $dt_0=1e-5 \text{ s}$
- $dt=1.10^{-6} \text{ s}$
- $J=13\,652.10^{-9} \text{ kg.m}^2$

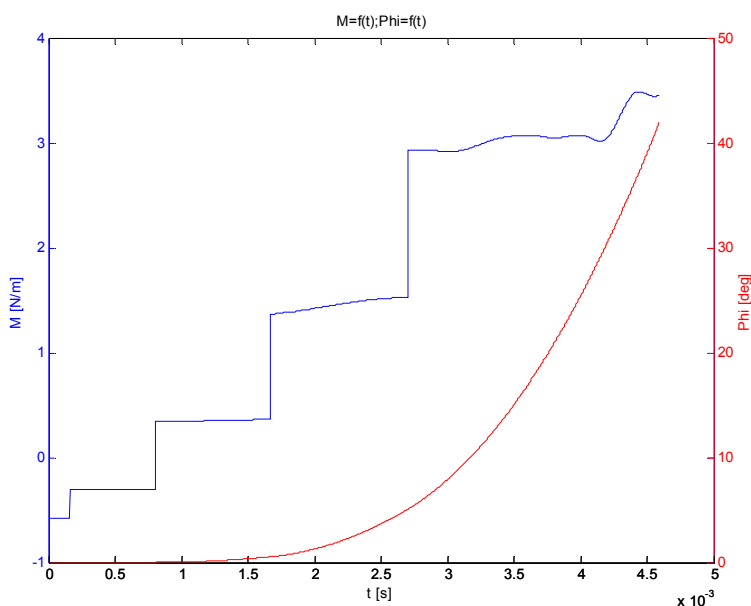
Doba výpočtu proběhla v jednotkách vteřin a skládala se z 4583 kroků. Výsledný čas doby otevření kontaktu vyšel:

$$t = 0,004804 \text{ s}$$



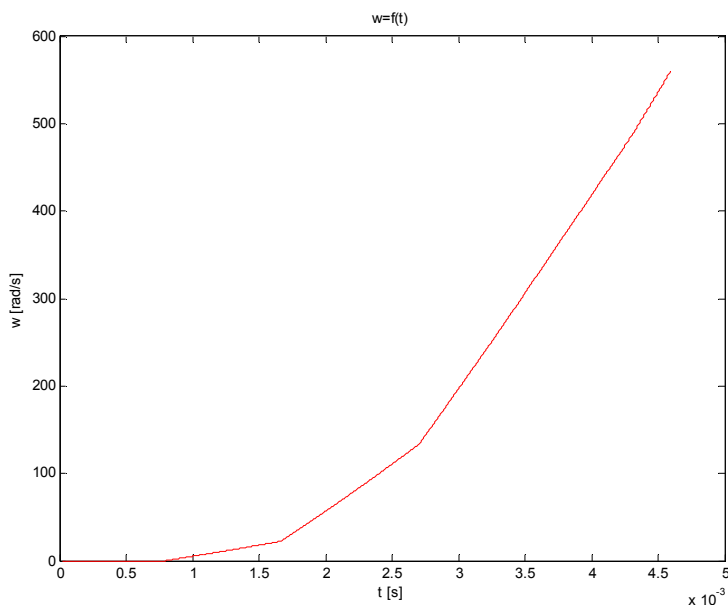
Obr. 13-6: Průběh uvažovaného zkratovaného proudu AC

Modrý průběh momentu je zobrazen v závislosti na čase (Obr. 13-7), ačkoli je hodnota momentu závislá na úhlu otevření a červený je průběh závislosti úhlu otevření kontaktu taktéž na čase. Z porovnání průběhů je patrné, že hodnota proudu 1 a 5 kA nestačí vytvořit dostatečnou elektrodynamickou sílu, která by překonala sílu pružiny. Vzhledem k tomu, že v průběhu řešení této úlohy není uvažováno vybavení zámku jističe, ale pouze jeho otevření vlivem elektrodynamických sil, je až do času $t=0,000807 \text{ s}$ zavřen. Tato skutečnost je patrná záporným momentem dle rovnice (8-2). Hodnota je v záporných oblastech konstantní pro určité proudy, neboť moment síly působící na kontakt je závislý na úhlu otevření a tedy konstantní, zde je úhel otevření 0° .



