



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ELEKTROMAGNETICKÁ ANALÝZA NADPROUDOVÉ SPOUŠTĚ JISTIČE

ELECTROMAGNETIC ANALYSIS OF CIRCUIT BREAKER TRIPPING UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zdeněk Mlynář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO 2017



Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Zdeněk Mlynář

ID: 154809

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Elektromagnetická analýza nadproudové spouště jističe

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište princip funkce elektromagnetické spouště v zadaném jističi.
2. Provedte statickou magnetickou analýzu pro zadané pracovní body ve vybraných simulačních prostředích.
3. Provedte výpočet síly působící na kotvu elektromagnetu při různých provozních stavech.
4. Provedte potřebná měření pro verifikaci numerického modelu.
5. Získané výsledky analyzujte a vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

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

[3] Dědek, L., Dědková, J.: Elektromagnetismus, VUTIUM 2000

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

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

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Použití jističů jako přístrojů sloužících k ochraně obvodu, zařízení, majetku a v neposlední řadě i osob je důležitou součástí výroby, přenosu a distribuce elektrické energie. To klade vysoké nároky na konstrukci jističe jako komplexního přístroje. K zajištění jeho správné funkce slouží jedna z mnoha jeho částí a tou je spoušť. Spoušť slouží k vyhodnocení procházejícího proudu a k reakci na nežádoucí nadproud. Z těchto důvodů se tato práce zabývá elektromagnetickou analýzou konkrétně termomagnetické spouště. Zaměření bude na zlepšení stávajícího stavu a nalezení vhodnějších konstrukčních řešení.

Klíčová slova

Termomagnetická spoušť; elektromagnetická analýza; metoda konečných prvků; jistič; spoušť; OEZ; FLUX; simulace; vysokorychlostní kamera; bimetal

Abstract

Using circuit breakers as devices for protecting the circuit, equipment, property, and not least the people is an important part of the generation, transmission and distribution of electricity. This puts high demands on the design of complex devices such as circuit breakers. To ensure proper function is one of many parts and that is the trip unit. Trip unit is used to evaluate the current flowing through the breaker and respond to undesirable overcurrent. For these reasons, this work deals with electromagnetic analysis - specifically thermal magnetic trip unit. The focus will be on improving the actual situation and finding more suitable design solutions.

Keywords

Thermal magnetic trip unit; electromagnetic analysis; finite element method; breaker; trip unit; OEZ; FLUX; simulation; high – speed camera; bimetal

Bibliografická citace:

MLYNÁŘ, Z. *Elektromagnetická analýza nadproudové spouště jističe*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 41 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma *Elektromagnetická analýza nadproudové spouště jističe* 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **23. května 2016**

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne **23. května 2016**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Jistič	2
2.1	Funkce jističe nízkého napětí	2
2.2	Popis jednotlivých částí jističe	2
2.2.1	Kontaktní systém a zhášení	3
2.2.2	Spínací systém	4
2.2.3	Spoušť	4
3	Akční členy jističe	5
3.1	Obecná funkce akčního členu	5
3.2	Katarakt	5
3.3	Elektronická spoušť	6
3.3.1	Princip funkce	6
3.3.2	Rogowského cívka	6
3.4	Termomagnetická spoušť jističe 250 A	8
3.4.1	Popis jednotlivých částí termomagnetické spouště	8
3.4.2	Princip funkce	10
4	Základní poznatky z teorie elektromagnetismu	12
4.1	Pole ustálených proudů	12
4.2	Stacionární magnetické pole	14
4.3	Teorie elektromagnetu	15
5	Výpočetní postupy pro analýzu spouště	19
5.1	Metoda konečných prvků	19
5.2	Výpočtové programy	20
5.3	Měření	20
6	3D model spouště jističe	21
6.1	Postup při vytváření modelu spouště	21
6.1.1	Geometrie	21
6.1.2	Materiály	21
6.2	Výsledná část podsestavy spouště vhodná k analýze	22
7	Jednotlivé návrhy na optimalizaci termomagnetické spouště	23
7.1	Koncept 1	23
7.2	Koncept 2	23
7.3	Koncept 3	24
8	Statická elektromagnetická analýza spouště	25
8.1	Cíle	25
8.2	Rozložení proudové hustoty jednotlivých konceptů	25
8.3	Výpočet Jouleových ztrát na proudové dráze	27

9	Simulace Silového působení na kotvu elektromagnetu.....	28
10	Výsledky měření.....	30
10.1	Příprava měření.....	30
10.2	Jouleovy ztráty na topítku.....	30
10.3	Vypínací charakteristika.....	31
10.4	Oteplení bimetalu a jeho průhyb.....	33
10.5	Měření pohybu zkratové spouště.....	37
11	Vyhodnocení výpočtů simulací a měření.....	39
11.1	Tepelná část spouště.....	39
11.2	Elektromagnetická část spouště.....	39
12	Závěr.....	41

Seznam obrázků

Obrázek 1: Jednotlivé části jističe s termomagnetickou spouští [3]	3
Obrázek 2: Princip funkce Rogowského cívky [8]	7
Obrázek 3: Porovnání Rogowského cívky s proudovým transformátorem [8]	8
Obrázek 4: Termomagnetická spoušť jističe a její části	10
Obrázek 5: Elektromagnetická soustava s jednou budící cívkou a proměnnou vzduchovou mezerou [11]	16
Obrázek 6: Vytvořený model připravený k importu do simulačního programu	22
Obrázek 7: Koncept 2 s jedním nýtem bimetalu	24
Obrázek 8: Rozložení proudové hustoty – standard	25
Obrázek 9: Rozložení proudové hustoty – koncept 1	26
Obrázek 10: Rozložení proudové hustoty – koncept 2	26
Obrázek 11: Rozložení proudové hustoty – koncept 3	27
Obrázek 12: Silové působení na kotvu při harmonickém napájení – Standard	29
Obrázek 13: Změřené vypínací charakteristiky jednotlivých konceptů	33
Obrázek 14: Zapojení laserového čidla a měřícího stanoviště	34
Obrázek 15: Snímek pořízený vysokorychlostní kamerou v okamžiku rozhodujícího dotyku kotvy s hřídelí – Standard 1500 A při nastavení MIN.	38

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vypočtené hodnoty Jouleových ztrát jednotlivých konceptů na proudové dráze termomagnetické spouště při jmenovitém proudu 250A.....	27
Tabulka 2: Vypočtené hodnoty síly působící na kotvu při pětinasobku proudu a nastavení zkratové spouště na minimum.....	28
Tabulka 3: Vypočtené hodnoty síly působící na kotvu při desetinásobku proudu a nastavení zkratové spouště na maximum.....	28
Tabulka 4: Změřené hodnoty odporů proudové dráhy jednotlivých konceptů	30
Tabulka 5: vypočtené Jouleovy ztráty z naměřených odporů proudové dráhy.....	30
Tabulka 6: Změřené vypínací časy standardního provedení.....	31
Tabulka 7: Změřené vypínací časy konceptu 1.....	31
Tabulka 8: Změřené vypínací časy konceptu 2.....	32
Tabulka 9: Změřené vypínací časy konceptu 3.....	32
Tabulka 10: Změřené hodnoty teplot a průhybů standardního provedení.....	34
Tabulka 11: Změřené hodnoty teplot a průhybů konceptu 1.....	35
Tabulka 12: Změřené hodnoty teplot a průhybů konceptu 2.....	35
Tabulka 13: Změřené hodnoty teplot a průhybů konceptu 3.....	35
Tabulka 14: Přehled změřených a vypočtených průhybů.....	36
Tabulka 15: Změřené vybavovací doby jednotlivých konceptů.....	37
Tabulka 16: Vyjádření dynamiky pomocí zpoždění střadače.....	37

1 ÚVOD

Jistič je zařízení, o kterém má hlubší povědomí málo lidí. Ještě méně lidí dokáže jistič správně funkčně popsat. Avšak toto nenápadné zařízení je neodmyslitelnou součástí našeho života. Jistič jako prvek určený k ochraně osob, zvířat a majetku před škodlivými účinky elektrického proudu je velmi důležitý, ať už ho lidé znají či nikoliv [1].

Z výše uvedeného je na jistič jako bezpečnostní zařízení brán bedlivý zřetel. Ať už jde o jeho konstrukci, jež musí vyhovovat náročným normám a předpisům, tak i jeho správné umístění v jistěném obvodu, což klade velký důraz na práci projektanta. S tímto vším souvisí správná funkce jističe, tedy zareagovat správně na daný nadproud. Správná funkce jističe, tedy vyhodnocení nežádoucího stavu v obvodu za pomoci tzv. nadproudové spouště, je neodmyslitelnou součástí jištění elektrických obvodů.

Tato práce se zabývá právě zmíněnou nadproudovou spouští jističe o velikosti jmenovitého proudu 250 A, který byl vyvinut a je vyráběn společností OEZ Letohrad. Pozornost je soustředěna na její konstrukci, analýzu vhodným simulačním programem a praktickém ověření návrhu pomocí měření ve zkušebních laboratořích firmy OEZ. Z těchto získaných poznatků je následně předložen návrh na optimalizaci nadproudové spouště jističe.

2 JISTIČ

Jistič, jak již bylo řečeno, je elektrický přístroj, bez něhož si již nedovedeme představit distribuci elektrické energie. Proto bude v této kapitole jistič popsán včetně jednotlivých hlavních funkčních celků a jejich funkcích.

2.1 Funkce jističe nízkého napětí

Jistič, jako přístroj s funkcí jištění elektrického obvodu a následně i jako přístroj určený k vypínání proudu tekoucího v tomto daném elektrickém obvodu, je tedy důležitým prvkem v oblasti distribuce elektrické energie v oblastech nízkého napětí [2] [3] [4].

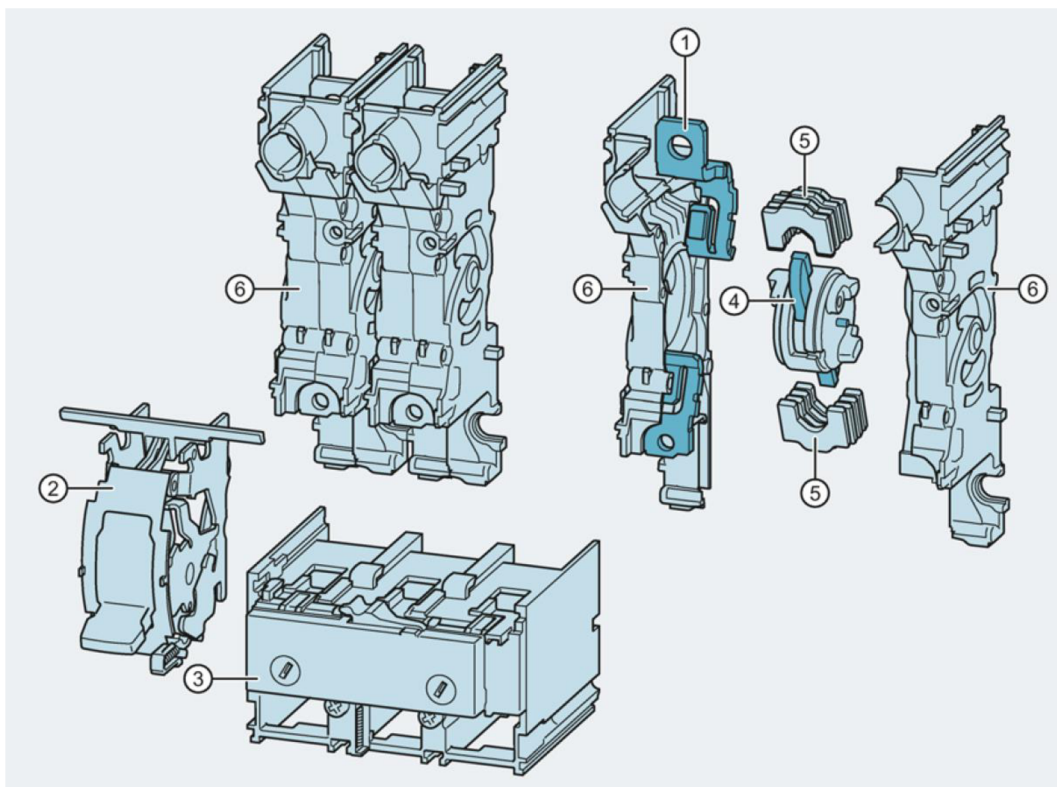
Jistič má v běžném provedení více funkcí integrovaných do jednoho zařízení. Jedná se v první řadě o funkci jistící a ochranou, tedy o funkci, jež zabezpečuje bezpečný chod jištěných zařízení v elektrickém obvodu. Toho se dosahuje správným konstrukčním provedením jednotlivých částí, kdy jistič s určitými parametry je schopen správně zareagovat a vypnout nežádoucí hodnoty proudu a tím ochránit zařízení v jištěném obvodu. Zde je nutné upozornit na fakt, že jistič, jak již z názvu vypovídá, slouží k jištění elektrického obvodu a jeho zařízení, neslouží tedy primárně k ochraně osob. Pro tyto účely je určena kombinace jističe s proudovým chráničem [2] [3] [4].

Druhou funkcí je funkce vypínací, jež úzce souvisí s funkcí jistící. Aby mohl být obvod v případě potřeby správně jištěn, musí být samočinně, a hlavně úspěšně vypnut. S tím souvisí i další funkce, která již není primární, a to je funkce spínací, tedy možnost občas zapínat a vypínat obvod pod zatížením. Je zde však třeba připomenout, že jistič neslouží k trvalému nebo častému spínání (pro tyto účely je vhodnějším zařízením stykač), ale pro potřebu občasného spínání je možné jej použít [3].