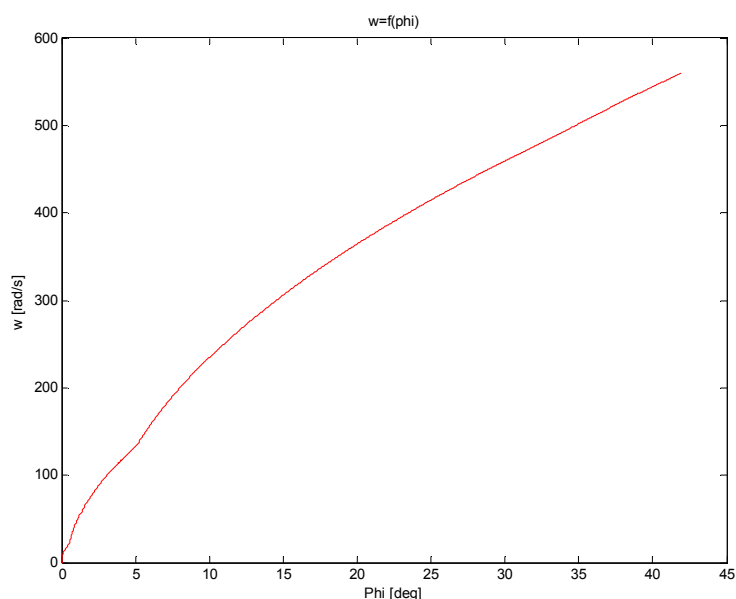
Obr. 13-7: Průběh momentu působícího na horní kontakt a úhlu jeho otevření

Průběh úhlové rychlosti na čase (Obr. 13-8) ukazuje vliv působení výsledného momentu síly na rychlost růstu úhlové rychlosti. Jsou jasné zlomy, ve kterých dojde ke skokové změně uvažovaného zkratového proudu, a tím také výsledného momentu síly. Pokud by se model ještě více přibližoval skutečnosti, tyto ostré změny by nebyly patrné a průběh by měl hladší charakter.



Obr. 13-8: Průběh úhlové rychlosti v čase

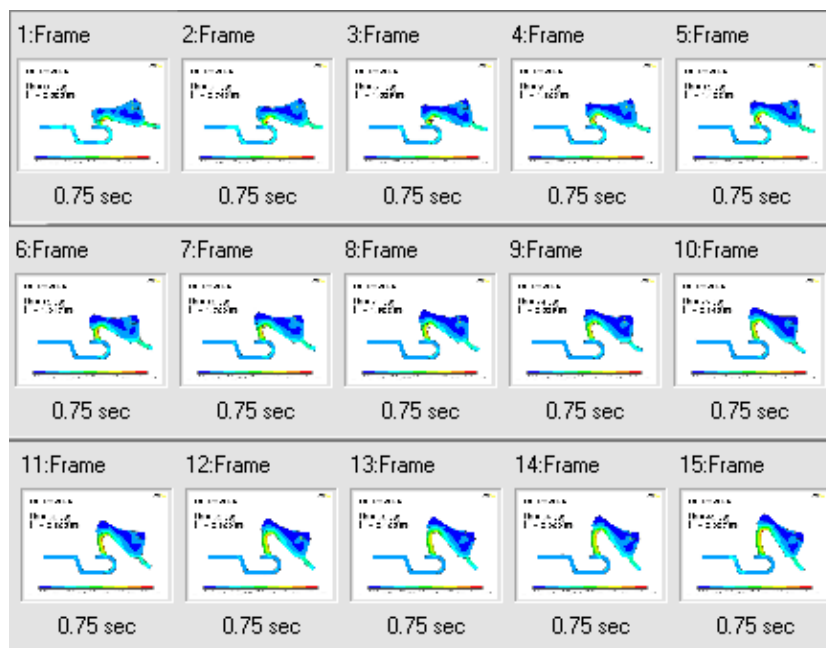
Závislost úhlové rychlosti na úhlu otevření (Obr. 13-9), maximální dosažená hodnota je $\omega_{MAX}=539,23 \text{ rad/s}$.



Obr. 13-9: Průběh úhlové rychlosti v závislosti na úhlu otevření

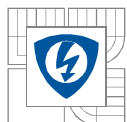
14 VIZUALIZACE POHYBU KONTAKTŮ

Vizualizace s sebou nese zásadní problém nerovnoměrnosti rozložení dějů v časové ose (Obr. 13-3, Obr. 13-7). Animace je složena z 15 snímků. Každý snímek je grafickým výstupem z výpočtu rozložení magnetické indukce v programu ANSYS. Později byl každý snímek editován v grafickém editoru, kdy do něj byly doplněny stěžejní informace o vizualizovaném ději. Tímto způsobem byl upraven každý snímek od 0° po 42° jak pro DC, tak pro AC zkratový proud.



Obr. 14-1: Animace ve formátu GIF

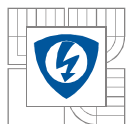
Výsledná animace tedy nedodrжуje časové odstupy jednotlivých snímků. Jak je patrné z (Tab. 14.1), časový odstup snímků na začátku DC děje je cca. 8x delší než na konci děje. To má



za následek neúměrně dlouhou prodlevu mezi snímky na začátku animace, kdy na konci animace jdou snímky tak rychle za sebou, že nelze postřehnout důležité údaje o ději.

Tab. 14.1: Časový sled a odstup snímků animace

DC děj 20kA			AC děj		
α [deg]	t [s]	delay [s]	α [deg]	t [s]	delay [s]
0	0		0	0	
3	0.000743	0.000743	0	0.000159	0.000159
6	0.001039	0.000296	0	0.000805	0.000646
9	0.001263	0.000224	3	0.002389	0.001584
12	0.001452	0.000189	6	0.00282	0.000431
15	0.001617	0.000165	9	0.00314	0.00032
18	0.001766	0.000149	12	0.003407	0.000267
21	0.001902	0.000136	15	0.003624	0.000217
24	0.002029	0.000127	18	0.003807	0.000183
27	0.002148	0.000119	21	0.003968	0.000161
30	0.00226	0.000112	24	0.004114	0.000146
33	0.002366	0.000106	27	0.004248	0.000134
36	0.002468	0.000102	30	0.004373	0.000125
39	0.002565	0.000097	33	0.00449	0.000117
42	0.002657	0.000092	36	0.004601	0.000111
			39	0.004705	0.000104
			42	0.004804	0.000099



15 ZÁVĚR

Řešení dějů v elektrických přístrojích je náročnou úlohou, neboť provozní spolehlivost elektrických přístrojů všech typů je otázkou bezpečnosti elektrických sítí s ohledem na majetek a hlavně na životy lidí. Prostudováním dostupných zdrojů byl získán dostatek odborných informací, aby bylo možné popsat děje probíhající při vypínání kontaktů jističe. Tato práce se přísně drží vymezeného koridoru zadané problematiky. Kapitola Přechodné jevy v elektrickém obvodu umožní pochopit důležitost konstrukčního uspořádání kontaktního systému. Je zde stručně uvedeno jak jsou různé spouště realizovány a jaké mají vypínací charakteristiky. Kapitola nazvaná Funkce jističe v elektrickém obvodu umožní čtenáři pochopit význam jističe v širším kontextu použití.

Bližší zaměření na zadanou problematiku je provedeno v kapitole Rozbor sil působících na spínací mechanismus. Nejdříve je vysvětleno jak elektrodynamické síly vynikají z pohledu fyziky a dále jsou tyto znalosti aplikovány na jednotlivé případy, které se v zadaném jističi vyskytují. Konkrétní jádro práce řeší kapitola s názvem Rozbor sil působící na spínací mechanismus. V této kapitole je sestavena pohybová rovnice využívající znalostí popsaných v předešlých kapitolách. Výsledná pohybová rovnice je využita pro provedení výpočtu, navíc je v této kapitole proveden zkušební výpočet. Tento výpočet má zavedenu řadu nepřijatelných zjednodušení, ale je užitečný v tom ohledu, že poskytne náhled na řád, v jakém lze očekávat výsledný finální výpočet. Později je zajímavé tyto výsledky porovnat.

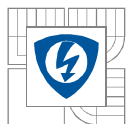
S řešením daného zadání souvisí také odvětví 3D modelace, je zde stručně popsáno několik zásad, které je nutné dodržet. Další kapitola nazvaná Výpočet elektrodynamických sil v programu Ansys zdůvodňuje provedené úpravy modelu. Jedná se úpravu geometrie a hlavně o definici okrajových podmínek.

Aby bylo možné pochopit omezení kladená při řešení zadané úlohy, je zde kapitola Metoda konečných prvků s konkrétními příklady užití a kapitola Interpolace také s konkrétními příklady užití. Kapitola Výpočet pohybové rovnice v programu MatLab popisuje způsob řešení sestavené diferenciální rovnice a hlavně uvádí dosažené výsledky. Poslední kapitola nazvaná Vizualizace pohybu kontaktů již pouze popisuje způsob provedení vizualizace a nenese s sebou důležité aplikace dějů k dosažení správného výsledku.