2.2 Popis jednotlivých částí jističe

Aby bylo dosaženo správné a bezproblémové funkce, je jistič složen z několika částí, které mají za úkol zabezpečit danou část v procesu jištění elektrického obvodu. Na *obrázku 1* [3] jsou zobrazeny všechny hlavní části jističe, tedy:

- 1, 4, 5, 6 – kontaktní systém
- 2 – spínací systém
- 3 – termomagnetická spoušť



Obrázek 1: Jednotlivé části jističe s termomagnetickou spouští [3]

2.2.1 Kontaktní systém a zhášení

Při vypínání elektrického obvodu nízkého napětí o dostatečném proudu (tedy dostatečné energii nahromaděné v obvodu) dochází při rozpojování kontaktů ke vzniku oblouku [5].

Oblouk jako vysokoenergetický fyzikální jev, kde střed oblouku je čistým plazmatem, klade na konstrukci celého kontaktního a zhášecího systému vysoké nároky. Jsou to hlavně nároky jak na materiály samotných kontaktů a zhášecích komor, tak i pevnost celého systému vůči silovým a tlakovým účinkům od procházejícího proudu a oblouku. Pro konkrétní představu lze uvést, že jako materiály na výrobu kontaktů se používají různé kompozitní materiály z wolframu a stříbra [3] [5].

Zjednodušeně lze říci, že kontaktní systém se skládá z pevných částí kontaktů (číslo 1) a k nim odpovídajícím pohyblivým kontaktům (číslo 4). V této oblasti se začínají prosazovat zde zobrazené rotorové kontaktní systémy s lepšími vypínacími schopnostmi, avšak i vyššími nároky na konstrukci a přesnost výroby těchto systémů. Ke kontaktnímu systému těsně náleží i zhášecí systém. Ten je tvořen zhášecími plechy (číslo 5), které díky svým magnetickým vlastnostem dokáží prodloužit délku oblouku, zvýšit úbytky napětí na oblouku a chlazením účinně pomoci daný oblouk uhasit. Celé tyto dva systémy jsou spolu spojeny tzv.

pólovou kazetou (číslo 6), jež musí odolat tlakovým a silovým účinkům působícím při vypínání zkratu [3] [4] [5].

2.2.2 Spínací systém

Spínací systém kompaktního jističe (*obrázek 1* – číslo 2) slouží k obsluze jističe a jako akumulátor energie, která posléze slouží k vypnutí jističe ve spolupráci s kontaktním a zhášecím systémem [3] [4] [5].

Za jeho pomoci je jistič zapínán do stavu, kdy vede elektrický proud. Při tomto zapínání jističe do sepnuté polohy jsou nataženy vypínací pružiny, v nichž je akumulována energie, která je následně použita pro jeho vypnutí v případě pokynu od nadproudové spouště. Zapnutí jističe, respektive maximální natažení vypínacích pružin se děje postupně ve dvou krocích. Nejprve jsou z polohy vybaveno (TRIP), kde jsou ve stavu prakticky o volné délce, nataženy do pozice OFF. V této pozici je jistič stále rozpojen, dochází však k opětovnému natažení střadače nadproudové spouště a před natažením pružin. Až teprve natažením do pozice ON jsou pružiny maximálně nataženy a jistič je sepnut [3] [4] [5].

Pomocí systému, respektive jeho páky, je možné ovládat jistič manuálně, a to buď přímo rukou či pomocí ruční mechanické převodovky k snadnější manipulaci s jističem, který má vyšší ovládací síly. Je možné použít i různé druhy strojního ovládní (například motorové a střadačové pohony), kterými lze bezpečně jistič ovládat dálkově bez nutnosti přítomnosti obsluhy [3] [4] [5].

2.2.3 Spoušť

Z pohledu této práce je tou nejdůležitější z hlavních částí jističe spoušť. Jedná se o takovou část přístroje, která zabezpečuje správné vyhodnocení a jemu odpovídající reakci na procházející proud. Je tedy extrémně důležité, aby tato část kompaktního jističe byla správně navržena, zkonstruována a vyrobena. Její správná funkce, tedy převod informace o elektrickém proudu na mechanický pohyb, jež zaručí vybavení jističe, je nedílnou součástí návrhu jističe. Na *obrázku 1* pod číslem 3 je vidět vnější část termomagnetické spouště, její velikost a umístění v celém jističi [3] [4] [5].

Jak z předešlého odstavce a jeho názvu vyplývá, spoušť je vlastně akčním členem jističe, který zahajuje sled událostí vedoucích k vypnutí elektrického obvodu. Z tohoto důvodu budou v následující kapitole rozebrány jednotlivé obecně používané principy těchto akčních členů – spouští. Hlavní důraz bude kladen na tzv. termomagnetickou spoušť, jež je v této práci podrobena analýze.

3 AKČNÍ ČLENY JISTIČE

V této kapitole bude podrobně vysvětleno použití a konstrukce akčních členů (spouští) s hlavním zaměřením na termomagnetickou spoušť kompaktního jističe o velikosti jmenovitého proudu 250 A.

3.1 Obecná funkce akčního členu

Akční člen neboli spoušť kompaktního jističe zajišťuje důležitou funkci. To je vyhodnocení a samočinná reakce na průchod proudu o dané velikosti. Samočinnou reakcí je míněno vyvolání akce od působení elektrického proudu na volnoběžku ve spínacím systému jističe. Základní působení proudu je dvojího typu: tepelné a silové. Tyto účinky proudu zapříčiňují s pomocí převodu ve spoušti vybavení volnoběžky systému a posléze vybavení jističe a následné vypnutí jištěného obvodu [2] [3] [4] [5].

Používané principy spouště lze rozdělit:

- Hydraulická spoušť (katarakt)
- Elektronická spoušť
- Termomagnetická spoušť

3.2 Katarakt

Starší spouště v jističích nízkého napětí využívají tzv. katarakt. Jedná se vlastně o princip elektromagnetické spouště s hydraulickým zpožděním pomocí olejové lázně.

Princip vypínání zkratu (vysoké hodnoty nadproudu) je založen na jednoduchém elektromagnetu. Válcovou cívku protéká vypínaný proud. Jeho průchodem vzniká silné elektromagnetické pole, pomocí něhož dochází k okamžitému přitažení kotvy. Přitažením pákové kotvy k jádru elektromagnetu dochází k vypnutí jističe [2] [3] [6].

Při vypínání přetížení (malé hodnoty nadproudu) je však energie vzniklého pole malá a přes vzduchovou mezeru nedojde k přitažení kotvy. Pro tento případ je válcové jádro uloženo jako píst v mosazném válci, kolem kterého se nachází výše zmíněná válcová cívka. Mosazný válec s těsným jádrem je vyplněn silikonovým olejem. Působením procházejícího proudu je jádro přitahováno dovnitř cívky, ale současně je brzděno olejem a vymezení pružinou. Při dostatečné době trvání přetížení se jádro dostane do horní mezní polohy, kde je vzduchová mezera natolik zmenšená, že je působením pole kotva okamžitě přitažena. Potom co přestane nadproud působit, je jádro vráceno do počáteční polohy vymezení pružinou [2] [3] [6].

Výhody kataraktu je teplotní nezávislost na okolní teplotě díky použití silikonového oleje, avšak za cenu složitější a dražší konstrukce. Proto je v dnešní době katarakt nahrazen termomagnetickou či elektronickou spouští. Je však stále využíván na některých trzích Severní Ameriky a Spojeného království.

3.3 Elektronická spoušť

Elektronická spoušť neboli Electronic Trip Unit (ETU) je nejvíce sofistikovaná forma spouště jističe. Její hlavní výhodou je spojení funkce vyhodnocování procházejícího proudu jističem s možností nezávislého měření veličin jištěného obvodu a kompletně elektronické modelování vypínací charakteristiky. Nevýhodou je samozřejmě vyšší cena, než u klasické termomagnetické spouště a dále také použití pouze ve střídavých obvodech [3] [4].

3.3.1 Princip funkce

Základní funkcí je stále vyhodnocování jištěného střídavého obvodu, tedy měření střídavého proudu v každé fázi. Měřit střídavý proud lze proudovým transformátorem nebo Rogowského cívkou. Změřené hodnoty jsou pomocí A/D převodníku zpracovávány v mikropočítači, který vyhodnocuje, zda změřený proud nepřekročil nastavenou hodnotu proudu. Pokud se tak stane po dostatečně dlouhou dobu, dojde k vyslání impulsu do vypínacího relé, které zapůsobí mechanickým impulsem na spínací systém, a následnému vypnutí jističe. Aby toto bylo možné je mikropočítač spolu s A/D převodníkem napájen pomocí proudových transformátorů s feromagnetickým jádrem [3] [4] [7].

Elektronická spoušť může sloužit ke sběru dat o jištěném obvodu na datovou sběrnici (časté použití USB konektorů). Díky tomu lze provádět dlouhodobé měření, případně dálkovou kontrolu nad jističem za pomoci vhodného příslušenství [3] [4].

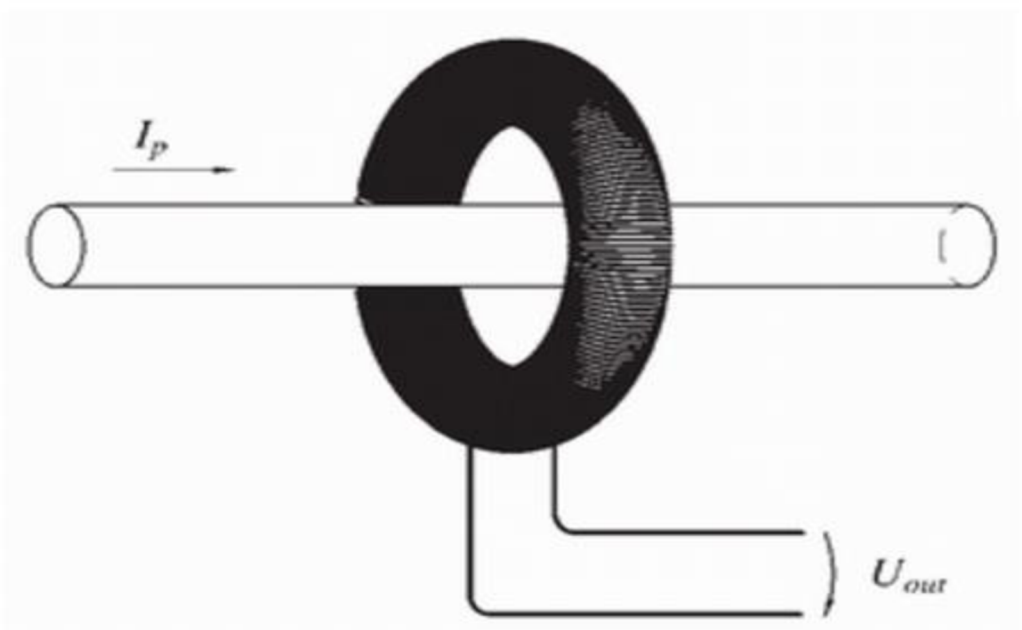
S řídicím mikropočítačem je spojena další výhoda. Tou je modelování charakteristiky jističe. Pomocí zadávacího panelu či externě přes USB konektor lze modelovat vypínací charakteristiku daného jističe dle požadavků na selektivitu jištění či konkrétní aplikace použití jističe.

3.3.2 Rogowského cívka

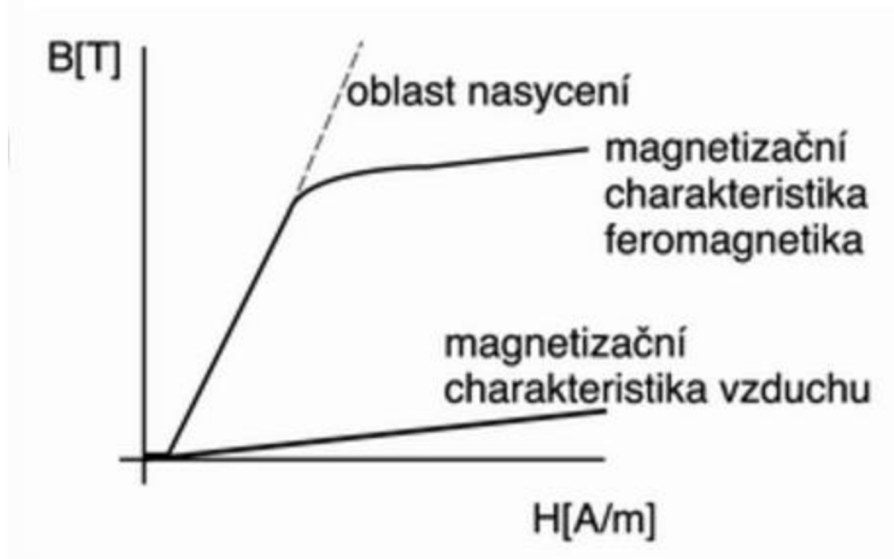
Rogowského cívka je v elektronické spoušti jističe použita jako velmi přesný prvek pro měření střídavého proudu. Princip měření Rogowského cívkou je znázorněn na *obrázku 2* [8]. Jedná se vlastně o vzduchový transformátor bez feromagnetika, tedy toroidní cívku kolem měřeného vodiče. Procházející střídavý proud v měřeném vodiči tvoří ve svém okolí střídavé magnetické pole, které indukuje

v měřící Rogowského cívce napětí úměrné hodnotě střídavého magnetického toku, resp. procházejícího proudu [7] [8] [9].

Oproti dříve používaným proudovým transformátorům s feromagnetickým jádrem se Rogowského cívka vyznačuje lineární magnetizační charakteristikou. Srovnání magnetizačních charakteristik je na *obrázku 3* [8]. To je její velká výhoda proti proudovým transformátorům. Naopak jako nevýhodu lze brát nutnost použití A/D převodníku, jež měřený signál (napětí) elektronicky integruje na frekvenčně nezávislý výstup z převodníku, který přesně odpovídá procházejícímu proudu. S použitím vhodných integrátorů lze dosáhnout velmi vysokého měřícího rozsahu od několika *mA* až po tisíce *kA* [7] [8] [9].



Obrázek 2: Princip funkce Rogowského cívky [8]



Obrázek 3: Porovnání Rogowského cívky s proudovým transformátorem [8]

3.4 Termomagnetická spoušť jističe 250 A

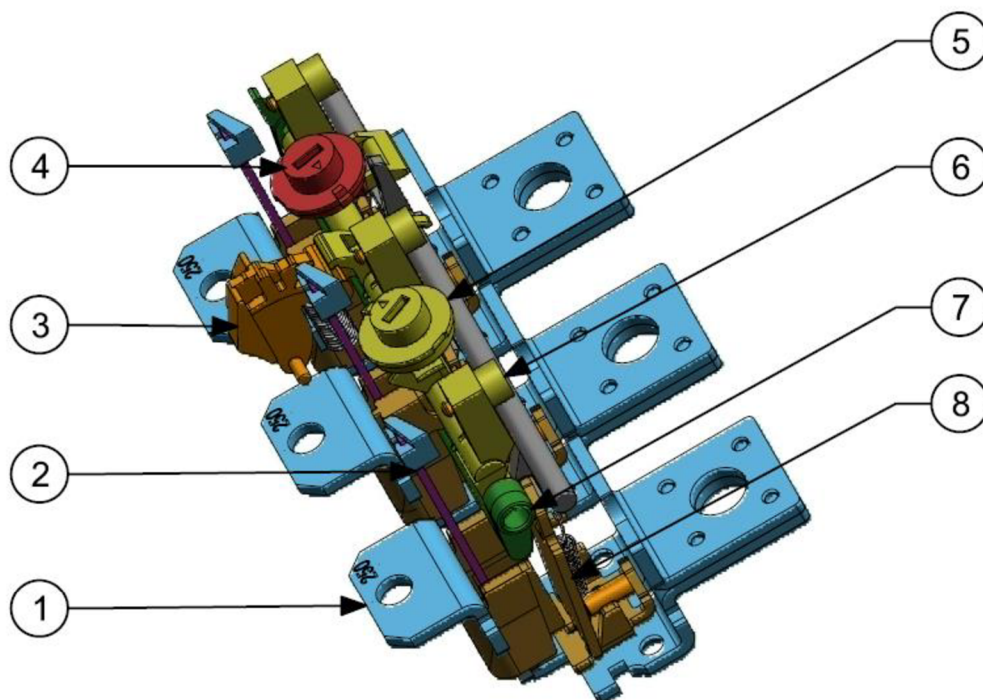
Termomagnetická spoušť je část jističe, jenž reaguje na účinky proudu a vysílá mechanický impuls dále ke spínacímu systému. Termomagnetická spoušť je taková nadproudová spoušť, která dokáže zareagovat mechanicky na oteplení způsobené přetížením nebo silové účinky zkratového proudu. Dále bude vysvětlen princip termomagnetické spouště a její stěžejní části.

3.4.1 Popis jednotlivých částí termomagnetické spouště

Jak je patrné z modelu termomagnetické spouště na *obrázku 4*, dá se spoušť rozdělit na 8 hlavních částí.

- 1) *Proudová dráha* - tvořena z měděného pásu s postříbřeným povrchem. Její tvar je odvislý od způsobu zasazení do krytu spouště a umístění bimetalu. Nejužší místo je tedy u bimetalu, kde dochází k jeho nepřímému ohřevu. Její funkce spočívá ve vedení proudu od přívodních kabelů přes celou spoušť až ke zhášecímu systému jističe a ohřevu bimetalu.
- 2) *Bimetal* - zde v provedení ze dvou různých kompozitních materiálů a vnitřního měděného pásu, který zlepšuje rychlost ohřevu, a tím i průhyb bimetalu nepřímo ohřivaného od proudové dráhy.

- 3) *Střadač* – systém otáčivého plastového dílce s pružinou sloužící k vyslání impulsu na spínací systém. Toho je dosaženo nastřádanou energií v pružině, která je hlavní vybavovací hřídelí uvolněna. Různými výrobci je střadač řešen různými způsoby (otáčivý, lineární pohyb), ale vždy s řešením uložení mechanické energie (nejčastěji pružinou).
- 4) *Nastavení zkratové (elektromagnetické) spouště* – otáčením plastového nastavovacího dílce dochází k převodu otáčivého pohybu na přímočarý, který je zastoupený přiblížením kotvy směrem ke jhu elektromagnetu. Takto nastavená vzdálenost určuje hodnotu zkratového proudu, který jistič prakticky okamžitě (v jednotkách *ms*) vypíná.
- 5) *Nastavení tepelné spouště* – otáčení plastového kotouče je převedeno na lineární pohyb, tentokrát hlavní vybavovací hřídele, kdy posunem vůči bimetalu dochází k nastavování hodnoty jmenovitého proudu a tím i modelování vypínací charakteristiky při přetížení.
- 6) *Hlavní vybavovací hřídel* – slouží k uvolnění střadače. Při vybavení tepelné spouště, tedy ohybem bimetalu, dojde k pootočení této hřídele a uvolnění pružiny střadače, který následně dává pokyn k reakci systému. Taktéž se děje při vypínání zkratu, kdy ale namísto bimetalu otáčí hlavní hřídelí pohybující se kotva elektromagnetu.
- 7) *Zkratová signalizační hřídel* – při vypínání zkratového proudu a pohybu kotvy elektromagnetu dochází kromě otáčení hlavní vybavovací hřídele i k pohybu zkratové signalizační hřídele, jenž slouží jako indikace, zda došlo k vypnutí jističe z důvodu zkratu.
- 8) *Kotva zkratové spouště* – kovová kotva elektromagnetu je při nadproudu za působení elektromagnetické síly přitahována ke jhu. Aby k tomuto přitažení docházelo pouze při vyšších nadproudech (tj. zkratech), je tomu uzpůsobena její vzdálenost od jha a síla použité pružiny, jež kotvu přidrží ve výchozí pozici. Právě hodnota vypínaného zkratového proudu (neboli násobku jmenovitého proudu) lze pomocí kombinace vzdálenosti od jha a velikosti pružiny měnit.



Obrázek 4: Termomagnetická spoušť jističe a její části

3.4.2 Princip funkce

Funkcí elektromagnetické spouště je reagovat na procházející nadproud a vyslat signál k vybavení jističe. Nadproud lze rozdělit na dva druhy: přetížení a zkrat.

Přetížení je malý násobek proudu, který prochází jističem. Z tohoto důvodu se využívají tepelné účinky procházejícího proudu. Jeho průchod způsobuje ohřev bimetalu, který se díky optimálnímu nastavení působením tepla ohne a pootočením hlavní vybavovací hřídelí dojde k vybavení jističe. Tento proces je časově delší a z toho důvodu je množství předaného tepla bimetalu a vypínací charakteristika exponenciálně závislé na velikosti nadproudu. Dle daných norem ČSN 60947 – 1 a ČSN 60947 – 2 nesmí jistič (potažmo tepelná spoušť jističe) do 2 hodin vybavit 1,05 násobek jmenovitého proudu a zároveň musí do 2 hodin vybavit 1,3 násobek jmenovitého proudu. Zkoušení dle normy a vliv okolní teploty je tedy nutné mít stále na paměti při konstrukci tepelné části spouště [3] [4] [5].

Druhým nadproudem je zkrat, což je nadproud o vyšších násobcích jmenovitého proudu. Je tedy v jištěném obvodu nežádoucí a nebezpečný, proto je kladen důraz na jeho rychlé vypnutí. To by nebylo pomocí bimetalu možné splnit, jelikož z důvodu jeho tepelné kapacity by k vybavení došlo až za delší čas. Z tohoto důvodu je ve spoušti jednoduchý elektromagnet, který vlivem procházejícího zkratového proudu vyvolá silové působení mezi kotvou a jhem elektromagnetu. To

způsobí přitažení kotvy, která při pohybu směrem ke jhu otočí hlavní vybavovací hřídelí spouště a následně dojde k vybavení jističe [3][4] [5].

Mezi výhody termomagnetické spouště patří možnost reagovat na střídavý i stejnosměrný procházející proud a nižší cena oproti elektronické spoušti. Naopak nevýhoda je možnost nastavování (modelování) vypínací charakteristiky pouze ve dvou bodech.

4 ZÁKLADNÍ POZNATKY Z TEORIE ELEKTROMAGNETISMU

Při uvažování nadproudové termomagnetické spouště jako akčním členem využívajícím různé elektromagnetické jevy se tato kapitola bude zabývat právě několika oblastmi z teorie elektromagnetismu, které by měly objasnit základní fyzikální principy fungování spouště.

4.1 Pole ustálených proudů

Pojem pole ustálených proudů značí pole nábojů, které se pohybují ve vodiči konstantní rychlostí. Pohyb těchto nábojů vytváří elektrický proud. Vzhledem k principům spouště je podstatný tzv. kondukční proud, tedy proud, který je tvořen pohybem elektronů [10].

Dle [10] je proud I definován jako množství náboje Q , který prochází danou plochou S za určitý čas t .

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad [A] \quad (4.1-1)$$

Pokud takto definovaný proud prochází vodičem o daném průřezu S , vytváří ve vodiči vektor hustoty proudu. Vektor hustoty proudu je dán vztahem (4.1-2) [10], kde ρ značí objemovou hustotu náboje a vektor \vec{v} představuje střední postupnou rychlost chaoticky se pohybujících elektronů ve vodiči. Jeho směr je dán znaménkem náboje pohybujících se částic a směrem vektoru rychlosti těchto částic [10].

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{v} \quad [A/m^2] \quad (4.1-2)$$

Díky výše uvedenému poli vektoru proudové hustoty ve vodiči, lze při známém průřezu S vyjádřit tekoucí proud I dle vztahu (4.1-3) [10].

$$I = \int_S \vec{j} \cdot \vec{dS} \quad [A] \quad (4.1-3)$$

Pohyb volných elektronů, které následně, jak již bylo výše popsáno, vytváří elektrický proud o vektoru proudové hustoty J , je dán působením elektrického pole. Díky tomuto pohybu se elektrony uvnitř vodiče nehromadí na jednom místě a

nevytvářejí tak další dodatečné pole, jelikož toto nově vzniklé pole by opět vedlo k jejich pohybu. Vnitřek vodiče se tak jeví jako elektricky neutrální. Při uvažování tohoto jevu dospíváme tedy k jasně definované podmínce dle rovnice (4.1-4) v integrálním tvaru. Rovnice (4.1-5) ukazuje diferenciální tvar této podmínky [10].

$$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (4.1-4)$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0 \quad (4.1-5)$$

Výše uvedená hustota proudu je obecně závislá na více fyzikálních parametrech. Při uvažování proudové hustoty u kovů lze uvažovat prakticky pouze lineární závislost na intenzitě elektrického pole E dle vztahu (4.1-6) [10].

$$\vec{j} = \gamma \cdot \vec{E} \quad [\text{A/m}^2] \quad (4.1-6)$$

Uvedená lineární závislost je dána konstantou γ [S/m], která představuje konduktivitu prostředí a je obrácenou hodnotou rezistivity daného materiálu [10].

Při uvažování nevírového pole u pole ustáleného proudu, tedy nulové rotaci intenzity elektrického pole dle vztahu (4.1-7) [10], lze zavést skalární potenciál E podle rovnice (4.1-8), který splňuje rovnici (4.1-9) [10].

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 \quad (4.1-7)$$

$$E = -\operatorname{grad} \phi \quad [\text{V}] \quad (4.1-8)$$

$$\operatorname{div} \gamma \operatorname{grad} \phi = 0 \quad (4.1-9)$$

Právě tato rovnice (4.1-9) je základní rovnicí pro výpočty v programu FLUX, kde se díky výpočtům potenciálu ϕ zpětně dopočítává intenzita elektrického pole E , z které lze posléze pomocí vztahu (4.1-6) vypočítat hledanou proudovou hustotu.

Tímto vyjádřením proudové hustoty dle rovnice (4.1-6) pro pole ustálených proudů se dostáváme k práci a výkonu v proudovém poli.

Při průchodu daným vodičem pole koná práci přemístěním náboje z jednoho potenciálu na místo o druhém potenciálu. Jelikož je rozdíl potenciálů roven napětí U , lze pro vykonanou práci psát vztah (4.1-10) [10].

$$dA = dQ \cdot U \quad (4.1-10)$$

Pro pole ustálených proudů platí, že náboj je roven $dQ = I \, dt$. Pokud dosadíme do rovnice (4.1-10) a uvažujeme nezávislost součinu proudu a napětí na čase, lze výsledný vztah pro celkovou práci za celkový čas t definovat vztahem (4.1-11) [10].

$$A = I \cdot U \cdot t \quad [J] \quad (4.1-11)$$

Podle [10]: „Průchod proudu vodičem je doprovázen ztrátami způsobenými přeměnou energie v teplo.“ Z toho plyne, že výše vypočítaná práce, kterou dodá zdroj napětí či proudu má vliv na výkon proudu, který je přeměněný na teplo podle vztahu (4.1-12) [10].

$$P_{ztr} = \frac{dA}{dt} = I \cdot U = \int_V p_z \cdot dV \quad [W] \quad (4.1-12)$$

Kde p_z je objemová hustota těchto ztrát a při uvažování vodivého prostředí je její velikost dána vztahem (4.1-13) [10].

$$p_z = \frac{dP}{dV} = \frac{dU \cdot dl}{dl \cdot dS} = \vec{E} \cdot \vec{J} = \gamma \cdot E^2 = \frac{J^2}{\gamma} \quad (4.1-11)$$

4.2 Stacionární magnetické pole

Předcházející část popisovala fyzikální jevy, které se odehrávají na proudové dráze spouště v důsledku průchodu ustáleného proudu. Nyní se zaměříme na vzniklé magnetické pole od tohoto proudu. Díky ustálenému proudu se bude jednat o magnetické pole stacionární.

Právě toto stacionární magnetické pole stojí za silovým namáháním proudových drah termomagnetické spouště při procházejícím proudu. Jedná se o tzv. silové namáhání vodiče protékaného proudem. Výpočet silového působení na vodič protékaný proudem je dán vztahem (4.2-1) [10].

$$F(r) = I \cdot \oint_l \overrightarrow{dl(r)} \cdot \overrightarrow{B(r)} \quad (4.2-1)$$

Kde r je polohový modul a B je vektor magnetické indukce s jejíž pomocí lze dle výše uvedeného vztahu vypočítat silové působení na vodič protékaný proudem. Výpočet magnetické indukce ve stacionárním poli je dán Biot-Savartovým zákonem [10].

$$\overrightarrow{B(r)} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \oint_l \frac{\overrightarrow{dl(r)} \times \overrightarrow{R(r)}}{R^3(r)} \quad (4.2-2)$$

R značí rozdíl polohových vektorů r .