Důležitým výsledným údajem je doba, po kterou dochází k rozevírání kontaktu. Výsledný čas děje pro stejnosměrný průchod proudu o hodnotě 20kA je 2,657ms. Důvodem, proč je tak blízký přibližnému výpočtu je to, že $w=f(t)$ má téměř lineární průběh (Obr. 13-4). Zjednodušený výpočet také uvažoval lineární průběh úhlového zrychlení. Přibližný výpočet říká, že otevření kontaktů proběhne za 2,453ms.

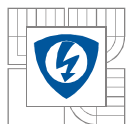
Druhý uvažovaný případ je průchod střídavého zkratového proudu o maximální hodnotě 20kA. Při tomto ději je patrný fakt, že v počátku je proud příliš malý, než aby dokázal účinek elektrodynamické síly způsobit otevření kontaktů. Ty jsou k sobě přitlačovány pružinou. K pozvolnému oddalování dochází po čase 0,807ms od počátku nárůstu proudu z nuly. Celkový čas potřebný k plnému oddálení kontaktů je pro tento případ 4,804ms. Při průmyslové frekvenci sítě 50Hz to znamená to, že dojde k dokončení rozevření až téměř těsně před dosažením první amplitudy průběhu proudu.

Největší slabinou této metody je skutečnost, že přesnost řešení diferenciálních rovnic vychází mimo jiné ze stanovených počátečních podmínek. Ty není možné, vzhledem k povaze řešené



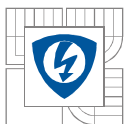
úlohy, přesně stanovit. Jedná se o určení času, po kterou bude působit síla od kontaktní úžiny, než bude možné říci, že dochází k oddalování kontaktů. Pokud bude na problém nahlíženo důsledně, tak je jasné, že s růstem elektrického proudu bude docházet k většímu vzniku tepla na úžinovém odporu a tím také změně plochy styku kontaktů. Bude také docházet ke změně síly od kontaktní úžiny. Není bohužel možné tuto sílu zanedbat, proto po dohodě s vedoucím práce byl stanoven čas působení síly od kontaktní úžiny na $dt_0=0,01\text{ms}$. Při změně na $dt_0=0,1\text{ms}$ budou výsledné časy: AC $t=4,804\text{ms}$ bez změny a DC $t=2,747$ tedy růst o 3,38%. U střídavého průběhu zkratového proudu neměla síla od kontaktní úžiny postřehnutelný vliv, protože je v počátku proud tak malý, že síla je téměř zanedbatelná.

Tato práce lze zdokonalit hlavně v oblasti určení doby působení síly od kontaktní úžiny, protože se ukazuje jako největší slabina celé práce. Další možností vedoucí ke zpřesnění výpočtu, je vylepšení metodiky určení průběhu momentu působící na pohyblivý kontakt v průběhu otevírání. Z (Obr. 13-7) je patrný jeho nespojitý průběh, způsobený postupem výpočtu sil pro zadané proudy.



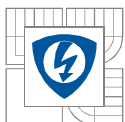
16 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HAVELKA, O. a kol. *Elektrické přístroje*, SNTL Praha spolu s ALFABratislava, 1985, ISBN - 04-529-85
- [2] VÁVRA Z. *Vysoké napětí a elektrické přístroje*, Elektronický učební text FEKT VUT, Brno 2007
- [3] WIKIPEDIA, <<http://en.wikipedia.org>>, 22.3.2008
- [4] SEZ KROMPACHY A.S. firemní webové stránky, <<http://www.sez-cr.cz>>, 20.3.2008
- [5] HALLIDAY, RESNICK, WALKER. *Fyzika, část 3 Elektřina a magnetismus*, VUTIUM a PROMETHEUS, 1. vydání Havlíčkův Brod 2000, ISBN - 80-214-1868-0
- [6] ANSYS, *Release 11.0 Documentation for ANSYS*, elektronická nápověda k programu.
- [7] URBAN A. *Konfigurátor Modeion V2.0*, podpůrný software firmy OEZ Letohrad
- [8] OEZ LETOHRAD S.R.O. firemní webové stránky <<http://www.oez.cz>> , 22.11.2008
- [9] VSB OSTRAVA, *Elektronický učební text MKP 1.díl*, dostupné z internetu: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf> , 22.11.2008
- [10] ING. ALEŠ HÁLA, *Rozložení magnetické indukce v ose osamocenému permanentního magnetu*, Universita Obrany Brno, dostupné z internetu: <http://conf.unob.cz/STO9/sbornik/clanky/Ales_Hala2.pdf>, 23.11.2008
- [11] RŮŽIČKOVÁ, I.; FAJMON, B. *Matematika 3*, Elektronický učební text FEKT VUT Brno
- [12] OEZ, tištěný katalog Modeion J1-2008-C.
- [13] VÁVRA Z., *Stavba elektrických strojů a přístrojů*, část 1 učebního textu FEKT VUT Brno
- [14] DAŠEVIČ L, *Simulace dějů v elektrických přístrojích*, semestrální práce FEKT VUT Brno 2008
- [15] INTERNET, *Úvod do MatLabu*, dostupné z internetu: http://xuv.kfe.fjfi.cvut.cz/mediawiki/index.php/%C3%9Avod_do_Matlabu#Interpolace, 24.4.2009