4.3 Teorie elektromagnetu

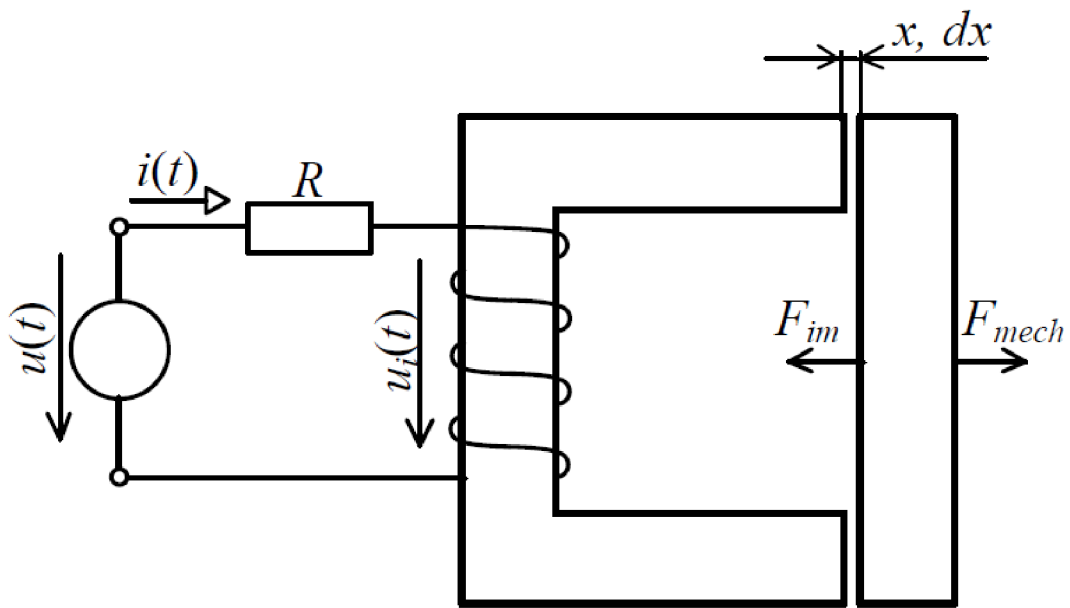
Poslední část z teorie elektromagnetismu, která se přímo týká termomagnetické spouště se týká samotného elektromagnetu, který je použit ve spoušti jako rychlý akční člen pro reakci na zkratové proudy.

Obecně lze silové působení na element vodiče dáno výše uvedenými vztahy [10].

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B} = \vec{j} \times \vec{B} \cdot dV \quad [\text{N}] \quad (4.3-1)$$

Ovšem tyto vztahy lze použít pouze pokud známe indukci v místě proudové dráhy. Pokud se nachází v okolí proudové dráhy magnetiku, je výpočet indukce složitý. Takováto situace nastává i v termomagnetické spoušti jističe. Proto lze v těchto případech stanovit magnetickou energii v závislosti na geometrických rozměrech a obecných souřadnicích [10] [11].

Pro ilustraci těchto zjednodušených výpočtů uvažujme jednoduchý elektromagnet dle obrázku 5 [11], na kterém je elektromagnet svojí geometrií odpovídající elektromagnetu použitému ve spoušti.



Obrázek 5: Elektromagnetická soustava s jednou budící cívkou a proměnnou vzduchovou mezerou [11]

Tomuto obrázku lze podle II. Kirchhoffova zákona napsat rovnici (4.3-2) pro elektrickou část.

$$u = R \cdot i + u_i = R \cdot i + \frac{d\Psi}{dt} \quad (4.3-2)$$

Kde u_i je indukované napětí na cívce a dle [11] je dáno derivací spřaženého magnetického toku podle času. Dále uvažujme ideální bezztrátovou soustavu a s pomocí zákona zachování energie lze podle [11] odvodit výsledný vztah (4.3-3) pro magnetickou sílu [11].

$$F_{im} = - \left(\frac{dW_m}{dx} \right)_{\Psi=konst} \quad (4.3-3)$$

Výpočet síly pomocí tohoto vztahu platí za předpokladu konstantního spřaženého magnetického toku, což je při zanedbání ztrát splněno. Pro výpočet magnetické energie lze s výhodou užít známý vztah (4.3-4), který je platný pro lineární soustavy, což elektromagnet ve spoušti splňuje [11].

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \quad (4.3-4)$$

Z [9] [10] a [11] vyplývá vztah pro indukčnost L (4.3-5) a magnetický odpor R_m neboli reluktanci (4.3-6).

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (4.3-5)$$

$$R_m = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{x}{S_{Fe}} \quad (4.3-6)$$

Uvažujeme pouze velikost magnetického odporu vzduchové mezery o velikosti x , jelikož složka celkového magnetického odporu, kterou tvoří feromagnetikum je díky vysoké relativní permeabilitě prakticky zanedbatelná [9] [10] [11].

Dosazením do rovnice (4.3-3) a derivováním podle délky vzduchové mezery x dostáváme výsledný vztah pro výpočet elektromagnetické síly (4.3-7) [10].

$$F_{im} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot i^2 \cdot S_{Fe}}{x^2 \cdot k_r} \quad [\text{N}] \quad (4.3-7)$$

Proměnné S_{Fe} a k_r reprezentují aktivní plochu feromagnetika a koeficient rozptylu, který zastupuje ztrátový magnetický tok vlivem rozptylu toku do okolí. Znaménko mínus značí směr síly, který je ve směru zmenšování hodnoty x [10] [11].

Výše popsaným odvozením jsme dospěli ke vztahu (4.3-7), který popisuje výslednou sílu vyvolanou elektromagnetem působením procházejícího proudu. Avšak na celkovou dynamickou analýzu chování elektromagnetu je třeba započítat do silového působení i ztráty. Proto při respektování ztrát a vnějšího silového působení je dán vztah (4.3-8), který vyjadřuje rovnováhu sil elektromagnetu [11].

$$\vec{F}_{im} = \vec{F}_p + \vec{F}_T + \vec{F}_G + \vec{F}_o \quad (4.3-8)$$

Kde jednotlivé síly popořadě vyjadřují sílu od pružiny F_p vyjádřenou její tuhostí K , třecí sílu F_T charakterizovanou koeficientem T , sílu danou zrychlením F_G pomocí hmotnosti pohybující se kotvy G a silové působení vnější mechanické síly F_o . Z těchto jednotlivých sil lze napsat výslednou rovnici (4.3-9) [11].

$$F_{im} = K \cdot (x - x_0) + T \cdot \frac{dx}{dt} + G \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + F_o \quad (4.3-9)$$

Je třeba také dodat, že jelikož se pohyb kotvy vzhledem ke jhu elektromagnetu ve spoušti realizuje jako pohyb otáčivý, lze v mnoha případech použít namísto rovnice (4.3-8) a (4.3-9) užít rovnováhu momentů namísto sil. Jelikož je moment dán součinem působící síly a ramena r , je vyjádření momentů pouze přepočítáním daných silových rovnic, které působí na kotvu. Velikost ramena r je dána vzdáleností od středu otáčení kotvy k bodu, kde daná síla na kotvu působí.

5 VÝPOČETNÍ POSTUPY PRO ANALÝZU SPOUŠTĚ

Pro potřeby analýzy termomagnetické spouště jističe jsou v zásadě využívány dvě cesty. Tou první je analýza pomocí vhodného výpočtového programu využívajícího např. metodu konečných prvků (MKP). V dalším stupni vývoje se přistupuje k ověření předpokládaných parametrů pomocí měření na reálných prototypech či výrobcích. Z těchto důvodů bude kapitola a tato práce věnována použití výpočtových programů a reálného měření [12] [13].

5.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) taktéž známá pod anglickým názvem Finite Element Method (FEM) je výpočtová metoda užívaná mnohými moderními počítačovými programy k simulaci a zobrazení fyzikálních veličin ve sledovaných objektech [12] [13] [14].

Principem metody konečných prvků je rozložení zkoumaného objektu na konečný počet prvků (diskretizace), například trojúhelníková síť na zkoumaném povrchu. Přesné řešení problému se aproximuje pomocí známých bázových funkcí a hodnot v uzlech prvků. Řešení soustav diferenciálních rovnic se tak převede na řešení soustav obecně nelineárních algebraických rovnic. Uzly tvoří vrcholy prvků, přičemž vytvořená síť je hustší a složená z menších částí v místech zájmu [12] [13] [14].

Diferenciální rovnice popisují zkoumané fyzikální prostředí či vlastnosti objektu. Aby bylo možné soustavy diferenciálních rovnic vyřešit, je potřeba vhodně zvolit okrajové, případně i počáteční, podmínky charakterizující zkoumaný problém či zjednodušit řešení [12] [13] [14].

Řešení a výpočty v různých technických oblastech (mechanické deformace, elektromagnetismus, proudění kapalin atd.) pomocí metody konečných prvků se začaly objevovat zhruba posledních několik desetiletí s nástupem počítačové techniky. Průkopníkem v této oblasti byl americký software NASTRAN užitý NASA v šedesátých letech. Jeho využití v kosmickém programu se postupem času přeneslo prakticky do všech odvětví průmyslu a MKP je dnes využívána mnohým softwarem pro vývoj výrobků a zařízení. S rozšířením použití výpočtových programů na bázi MKP bylo možné zkrátit, zefektivnit a zlevnit dobu vývoje díky možnosti výpočtu a zobrazení různých fyzikálních veličin a kritických míst objektů před realizací nákladných prototypových součástí [12] [13] [14].

5.2 Výpočtové programy

Z důvodu tepelných a elektromagnetických principů využívaných v termomagnetické spoušti jističe je jedním z vhodných programů řešících elektromagnetismus a teplo pomocí MKP program FLUX od společnosti ALTAIR. Tento program je využíván společností OEZ k vývoji v oblasti jisticí a chránící techniky.

S pomocí tohoto programu lze vytvořenou geometrii zkoumaného objektu podrobit, v závislosti na počtu zakoupených modulů, elektromagnetické 2D a 3D analýze nebo kompletní tepelné simulaci. Pro účely této práce je využíván pouze dostupný 3D modul řešící elektromagnetické problémy.

5.3 Měření

Je nejpřesnějším způsobem získávání informací o zkoumaném objektu. S jeho pomocí lze přesně určit jednotlivé hodnoty fyzikálních veličin na různých částech zkoumaného objektu. Některé veličiny, například teploty na bimetalu spouště, průhyb, rychlost pohybu kotvy atd. lze ověřit jednoduše. Avšak jiné jsou k určení složitější a je potřeba je dopočítávat. Ve složitějších případech, zejména elektromagnetické jevy, jako je například zobrazení elektromagnetické indukce na elektromagnetu, je k určení rozložení pole lepší způsob využití vhodného výpočtového programu.

Zjednodušeně lze říci, že měření slouží k ověření správnosti a funkčnosti realizovaného konstruktérského návrhu. Díky němu lze také zjistit rozdíly mezi použitou simulací fyzikálního jevu a skutečným stavem. Z výsledného rozdílu je možné vyhodnotit přesnost počítačových simulací a výpočtů. Při znalosti této přesnosti je možné více vývojové činnosti zefektivnit a značnou část vývoje provést ještě před začátkem výroby prototypů.

6 3D MODEL SPOUŠTĚ JISTIČE

Pro elektromagnetickou analýzu termomagnetické spouště jističe v simulačním programu FLUX využívajícím metodu konečných prvků je důležité připravit 3D model, který je vhodný k provedení analýzy.

6.1 Postup při vytváření modelu spouště

Ve fázi přípravy modelu spouště, který je určený k importu do simulačního programu, je důležité připravit vhodnou geometrii spouště. Takto připravená geometrie je následně importována do programu, kde je k jednotlivým částem přiřazen přesně specifikovaný materiál, zadány okrajové podmínky a vstupní parametry simulace.

6.1.1 Geometrie

Postup při vytváření geometrie s pomocí 3D kreslicího a vývojového softwaru NX 9 spočíval v kompletním vymodelování potřebné podsestavy termomagnetické spouště dle předložených výkresů od společnosti OEZ. Z těchto výkresů byla vymodelována podsestava spouště, která byla následně upravena pro potřeby simulačního programu. Jednalo se zvláště o odstranění zaoblení určitých hran, jež by použitý simulační program nedovedl pomocí MKP zanalyzovat.

Je vhodné také upřesnit, že modelovaná část byla v podstatě vodivá část spouště společně s bimetalem a jednoduchým elektromagnetem. Tyto modelované části spojené vazbami do podsestavy jsou pro účely této práce rozhodující, a proto při jejich modelování byl brán zřetel na přesnost a minimální odchylky od skutečně vyráběné spouště.

6.1.2 Materiály

Použité materiály v simulačním programu FLUX byly vytvořeny přesně dle skutečných materiálů používaných při výrobě spouště. Vytvořené materiály byly posléze přiřazeny jednotlivým importovaným vymodelovaným objemům reprezentujícím vždy určitou část proudové dráhy spouště. Výsledné objemy tedy tvoří 3 jednotlivé ucelené části z různých materiálů. Jedná se o *bimetal*, *proudovou dráhu* a *elektromagnet*.

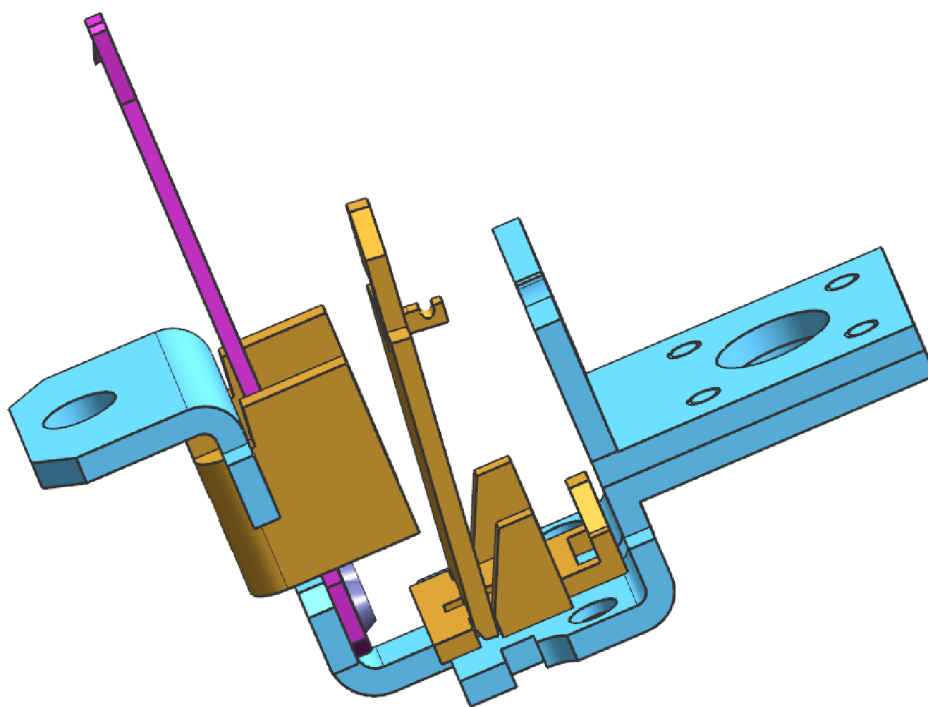
Bimetal – je tvořen dvěma slitinami a topným měděným pásem uprostřed. Aktivní část (s větší tepelnou roztažností) je ze slitiny manganu, mědi a niklu o přesně daných poměrech. Pasivní část je tvořena slitinou železa a niklu [15].

Proudová dráha – z velmi čisté mědi, která je na povrchu postříbřená pro zlepšení vlastností při vedení velkých proudů.

Elektromagnet – se skládá ze jha a kotvy, kde obě části jsou vyrobeny ze specifické magnetické oceli, která slouží ke správné funkci zkratové spouště.

6.2 Výsledná část podsestavy spouště vhodná k analýze

Vhodně upravený model určené podsestavy je zobrazen na *obrázku 6*. Tento model odpovídající současně vyráběné podsestavě spouště jističe o velikosti jmenovitého proudu 250 A je do simulačního programu FLUX importován ve formátu *step*.



Obrázek 6: Vytvořený model připravený k importu do simulačního programu

7 JEDNOTLIVÉ NÁVRHY NA OPTIMALIZACI TERMOMAGNETICKÉ SPOUŠTĚ

Z předešlé kapitoly vyplynulo, jak byl vytvořen a upraven model stávající spouště pro účely simulace. Pro přehlednost ho označíme názvem *Standard*, který bude označovat sériovou podobu spouště i včetně materiálů.

V následujících kapitolách budou zobrazeny a popsány tři dílčí koncepty, které by měli vést ke zlepšení buď nějakého technického parametru či snížit cenu spouště.

Je tedy patrné, že nás budou zajímat odlišnosti všech tří navrhovaných konceptů od stávajícího *Standardu*.

7.1 Koncept 1

Jako první návrh se jeví použití ocelových nýtů z magnetické oceli (stejný materiál jha a kotvy) namísto postříbřených měděných nýtů. Jedná se o dva nýty uchycující patu bimetalu k proudové dráze a jeden nýt držící jho elektromagnetu k proudové dráze.

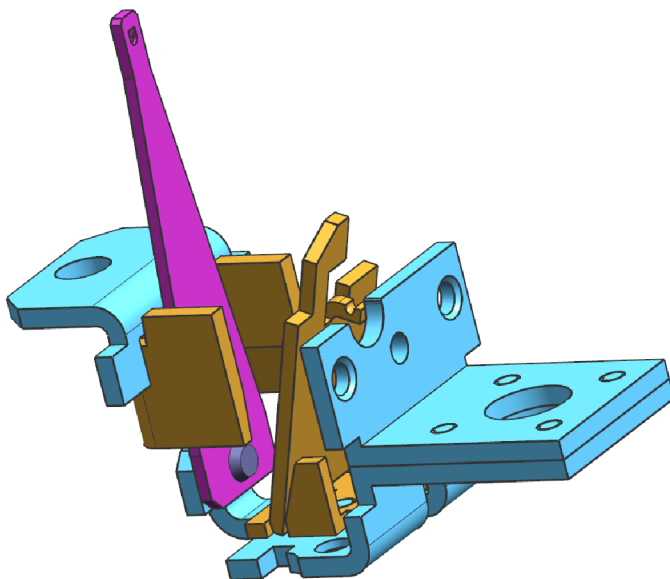
Tento koncept byl zvolen z důvodu nižší ceny ocelových nýtů oproti měděným.

Problémem u tohoto řešení by mohla být horší vodivost ocelových nýtů a tím i zpomalení přenosu tepla z paty bimetalu k jeho vršku, což by mělo za následek nežádoucí zpomalení tepelné části spouště a posun vypínací charakteristiky.

7.2 Koncept 2

Druhým realizovaným návrhem je úprava přichycení bimetalu k proudové dráze pouze jedním měděným nýtem, jež je zobrazen na *obrázku 7*. Tato koncepce by měla přinést ušetření nákladů a zlepšení proudění tepla v místech paty bimetalu.

Otázkou je však mechanická vazba a pevnost spojení s proudovou dráhou při namáhání způsobeném pnutí bimetalu a ohřevem od proudové dráhy.



Obrázek 7: Koncept 2 s jedním nýtem bimetalu

7.3 Koncept 3

Pro zlepšení vypínací charakteristiky v oblasti působení bimetálové spouště je použit koncept 3, který díky použití jiného bimetálu s větší vnitřní vrstvou mědi by měl být rychlejší. Dále by použitím tohoto bimetálu došlo ke zjednodušení logistiky z důvodu používání bimetálu s vyšším obsahem mědi v ostatních variantách spouští. Jako problém se zde jeví menší průhyb tohoto bimetálu.

Zlepšení, tedy zrychlení, vypínací charakteristiky v oblasti zkratů by mělo napomoci zvětšení plochy jha elektromagnetu prodloužením jeho délky o 10 mm. Bohužel toto řešení je nákladnější z hlediska množství použitého materiálu a zároveň vede k nárůstu chladicí plochy, jež odvádí teplo od paty bimetálu. Taktéž je předpoklad složitějšího seřízení na požadované hodnoty.

8 STATICKÁ ELEKTROMAGNETICKÁ ANALÝZA SPOUŠTĚ

První fáze elektromagnetické analýzy spouště je zaměřena na simulaci chování podstavy při procházejícím proudu. Jedná se tedy o statickou analýzu bez uvažování pohybu kotvy, provedenou v programu FLUX.

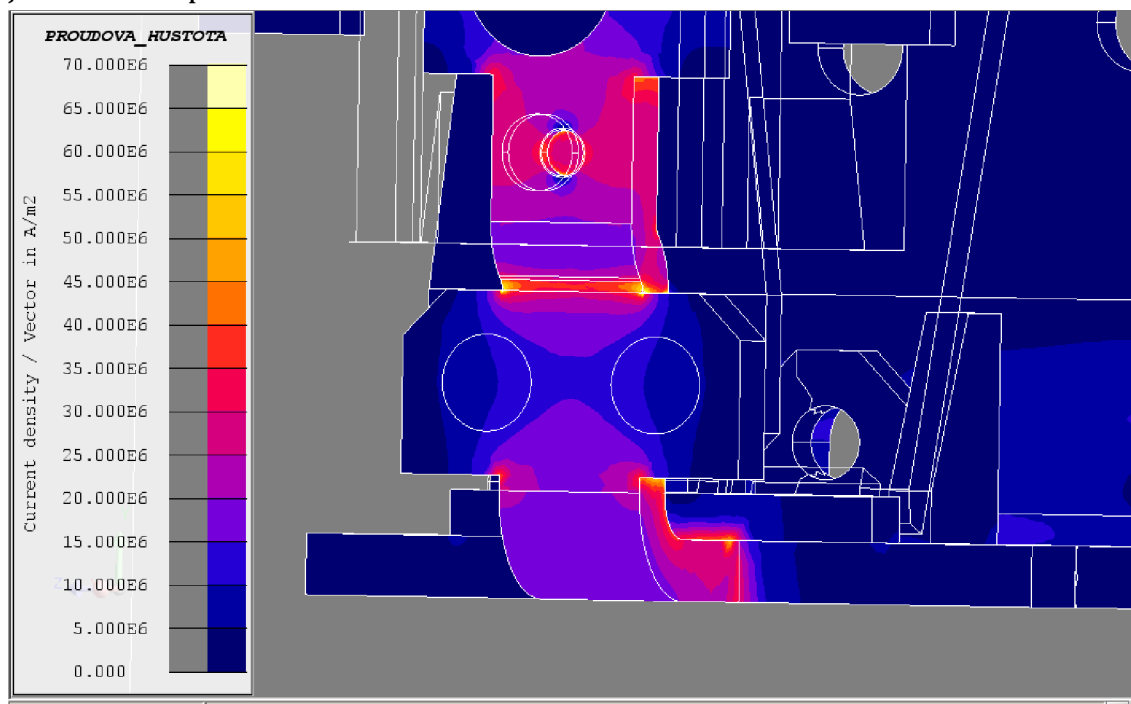
8.1 Cíle

Pomocí statické analýzy spouště jističe bylo možné u každého konceptu provést výpočet několika sledovaných parametrů. Jedná se tedy o:

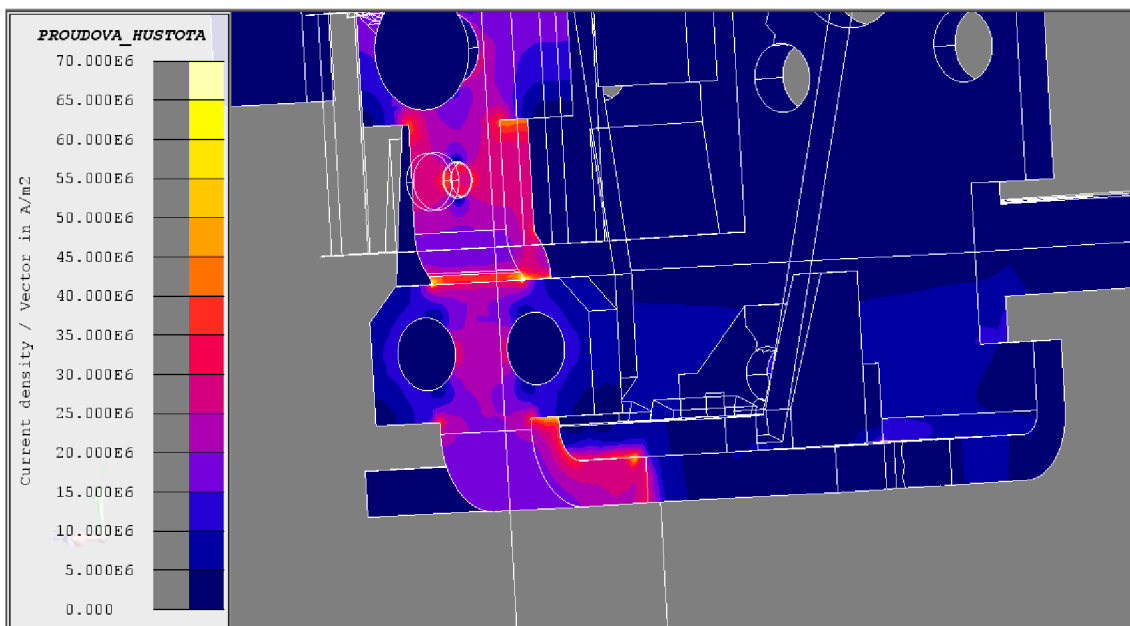
- Zjištění rozložení proudové hustoty pro jednotlivé koncepty zvláště v oblasti umístění paty bimetalu
- Výpočet Jouleových ztrát průchodem jmenovitého proudu

8.2 Rozložení proudové hustoty jednotlivých konceptů

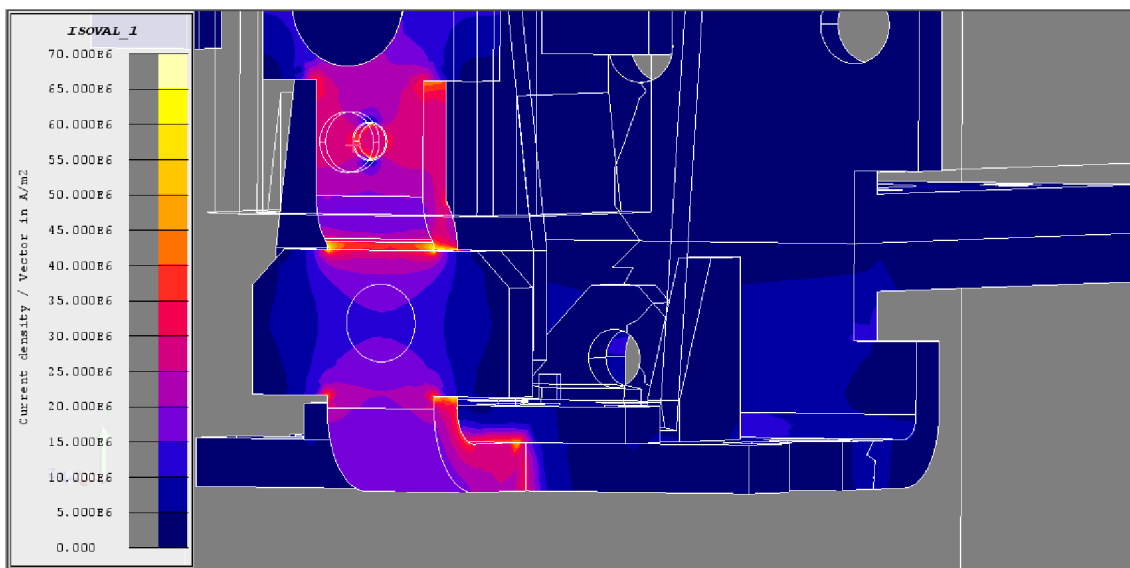
Na následujících obrázcích je možné pozorovat rozložení proudové hustoty v oblasti umístění paty bimetalu pro jednotlivé koncepční návrhy. Pro přehlednost a srozumitelnost při srovnání mezi jednotlivými koncepty jsou všechny zobrazené proudové hustoty ve stejném měřítku a o stejné velikosti procházejícího jmenovitého proudu.