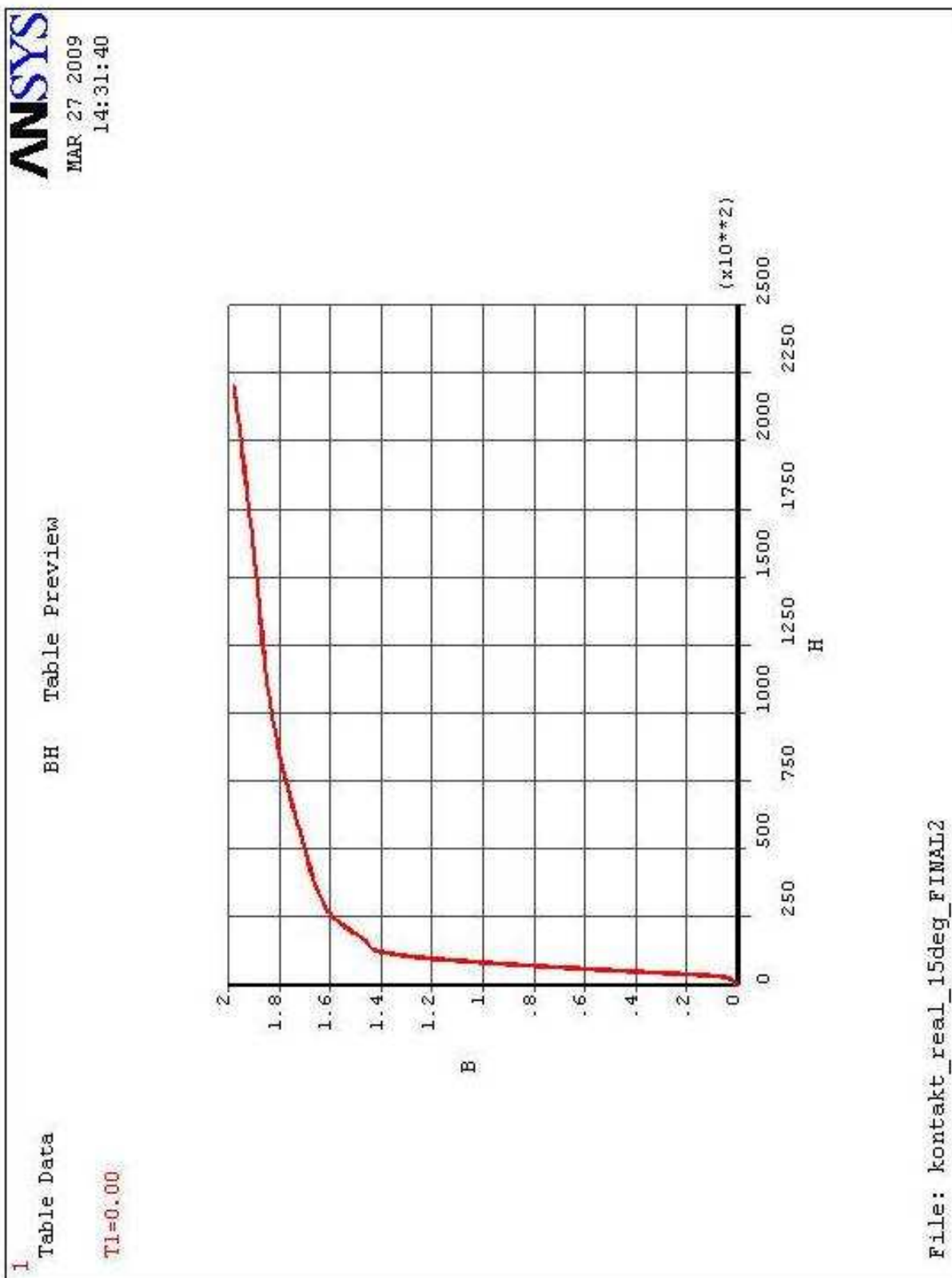


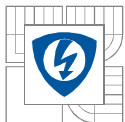
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
U	elektrické napětí	V
I	elektrický proud	A
R	elektrický odpor	Ω
B	magnetická indukce	T
Φ	magnetický tok	Wb
F_m	magnetomotorické napětí	A
U_m	Magnetické napětí	A
H	intenzita magnetického pole	$A \cdot m^{-1}$
L	indukčnost	H
F	mechanická síla	N
F_D	elektrodynamická síla	N
F_{KU}	elektrodynamická síla kontaktní úžiny	N
F_P	kontaktní síla od pružiny	N
HB	tvrdost podle Brinnela	MPa
ξ	činitel zohledňující materiál kontaktu	-
r	rameno síly	m
j	proudová hustota	$A \cdot m^{-2}$
J	moment setrvačnosti	$g \cdot m^2$
M	moment síly	N.m
M_D	elektrodynamický moment	N.m
t	čas	s
ω	úhlová rychlost	$rad \cdot s^{-1}$
ε	úhlové zrychlení	$rad \cdot s^{-2}$
φ	úhel otevření kontaktu	rad
MKP	Metoda Konečných Prvků	
CAD	Computer Aided Design, počítačem podporované projektování	



PŘÍLOHA 1: BH KŘIVKA





PŘÍLOHA 2: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU DC PROUDU

list 1/2

Název souboru: DC.M

```
clear

Fku = 140.13; %sila jez zpusobi de0
r = 0.03381;

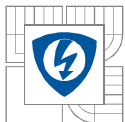
dt0 = 1e-5; %doba po kterou vzniká dt0
dt = 1e-6;
J = 13652E-9;
de0 = (Fku*r^2*dt0)/J; %pocatecni zrychleni v case dt0 !!OPRAVIT
%w0 = dt0*de0;
%w0=0;
w(1) = dt0*de0;
phi(1) = 0.; %krok uhlu
uhel(1)=0.;
t(1) = dt0;
i = 1;
n = 1;

% ZAČÁTEK INTERPOLACE VÝSLEDNÉHO MOMENTU SIL
x = [0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42]; % matice úhlů otevření
y = [2.60273 2.89334 2.93322 2.92811 3.018 3.06569 3.0699 3.04735 3.06979
3.05611 3.02676 3.25046 3.46817 3.46685 3.45864]; % matice momentů sil

xx = 0:.001:42; %zde určím krok (úhlu) splajnu a do jaké hodnoty

yy = spline(x,y,xx);