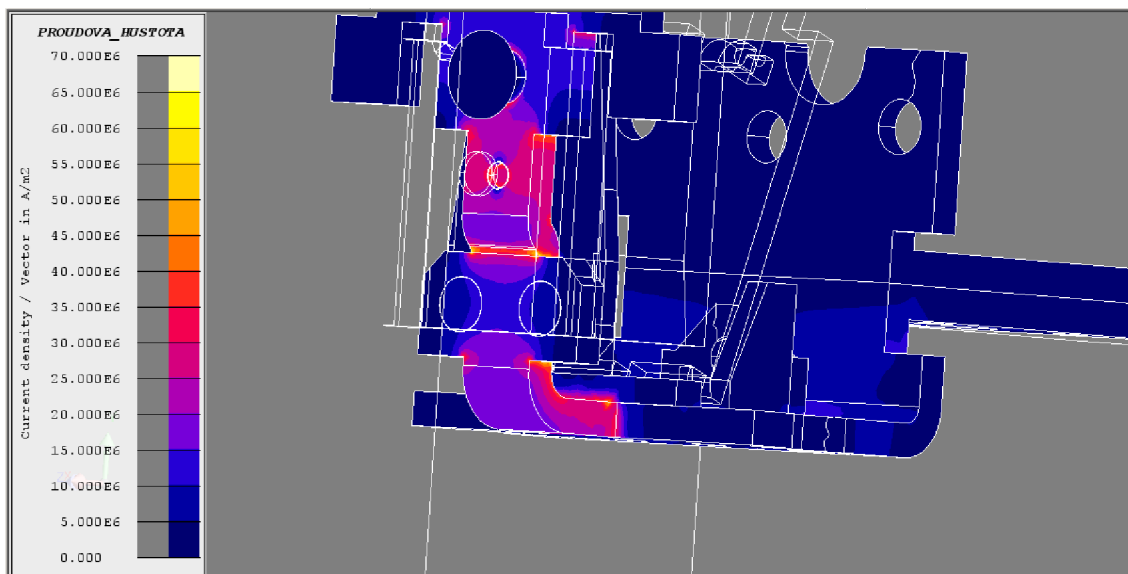
Obrázek 8: Rozložení proudové hustoty – standard



Obrázek 9: Rozložení proudové hustoty – koncept 1



Obrázek 10: Rozložení proudové hustoty – koncept 2



Obrázek 11: Rozložení proudové hustoty - koncept 3

8.3 Výpočet Jouleových ztrát na proudové dráze

Jouleovy ztráty reprezentují ztrátový výkon způsobený průchodem elektrického proudu proudovou drahou o určitém odporu, kde se část elektrické energie přemění na energii tepelnou. Tato přeměna je způsobena odevzdáním části kinetické energie nosičů náboje (elektronů) částicím uvnitř proudové dráhy [7].

Rozložení Jouleových ztrát kopíruje rozložení proudové hustoty a jejich velikost je dána odporem $R [\Omega]$ a kvadrátem procházejícího proudu $I [A]$, podle rovnice (8.3-1). Tento ztrátový výkon vychází z obecné rovnice (4.1-12) dle [10].

$$P_{ztr} = R \cdot I^2 \quad [W] \quad (8.3-1)$$

Následující *tabulka 1* zobrazuje přehled vypočtených ztrát pro jednotlivé koncepty pomocí simulačního programu FLUX.

Tabulka 1: Vypočtené hodnoty Jouleových ztrát jednotlivých konceptů na proudové dráze termomagnetické spouště při jmenovitém proudu 250A

I = 250 A	Standard	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3
$P_{ztr} [W]$	4,2	4,55	4,39	4,17

9 SIMULACE SILOVÉHO PŮSOBENÍ NA KOTVU ELEKTROMAGNETU

V předešlé kapitole byla simulace soustředěna na výpočty a porovnání proudové dráhy s ohledem působení na tepelnou část spouště. Nyní bude podrobena analýze elektromagnetická část spouště tvořená jednoduchým elektromagnetem.

Pro porovnání jednotlivých konceptů má nejvyšší vypovídací hodnotu výpočet silového působení na kotvu elektromagnetu při daných velikostech nadproudu. Aby termomagnetická spoušť ve vysokých nadproudech (zkratech) fungovala správně, je potřeba, aby elektromagnetická síla vyvolaná průchodem proudu byla dostatečně veliká. Dostatečná velikost při zjednodušení znamená, že elektromagnetická síla překoná protisílu vyvolanou pružinou. Zjednodušení spočívá v zanedbání tření v ložisku kotvy o fixační člen.

Za účelem snadného porovnání jednotlivých konceptů je třeba si definovat základní porovnávací body. Jako první bod byl zvolen nadproud o hodnotě pětinasobku jmenovitého proudu a pozice kotvy nejbližší jhu při nastavení zkratové spouště na pětinasobek. Druhý bod je určen desetinásobkem jmenovitého proudu a pozicí kotvy nejdále od jha elektromagnetu při nastavení zkratové spouště na desetinásobek. V každém tomto bodě, vymezejícím okrajové (nejhorší) podmínky pro vypínání, je třeba vypočtenou sílu porovnat se silou od pružiny a vyhodnotit správnost funkce zkratové spouště.

Následující *tabulky 2 a 3* obsahují vypočtené hodnoty síly v určených bodech a jim odpovídající mechanickou protisílu od pružiny.

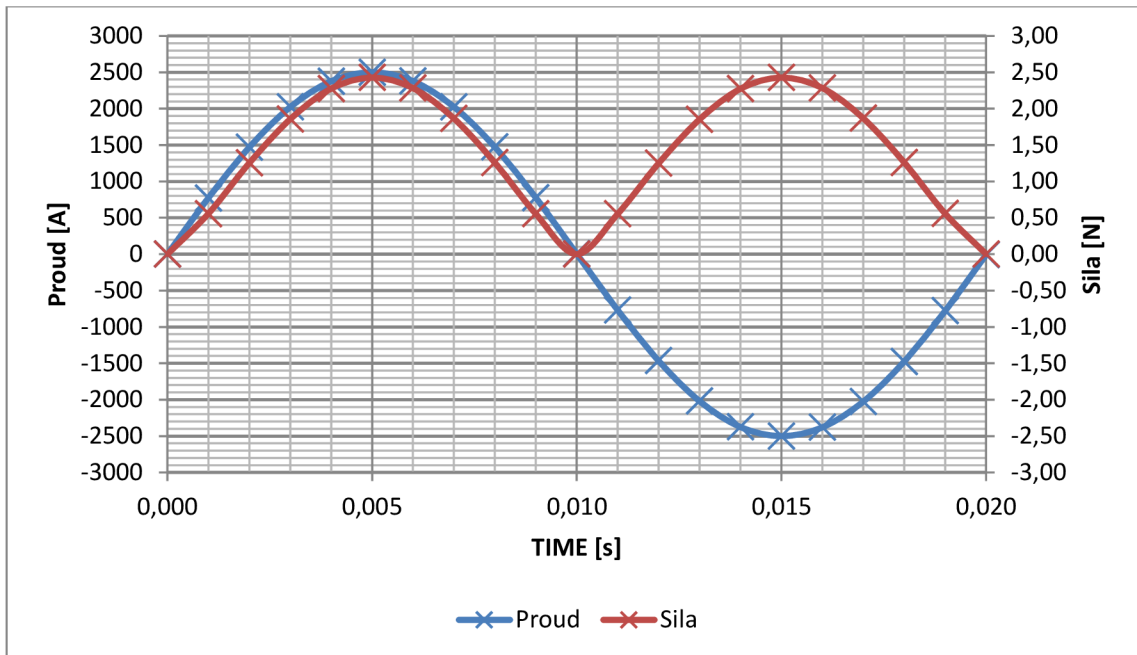
Tabulka 2: Vypočtené hodnoty síly působící na kotvu při pětinasobku proudu a nastavení zkratové spouště na minimum

Pozice 1 $I = 1250 \text{ A}$	Standard	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3
$F_{\text{kotva}} [\text{N}]$	1,87	2,00	1,87	7,92
$F_{\text{pružina}} [\text{N}]$	1,35			

Tabulka 3: Vypočtené hodnoty síly působící na kotvu při desetinásobku proudu a nastavení zkratové spouště na maximum

Pozice 2 $I = 2500 \text{ A}$	Standard	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3
$F_{\text{kotva}} [\text{N}]$	2,43	2,46	2,43	4,55
$F_{\text{pružina}} [\text{N}]$	1,50			

Z vypočtených hodnot je patrné, že vypočtená síla by s velikou rezervou stačila na přitáhnutí kotvy v daných bodech. To by bez debat platilo při stejnosměrném napájení, ale při uvažování harmonického sinusového proudu procházejícího proudovou drahou je třeba počítat s měnící se velikostí silového působení na kotvu. Průběh takového silového působení spolu s odpovídajícím sinusovým proudem je na *obrázku 12*.



Obrázek 12: Silové působení na kotvu při harmonickém napájení - Standard

Průběhy odpovídají výpočtům z *tabulky 3* pro verzi standard. Z něho je patrné, že vypočtených hodnot je dosaženo při maximu proudu. Z tohoto důvodu vždy při vypínání záleží, zda je dynamika kotvy dostatečná, jelikož hodnoty síly, které překonávají tření a protisílu od pružinky leží v oblasti kolem maxima proudu, a to pouze v omezeném časovém rozsahu. Tudíž je důležité, aby dynamické působení vyvolané při průchodu v okolí maxima proudu bylo dostatečné k dosažení potřebného přitažení.

10 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Aby bylo možné z předešlých výsledků, získaných v simulačním programu FLUX, určit, který návrh je vhodný k použití ve výrobě, je třeba jednotlivé koncepty změřit. Druhým aspektem pro měření je i porovnání s výpočty od daného simulačního programu. Jedná se o rozsáhlá a časově náročná měření, proto v této práci budou interpretovány pouze výsledky těchto měření a závěry z nich plynoucí.

10.1 Příprava měření

Standardní jistič se současně vyráběnou spouští byl k dostání okamžitě. Další koncepty bylo již nutné různými dílčími úpravami upravit nebo nechat vyrobít několik prototypových kusů.

Posléze byly jednotlivé koncepty seřizeny, jak zkratová, tak i tepelná část spouště. Toto seřízení na stejné nominální parametry jako standardní spoušť je důležité pro následné porovnání naměřených výsledků. Je zde však třeba podotknout, že seřízení jednotlivých spouští, tak i samotné měření je zatíženo jistou chybou, kterou je třeba v následné interpretaci výsledků třeba zohlednit.

10.2 Jouleovy ztráty na topítku

Aby bylo možné dle vztahu (8.3-1) vypočítat skutečné ztráty na topítku (proudové dráze spouště), je třeba nejprve změřit odpor topítka. Změřené odpory (měřeno za studena při proudu 250 A) jsou v následující *tabulce 4*.

Tabulka 4: Změřené hodnoty odporů proudové dráhy jednotlivých konceptů

	Standard	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3
R [$\mu\Omega$]	66	74,4	70,9	65,2

Z naměřených odporů lze posléze vypočítat skutečný ztrátový výkon na proudové dráze spouště.

Tabulka 5: vypočtené Jouleovy ztráty z naměřených odporů proudové dráhy

I = 250 A	Standard	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3
P _{ztr} [W]	4,125	4,65	4,43	4,075

10.3 Vypínací charakteristika

Toto měření je velmi důležité, jelikož změna vypínací charakteristiky mimo potřebné oblasti by vedla k nefunkčnosti jističe a nedodržení normou předepsaných hodnot, což by mohlo mít za následek ohrožení zdraví i majetku třetích osob.

Následující *tabulky 6 až 9* ukazují naměřené vypínací časy jednotlivých konceptů a z nich vyneseny grafy na *obrázku 13*, který vykresluje průběhy jednotlivých vypínacích charakteristik v teplené části spouště. Připomeňme, že jednotlivé koncepty byly seřizeny na stejné geometrické rozměry vůči bimetalu, aby naměřené výsledky byly porovnatelné.

Tabulka 6: Změřené vypínací časy standardního provedení

Standard	
Násobek proudu	Vypínací čas [hh:mm:ss]
1,05	> 2 h
1,3	00:46:44
1,5	00:20:09
1,8	00:09:05
2	00:05:17
2,5	00:02:05
3	00:01:25
5	< 200 ms

Tabulka 7: Změřené vypínací časy konceptu 1

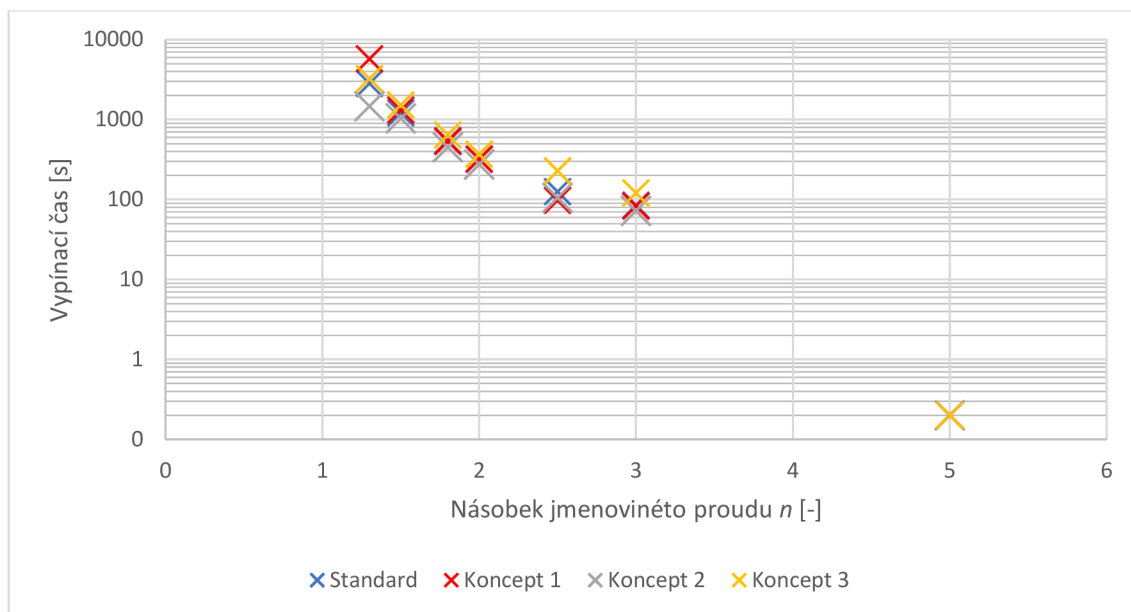
Koncept 1	
Násobek proudu	Vypínací čas [hh:mm:ss]
1,05	> 2 h
1,3	01:35:06
1,5	00:21:49
1,8	00:08:53
2	00:05:20
2,5	00:01:58
3	00:01:23
5	< 200 ms

Tabulka 8: Změřené vypínací časy konceptu 2

Koncept 2	
Násobek proudu	Vypínací čas [hh:mm:ss]
1,05	> 2 h
1,3	00:24:19
1,5	00:17:10
1,8	00:07:29
2	00:04:34
2,5	00:01:45
3	00:01:12
5	< 200 ms

Tabulka 9: Změřené vypínací časy konceptu 3

Koncept 3	
Násobek proudu	Vypínací čas [hh:mm:ss]
1,05	> 2 h
1,3	00:53:53
1,5	00:25:24
1,8	00:10:41
2	00:06:08
2,5	00:03:47
3	00:02:01
5	< 200 ms

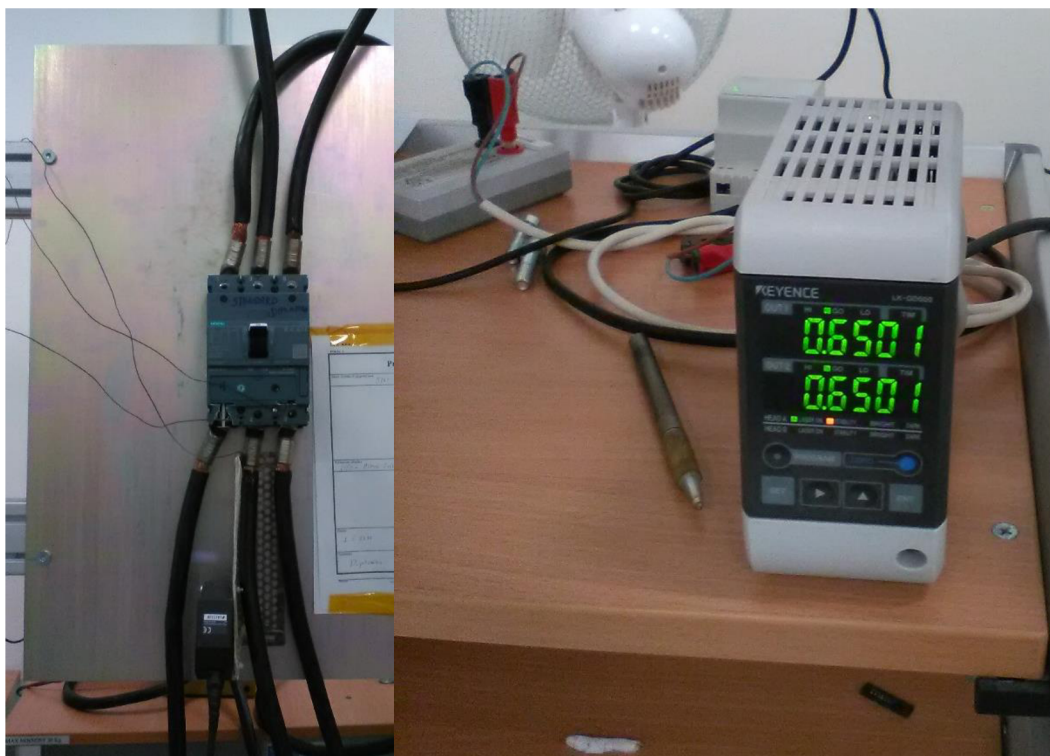


Obrázek 13: Změřené vypínací charakteristiky jednotlivých konceptů

10.4 Oteplení bimetalu a jeho průhyb

Předešlé měření vypínacích charakteristik ukazuje, zda se jednotlivé změny projeví na posunu vypínacích časů mimo žádané hodnoty. Ovšem toto měření je velmi závislé na seřízení jednotlivých spouští. Proto pro detailnější výstupy je třeba přikročit k měření samotného průhybu bimetalu a jeho oteplení. Hodnoty průhybu bimetalu jsou důležité, jelikož při porovnání s geometrií spouště musí průhyb zajišťovat dostatečnou velikost k otočení hlavní vybavovací hřídele a tím i uvolnění střadače.

Pro měření průhybu bimetalu je používáno laserové čidlo spolu s přípravkem, který je upevněn na šikmině bimetalu. Díky němu, lze měřit relativní průhyb mimo vlastní tělo jističe se spouští. Laserové čidlo spolu se zapojením jističe na měřícím stanovišti ukazuje *obrázek 14*.



Obrázek 14: Zapojení laserového čidla a měřicího stanoviště

Následující *tabulky 10 až 13* obsahují změřené hodnoty průhybů bimetalu a teplot na patě jednotlivých bimetalů. Taktéž je v nich obsažena teoretická hodnota volného průhybu dle vzorce (10.4-1). Při tomto výpočtu byla uvažována diference teplot jako rozdíl změřené teploty okolí a průměru teplot na patách bimetalů.

Tabulka 10: Změřené hodnoty teplot a průhybů standartního provedení

Standard					
0,7 x I _n		I _n		1,3 x I _n	
Teplota [°C]		Teplota [°C]		Teplota [°C]	
Okolí	22,0	Okolí	22,7	Okolí	22,8
L1	58,4	L1	93,4	L1	144,5
L2	60,6	L2	97,5	L2	151,7
L3	58,0	L3	91,7	L3	140,0
Průměr	59,0	Průměr	94,2	Průměr	145,4
Průhyb A [mm]	1,02	Průhyb A [mm]	2,09	Průhyb A [mm]	3,64
Vypočtený průhyb [mm]	1,08	Vypočtený průhyb [mm]	2,09	Vypočtený průhyb [mm]	3,59

Tabulka 11: Změřené hodnoty teplot a průhybů konceptu 1

Koncept 1					
0,7 x I _n		I _n		1,3 x I _n	
Teplota [°C]		Teplota [°C]		Teplota [°C]	
Okolí	26,7	Okolí	24,7	Okolí	25,4
L1	59,1	L1	95,5	L1	142,3
L2	64,5	L2	101,3	L2	159,2
L3	59,6	L3	96,7	L3	146,4
Průměr	61,1	Průměr	97,8	Průměr	149,3
Průhyb A [mm]	1,00	Průhyb A [mm]	2,13	Průhyb A [mm]	3,59
Vypočtený průhyb [mm]	1,01	Vypočtený průhyb [mm]	2,14	Vypočtený průhyb [mm]	3,63

Tabulka 12: Změřené hodnoty teplot a průhybů konceptu 2

Koncept 2					
0,7 x I _n		I _n		1,3 x I _n	
Teplota [°C]		Teplota [°C]		Teplota [°C]	
Okolí	23,0	Okolí	23,0	Okolí	23,1
L1	63,2	L1	96,3	L1	149,5
L2	65,7	L2	103,7	L2	157,4
L3	62,4	L3	95,8	L3	149,8
Průměr	63,8	Průměr	98,6	Průměr	152,2
Průhyb A [mm]	1,21	Průhyb A [mm]	2,40	Průhyb A [mm]	3,95
Vypočtený průhyb [mm]	1,19	Vypočtený průhyb [mm]	2,21	Vypočtený průhyb [mm]	3,78

Tabulka 13: Změřené hodnoty teplot a průhybů konceptu 3

Koncept 3					
0,7 x I _n		I _n		1,3 x I _n	
Teplota [°C]		Teplota [°C]		Teplota [°C]	
Okolí	23,1	Okolí	23,9	Okolí	24,9
L1	60,3	L1	93,6	L1	147,1
L2	61,1	L2	97,3	L2	158,8
L3	57,5	L3	97,0	L3	153,1
Průměr	59,6	Průměr	96,0	Průměr	153,0
Průhyb A [mm]	0,96	Průhyb A [mm]	2,05	Průhyb A [mm]	3,55
Vypočtený průhyb [mm]	1,01	Vypočtený průhyb [mm]	1,99	Vypočtený průhyb [mm]	3,53

Poslední řádek výše uvedených tabulek obsahuje vypočítanou hodnotu průhybu bimetalu dle vztahu (10.4-1) [16].

$$A = \frac{a \cdot (T - T_o) \cdot L^2}{s} \quad [\text{mm}] \quad (10.4-1)$$

Kdy s [mm] je tloušťka bimetalu, a [K^{-1}] označuje tzv. specifický průhyb, L [mm] je aktivní délka bimetalového pásku a $T - T_o$ [$^{\circ}C$] je rozdíl teplot.

Jedná se o volný průhyb bimetalu ukotveného na jedné straně (patě bimetalu). Avšak je třeba uvažovat, že volný průhyb ukazuje pouze hodnotu průhybu danou rozdílem teplot. Při uvažování skutečného průhybu je třeba brát na zřetel zmenšení průhybu bimetalu protisílou, která je generována hlavní hřídelí a její hodnota je zhruba 1 N. Tedy výsledkem je skutečnost, že průhyb bimetalu musí být dostatečný i při uvažování této protisíly. Výpočet skutečného průhybu s uvažováním dané protisíly je dán vztahem (10.4-2) [16].

$$A = \frac{a \cdot (T - T_o) \cdot L^2}{s} - \frac{4 \cdot (F - F_o) \cdot L^3}{b \cdot s^3 \cdot E} \quad [\text{mm}] \quad (10.4-2)$$

V tomto vzorci se objevují další neznámé a to b [mm] jako šířka bimetalového pásku, $F - F_o$ [N] výsledná protisíla a E [N/mm²] značí modul pružnosti bimetalu.

Pro porovnání jednotlivých konceptů bude stačit jejich změřená hodnota volného průhybu. Avšak u 1,3 násobku jmenovitého proudu je třeba uvažovat i hodnoty protisíly. To je dáno normou 60947 - 2, kdy tato norma uvádí, že 1,3 násobek jmenovitého proudu musí být vypnut do 2 hodin. Z toho plyne, že při tomto násobku, již musí bimetal tlačit na hlavní vybavovací hřídel, a proto je protisíla uvažována.

Pro přehlednost jsou jednotlivé změřené i vypočtené průhyby uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14: Přehled změřených a vypočtených průhybů

	Volný průhyb změřeno			Volný průhyb výpočet			Průhyb s protisílou
	0,7xI _n	I _n	1,3xI _n	0,7xI _n	I _n	1,3xI _n	1,3xI _n
Standard	1,02	2,09	3,64	1,08	2,09	3,59	3,47
Koncept 1	1,00	2,13	3,59	1,01	2,14	3,63	3,42
Koncept 2	1,21	2,40	3,95	1,19	2,21	3,78	3,78
Koncept 3	0,96	2,05	3,55	1,01	1,99	3,53	3,38

V kapitole 11 bude prezentováno jak jednotlivé koncepty a jejich průhyby vyhovují geometrii spouště.

10.5 Měření pohybu zkratové spouště

Posledním provedeným měřením je měření pohybu elektromagnetické části spouště. Pomocí vysokorychlostní kamery a vyhodnocovacího programu lze zjistit výsledný čas, který jednotlivé koncepty s danými úpravami potřebují k vybavení spouště při daných násobcích proudu.

Tabulka 15 obsahuje změřené vypínací časy jednotlivých konceptů v porovnání se standardním provedením.

Tabulka 15: Změřené vybavovací doby jednotlivých konceptů

Nastavení TMTU	Doba úplného vybavení střadače [ms]			Doba rozhodujícího dotyku kotvy s hřídelí [ms]		
	MIN	MAX	MAX	MIN	MAX	MAX
$I_{\text{amplituda}}$ [kA]	1,5	3	5	1,5	3	5
Standard	20,0	39,3	9,1	15,9	36,7	7,1
Koncept 1	10,0	19,4	8,7	6,4	17,0	6,7
Koncept 2	28,9	27,4	10,6	25,1	25,1	8,4
Koncept 3	8,4	8,6	6,9	6,1	6,7	5,1

Nastavení spouště odpovídá nejmenší vzduchové mezeře, tedy kotva se nachází nejbližší jhu (MIN), anebo naopak největšímu možnému nastavení vzdálenosti (MAX).

Pro vyjádření vlivu jednotlivých návrhů na dynamiku spouště se jeví jako nejlepší parametr rozdíl mezi rozhodujícím dotykem kotvy a dobou úplného vybavení střadače. Vypočtené rozdíly udává *tabulka 16*.

Tabulka 16: Vyjádření dynamiky pomocí zpoždění střadače

Nastavení TMTU	Zpoždění střadače [ms]		
	MIN	MAX	MAX
$I_{\text{amplituda}}$ [kA]	1,5	3	5
Standard	4,1	2,6	2,0
Koncept 1	3,6	2,4	2,0
Koncept 2	3,7	2,3	2,1
Koncept 3	2,3	1,9	1,7

Reálnou představu o průběhu měření a vyhodnocení výsledků za pomoci vysokorychlostní kamery a vyhodnocovacího programu je zobrazen na *obrázku 15*.