%xy= [xx;yy];
%plot(x,y,'o',xx,yy,'.-')
% KONEC INTERPOLACE MOMENTU SIL

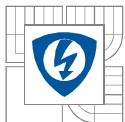
m= [yy]; %zavedení proměnné m pro hodnoty momentu ze splajnu
while (phi(i) < 7*pi/30) % než bude dosaženo 42deg
    while ( (xx(n+1)*pi)/180 <= phi(i) ) %musim prevest na radiany
        n=n+1; % nalezení odpovídajícího momentu
    end
```



PŘÍLOHA 2: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU DC PROUDU

list 2/2

```
w(i+1) = w(i) + dt*m(n)/J;  
phi(i+1) = phi(i) + w(i)*dt;  
  
t(i+1) = t(i) + dt; %čítač času  
moment(i) = m(n);  
uhel(i+1) = (phi(i)*180)/pi; %převod na deg  
i = i+1;  
  
end  
Pocet_kroku = i-1  
t_konec = t(i)  
  
plot(x,y,'o',xx,yy,'.-')  
figure;  
plot(t, uhel, 'k');  
figure;  
plot(t, w, 'k');  
figure;  
plot(uhel, w, 'k');
```



PŘÍLOHA 3: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU AC PROUDU

list 1/7

Název souboru: AC.M

```
clear

F = 0.356; %sila jez zpusobi Kont. uzina
r = 0.03381;

dt0 = 1e-5; %doba po kterou vzniká dt0
dt = 1e-6;
J = 13652E-9;
de0 = (F*r^2*dt0)/J; %pocatecni zrychleni v case dt0 !!OPRAVIT
%w0 = dt0*de0;
%w0=0;
w(1) = dt0*de0;
phi(1) = 0.; %krok uhlu
uhel(1)=0.;
t(1) = dt0;
i = 1;
n = 1;

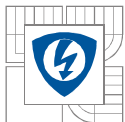
% ZAČÁTEK INTERPOLACE 1kA
x1 = [0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42]; % matice úhlů otevíření
y1 = [0.0353057 0.0481135 0.0540884 0.0596072 0.0645136 0.0683925
0.0720338 0.0753437 0.0780794 0.0804576 0.0831822 0.0867104 0.0899877
0.0906878 0.0911632]; % matice mometů

xx1 = 0:.1:42; %od jaké hodnoty : krok (úhlu) splajnu : do jaké hodnoty

yy1 = spline(x1,y1,xx1);
%figure;
%plot(x1,y1,'o',xx1,yy1,'.-')
%title('M-1kA')
% KONEC INTERPOLACE DAT

%-----

% ZAČÁTEK INTERPOLACE 5kA
```



PŘÍLOHA 3: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU AC PROUDU

list 2/7

```
x5 = [0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42]; % matice úhlů otevření
y5 = [0.31405 0.384767 0.413086 0.437934 0.461855 0.481019 0.498591
0.512817 0.528063 0.537907 0.542763 0.544758 0.550212 0.559958 0.568211]; %
matice mometů

xx5 = 0:.1:42; %od jaké hodnoty : krok (úhlu) splajnu : do jaké hodnoty

yy5 = spline(x5,y5,xx5);
%figure;
%plot(x5,y5,'o',xx5,yy5,'.-')
%title('M-5kA')
% KONEC INTERPOLACE DAT

%-----

% ZAČÁTEK INTERPOLACE 10kA
x10 = [0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42]; % matice úhlů otevření
y10 = [0.967407 1.12363 1.17614 1.21901 1.26594 1.30476 1.33791 1.36089
1.39557 1.41061 1.41865 1.42104 1.42672 1.44569 1.45027]; % matice mometů

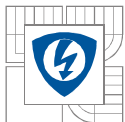
xx10 = 0:.1:42; %od jaké hodnoty : krok (úhlu) splajnu : do jaké hodnoty

yy10 = spline(x10,y10,xx10);
%figure;
%plot(x10,y10,'o',xx10,yy10,'.-')
%title('M-10kA')
% KONEC INTERPOLACE DAT

%-----

% ZAČÁTEK INTERPOLACE 15kA
x15 = [0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42]; % matice úhlů otevření
y15 = [1.94428 2.19886 2.27326 2.32824 2.39747 2.45668 2.5047 2.53115
2.59049 2.60685 2.5961 2.59016 2.58154 2.54589 2.550074]; % matice mometů

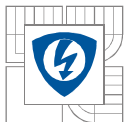
xx15 = 0:.1:42; %od jaké hodnoty : krok (úhlu) splajnu : do jaké hodnoty
```



PŘÍLOHA 3: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU AC PROUDU

list 3/7

```
yy15 = spline(x15,y15,xx15);  
  
%figure;  
  
%plot(x15,y15,'o',xx15,yy15,'.-')  
  
%title('M-15kA')  
  
% KONEC INTERPOLACE DAT  
  
%-----  
  
% ZAČÁTEK INTERPOLACE 20kA  
  
x20 = [03 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42]; % matice úhlů otevření  
y20 = [3.22293 3.59144 3.68562 3.74821 3.8381 3.91969 3.98267 4.00865  
4.09839 4.11351 4.08416 4.08416 4.07817 4.07685 4.07654]; % matice mometů  
  
xx20 = 0:.1:42; %od jaké hodnoty : krok (úhlu) splajnu : do jaké hodnoty  
  
yy20 = spline(x20,y20,xx20);  
  
%figure;  
  
%plot(x20,y20,'o',xx20,yy20,'.-')  
  
%title('M-20kA')  
  
% KONEC INTERPOLACE DAT  
  
%-----  
  
% ZAČÁTEK INTERPOLACE MOMENTU PRUŽINY  
  
xp = [0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42]; % matice úhlů otevření  
yp = [0.6202 0.6981 0.7524 0.8201 0.8201 0.854 0.912767 0.9613 1.0286  
1.0574 1.0574 0.8337 0.61 0.61 0.6179]; % matice mometů  
  
xxp = 0:.1:42; %od jaké hodnoty : krok (úhlu) splajnu : do jaké hodnoty  
  
yyp = spline(xp,yp,xxp);  
  
%figure;  
  
%plot(xp,yp,'o',xxp,yyp,'.-')  
  
%title('Mp')  
  
% KONEC INTERPOLACE DAT MOMENTU PRUŽINY
```



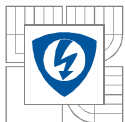
PŘÍLOHA 3: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU AC PROUDU

list 4/7

```
while (phi(i) < 7*pi/30) % než bude dosaženo 42deg

    if t(i) <= 0.000159221
        while ( (xx1(n+1)*pi)/180 <= phi(i) ) %musim prevest na radiansy
            n=n+1; % nalezení odpovídajícího momentu
        end
        moment(i) = (yy1(n)-yyp(n));
        if moment(i) <= 0
            w(i+1)=0;
            phi(i+1)=0;
        else
            w(i+1) = w(i) + dt*moment(i)/J;
            phi(i+1) = phi(i) + w(i)*dt;
        end
        t(i+1) = t(i) + dt;
        %moment(i) = (yy1(n)+yyp(n));
        uhel(i+1) = (phi(i)*180)/pi; %převod na deg
        i = i+1;
    end

    if t(i) > 0.000159221 & t(i) <= 0.000804305
        while ( (xx5(n+1)*pi)/180 <= phi(i) ) %musim prevest na radiansy
            n=n+1; % nalezení odpovídajícího momentu
        end
        moment(i) = (yy5(n)-yyp(n));
        if moment(i) <= 0
            w(i+1)=0;
            phi(i+1)=0;
        else
            w(i+1) = w(i) + dt*moment(i)/J;
            phi(i+1) = phi(i) + w(i)*dt;
        end
        t(i+1) = t(i) + dt;
        %moment(i) = (yy5(n)+yyp(n));
        uhel(i+1) = (phi(i)*180)/pi; %převod na deg
```



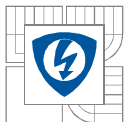
PŘÍLOHA 3: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU AC PROUDU

list 5/7

```
i = i+1;
end

if t(i)>0.000804305 & t(i)<=0.0016667
    while ( (xx10(n+1)*pi)/180 <= phi(i) ) %musim prevest na radians
        n=n+1; % nalezení odpovídajícího momentu
    end
    moment(i) = (yy10(n)-yyp(n));
    if moment(i)<=0
        w(i+1)=0;
        phi(i+1)=0;
    else
        w(i+1) = w(i) + dt*moment(i)/J;
        phi(i+1) = phi(i) + w(i)*dt;
    end
    t(i+1) = t(i) + dt;
    %moment(i) = (yy10(n)+yyp(n));
    uhel(i+1) = (phi(i)*180)/pi; %převod na deg
    i = i+1;
end

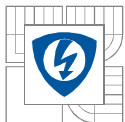
if t(i)>0.0016667 & t(i)<=0.00335
    while ( (xx15(n+1)*pi)/180 <= phi(i) ) %musim prevest na radians
        n=n+1; % nalezení odpovídajícího momentu
    end
    moment(i) = (yy15(n)-yyp(n));
    if moment(i)<=0
        w(i+1)=0;
        phi(i+1)=0;
    else
        w(i+1) = w(i) + dt*moment(i)/J;
        phi(i+1) = phi(i) + w(i)*dt;
    end
    t(i+1) = t(i) + dt;
```

PŘÍLOHA 3: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU AC PROUDU

list 6/7

```
%moment(i) = (yy15(n)+yyp(n));  
uhel(i+1) = (phi(i)*180)/pi; %převod na deg  
i = i+1;  
end  
  
if t(i)>0.00335 & t(i)<=600  
while ( (xx20(n+1)*pi)/180 <= phi(i) ) %musim prevest na radiansy  
n=n+1; % nalezení odpovídajícího momentu  
end  
moment(i) = (yy20(n)-yyp(n));  
if moment(i)<=0  
w(i+1)=0;  
phi(i+1)=0;  
else  
w(i+1) = w(i) + dt*moment(i)/J;  
phi(i+1) = phi(i) + w(i)*dt;  
end  
t(i+1) = t(i) + dt;  
%moment(i) = (yy15(n)+yyp(n));  
uhel(i+1) = (phi(i)*180)/pi; %převod na deg  
i = i+1;  
end  
  
end  
moment(i) = moment(i-1);  
Pocet_kroku = i-1  
t_konec = t(i)  
  
figure;  
plot(uhel, moment, 'k');  
title('Moment(t)')  
figure;  
plot(x20,y20,'o',xx20,yy20,'.-')  
title('Interpolace M(t) 20kA')  
figure;
```



PŘÍLOHA 3: ZDROJOVÝ KÓD VÝPOČTU AC PROUDU

list 7/7

```
plot(t, uhel, 'k');  
title('Phi(t)')  
figure;  
plot(t, w, 'k');  
title('w(t)')  
figure;  
plot(uhel, w, 'k');  
title('w(phi)')
```