Obrázek 15: Snímek pořízený vysokorychlostní kamerou v okamžiku rozhodujícího dotyku kotvy s hřídelí – Standard 1500 A při nastavení MIN.

Na *obrázku 15* je možné vidět dva body. Červený bod je umístěn na vrcholku kotvy a sleduje dráhu kotvy při pohybu směrem ke jhu elektromagnetu. Druhým bodem je modrý, který je umístěn na vrcholku střadače a sleduje dráhu jeho pohybu. Tyto dva body jsou pomocí vyhodnocovacího programu Tracker sledovány během celého vypínacího děje a díky známým geometrickým rozměrům a přesně nastavené hodnotě snímkování lze posléze dopočítat absolutní hodnoty času a dráhy obou sledovaných bodů. Díky tomu bylo možné doplnit časové údaje do *tabulek 15* a *16*. Další podstatnou částí u tohoto měření je průběžné sledování proudu, který je zobrazen v pravém horním rohu na *obrázku 15*. Porovnáním těchto průběhů a příslušných videí, lze dovodit chování jednotlivých návrhů při vypínání zkratových proudů.

11 VYHODNOCENÍ VÝPOČTŮ SIMULACÍ A MĚŘENÍ

V předešlých třech kapitolách byly jednotlivé návrhy kompletně analyzovány v simulačním programu FLUX a následně podrobeny reálnému měření ve zkušebních laboratořích firmy OEZ. Kombinací výsledků simulací a výstupů měření lze dospět k těmto závěrům.

11.1 Tepelná část spouště

Ohledně porovnání jednotlivých spouští mezi sebou bylo v rámci simulace přistoupeno k výpočtům rozložení proudové hustoty a Jouleových ztrát na proudové dráze spouště.

Zde je třeba připomenout fakt, že je snaha docílit rychlejšího ohřevu bimetalu v případě vyšších nadproudů. Z tohoto důvodu je důležité, aby docházelo ke generaci dostatečného množství tepla z proudové dráhy, hlavně v oblasti uchycení bimetalu. Proto při porovnání všech variant docházíme k závěru, že toto je nejvíce splněno u konceptu 1 a konceptu 2, kdy u těchto dvou konceptů jsou o něco vyšší Jouleovy ztráty (*tabulka 1*) a rozložení proudové hustoty je dle *obrázků 9 a 10* příznivější.

Pokud s těmito výsledky simulace porovnáme uskutečněná měření dostáváme se k potvrzení těchto předpokladů. Ze změřených odporů a následnému výpočtu Jouleových ztrát (*tabulky 4 a 5*) dostáváme, s přesností na jednu desetinu Wattu, stejné výsledky jako vypočtené v simulaci. To potvrzují i změřené vypínací charakteristiky na *obrázku 13*, ze kterého opět vyplývá mírné zlepšení u konceptu 1 a konceptu 2.

Poslední provedené měření z pohledu tepelné části, které porovnávalo průhyb bimetalu a skutečné teploty na jeho patě v místě styku s proudovou dráhou (*tabulky 10 až 14*), ukazuje a potvrzuje předpoklady z výše provedených simulací a měření. Největší průhyb vykazuje koncept 2, naopak nejmenší průhyb má dle očekávání koncept 3. Porovnáním s geometrickými rozměry spouště (*tabulka 14*), lze dojít k závěru, že v oblasti průhybu bimetalu i s uvažováním protisíly od hřídele jsou všechny koncepty vyhovující, což potvrzují i vypínací charakteristiky.

11.2 Elektromagnetická část spouště

Z pohledu zkratové spouště a výsledků z provedených simulací jsou důležité *tabulky 2 a 3*, jež ukazují silové působení na kotvu elektromagnetu při zadaných okrajových bodech. Z tabulek je patrné, že příslušné proudy v kombinaci

s nastavenou vzduchovou mezerou jsou vyhovující a dokáží vytvářet dostatečnou elektromagnetickou sílu na překonání mechanické síly vyvolané působením pružiny. Naměřené hodnoty ukazují mírné zlepšení u konceptu 1 a dle předpokladů velmi výrazné u konceptu 3.

Jak již bylo naznačeno v kapitole 9, vypočtené hodnoty je třeba uvažovat i v případě harmonického napájení (*obrázek 12*). Ten jasně ukazuje, že při procházejícím harmonickém proudu je dostatečné silové působení na překonání pružiny pouze v oblasti okolí amplitudy proudu. Z tohoto důvodu je nejvíce vypovídající měření reálné dynamiky pohybu kotvy. Pomocí tohoto měření byly ověřeny předpoklady vycházející ze silové simulace provedené v kapitole 9. Hodnoty jednotlivých sledovaných časů jsou obsaženy v *tabulkách 15 a 16*.

Tyto naměřené hodnoty dokazují zlepšení u konceptu 1, kdy díky posílení magnetického obvodu ocelovými nýty došlo k vybavení střadače již v první amplitudě procházejícího proudu. Oproti standartnímu provedení, které vybavilo až v okolí druhé amplitudy proudu, se jedná o požadované zrychlení. Koncept 3 je dle předpokladů a výpočtů nejrychlejší.

Tím se dostáváme k poslednímu vyhodnocení a tím je vliv na celkovou dynamiku spouště. Porovnáním časů dotyku kotvy s hřídelem a vybavením střadače (*tabulka 16*) dostáváme reálnou představu o vlivu jednotlivých konceptů na dynamiku spouště vyjádřenou pomocí zpoždění střadače. Z výsledků je patrné, že se zvyšujícím se zkratovým proudem je vybavovací děj natolik rychlý, že jednotlivé návrhy mezi sebou stírají rozdíly v dynamice přitažení kotvy a následném vybavení střadače.

Rozhodující pro zlepšení vybavování při nižších zkratech je schopnost dosažení zkratové hřídele v prvních amplitudách procházejícího proudu. Tato schopnost je lepší právě u konceptu 1 a konceptu 3. Je však nutné dodat, že u konceptu 3 se sice podařilo dosáhnout výrazného zlepšení dynamiky, ale bohužel za cenu mnohem složitějšího seřízení spouště.

12 ZÁVĚR

Hlavními cíly této práce bylo nalezení možného zlepšení termomagnetické nadproudové spouště jističe a k tomuto účelu se seznámit a aktivně využít simulační program FLUX používaný společností OEZ.

V první části se práce zaměřuje na popis a rozbor jističe spolu s různými druhy spouští. Detailněji popisuje konstrukci analyzované termomagnetické spouště a uvádí základní poznatky z oblasti elektromagnetismu využívané při návrhu spouští.

Diplomová práce posléze pokračuje popisem tvorby výsledné geometrie vhodné k použití v simulačním programu.

V samotné praktické části práce byly vytvořeny tři různé koncepty, které by jednotlivě měli přinést zlepšení v určitém technickém parametru či zlevnit výrobu. Standardní provedení spolu se všemi třemi vytvořenými koncepty byly podrobeny množství simulací. Posléze pro reálné ověření výsledků simulací byly jednotlivé koncepty vyrobeny.

Jednotlivé spouště byly změřeny s ohledem na důležité a sledované parametry. Jednalo se o měření a výpočty ztrátových výkonů proudové dráhy, vypínací charakteristiky, průhyby a oteplení bimetalů, a nakonec i měření dynamiky elektromagnetu spouště pomocí vysokorychlostní kamery.

Porovnání a zhodnocení všech výsledků simulací a měření je uvedeno v kapitole 11. Po provedení výše uvedených simulací a množství měření lze jednoznačně doporučit k zavedení do výroby koncept 1, a to z několika důvodů. Prvním je nižší cena použitých ocelových nýtů, které dle získaných výsledků nemají žádný negativní vliv na tepelnou část spouště. Druhým důvodem je dokonce mírné zlepšení v oblasti fungování zkratové spouště.

Výsledky dále ukazují na zlepšení v tepelné oblasti u konceptu 2. Avšak složitost změn střižných a nýtovacích nástrojů odsouvá tento koncept z ekonomických důvodů do role možnosti pro použití při návrhu a vývoje dalších spínacích přístrojů.

Poslední koncept 3 ukazuje, že dramatické zvýšení přitažné síly elektromagnetu nevede k výraznějšímu zlepšení dynamiky vypínání spouště. Při vyšších nadproudech dochází ke zmenšení rozdílů mezi jednotlivými koncepty, a tak nevýhody tohoto konceptu v oblasti seřizování spouště a ekonomické důvody převažují. Pokud bychom z konceptu 3 separovali pouze jiný bimetal, tak s ohledem na měření a výpočty průhybů a měření vypínací charakteristiky, lze doporučit použití tohoto bimetalu namísto standardně používaného. Důvodem je zjednodušení logistiky. Doporučuji však tento návrh ještě podrobit dalšímu měření na větším množství vzorků.

LITERATURA

[1] HYNEK, Jiří. Jističe Modeion s motorovými pohony – další prvek pro automatizaci jištění. In: *ELEKTRO časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: Residit, 2008 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/jistice-modeion-s-motorovymi-pohony-dalsi-prvek-pro-automatizaci-jisteni--11777>

[2] *Silnoproudá elektrotechnika - učební text: 1. část* [online]. Ostrava: Katedra elektrických strojů a přístrojů VŠB - TU Ostrava, 2006 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat410/www453/index.htm>

[3] SIEMENS AG. *3VA Molded Case Circuit Breaker: manual*. Regensburg, 2014, 532 s. Dostupné také z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/90318775/3va-molded-case-circuit-breakers?dti=0&pnid=19478&lc=en-WW>

[4] SIEMENS AG. *3VA Molded Case Circuit Breaker: brochure*. Regensburg, 2015, 32 s. Dostupné také z: https://www.lowvoltage.siemens.com/infocenter/doc/3VA-molded-case-circuit-breaker---Brochure-04_2015_6916.pdf

[5] BUŠOV, Bohuslav a kol. *Elektrické přístroje - podklady a příklady pro navrhování I* [online]. Brno: FEKT VUT v Brně, 2013 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/course/view.php?id=161784>

[6] Katarakt: tlumič kmitů. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Katarakt_\(tlumi%C4%8D_kmit%C5%AF\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Katarakt_(tlumi%C4%8D_kmit%C5%AF))

[7] DOSTÁL, Lukáš. *Simulace nadproudové spouště jističe* [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27713

[8] VOJÁČEK, Antonín. Co je, k čemu je a jak funguje Rogowského cívka? In: *Automatizace* [online]. Praha: HW server, 2007 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>

- [9] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky - svazek IV.: Magnetické obvody ve výkonové elektronice, pulsní měniče s transformátorem* [online]. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=23646
- [10] DĚDEK, Libor a Jarmila DĚDKOVÁ. *Elektromagnetismus*. Vyd. 2. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1548-7.
- [11] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Dynamika elektromechanických soustav* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/folder/view.php?id=57880>. Skripta. FEKT VUT v Brně.
- [12] PROCHÁZKA, Karel. *Jak na metodu konečných prvků: učební text pro seznámení se s MKP*. Opava: Střední škola průmyslová a umělecká, 2006. Dostupné také z: <http://www.sspu-opava.cz/~prochazka/ruzne/index.html>
- [13] BURŠA, Jiří. *Metoda konečných prvků: kapitola 18* [online]. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud_opory/MKP4.pdf
- [14] Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF
- [15] UHLIG, Wolfgang, Joachim SCHUSTER, Matthias GLÄSER a Uwe BRÜCKNER. AUERHAMMER METALLWERK GMBH. *Thermostatic metal: Manufacture and Application*. 2nd ed. Aue (Deutschland), 1996.
- [16] KANTHAL AB. *The Kanthal thermostatic bimetal handbook*. Hallstahammar (Sweden), 1996.
- [17] FLUX software, firemní licence
- [18] NX9 software, firemní licence

Seznam symbolů, veličin a zkratek

<i>3D</i>	trojrozměrný (prostorový) model
<i>A</i>	ampér, jednotka elektrického proudu
<i>A</i>	práce [J]
<i>A</i>	průhyb bimetalu [mm]
<i>a</i>	specifický průhyb bimetalu [K ⁻¹]
<i>A/D</i>	převodník analogového signálu na digitální
<i>b</i>	šířka bimetalového pásku [mm]
<i>B</i>	magnetická indukce [T]
<i>ČSN</i>	česká technická norma
<i>E</i>	modul pružnosti [N/mm ² nebo MPa]
<i>E</i>	intenzita elektrického pole [V/m]
<i>ETU</i>	elektronická spoušť z angl. Electronic Trip Unit
<i>F</i>	síla působící na kotvu [N]
<i>FEM</i>	metoda konečných prvků z angl. Finite Element Method
<i>G</i>	hmotnost kotvy [kg]
<i>I</i>	elektrický proud [A]
<i>J</i>	Proudová hustota [A/m ²]
<i>k_r</i>	koeficient rozptylu
<i>K</i>	tuhost pružiny [N/m]
<i>l</i>	délka vodiče [m]
<i>L</i>	indukčnost [H]
<i>L</i>	aktivní délka bimetalu [mm]
<i>MKP</i>	metoda konečných prvků
<i>N</i>	počet závitů cívky
<i>OFF</i>	pozice jističe vypnuto, před natažené pružiny
<i>ON</i>	pozice jističe zapnuto, maximálně natažené pružiny
<i>P_{ztr}</i>	Jouleovy ztráty [W]
<i>p_z</i>	objemová hustota ztrát [W/m ³]
<i>Q</i>	elektrický náboj [C]
<i>R</i>	elektrický odpor proudové dráhy spouště
<i>r</i>	modul polohového vektoru [m]
<i>R</i>	rozdíl polohových vektorů [m]
<i>R_m</i>	magnetický odpor [1/H]
<i>s</i>	tloušťka bimetalu [mm]
<i>S</i>	plocha [m ²]
<i>T-T₀</i>	rozdíl teplot [°C]
<i>T</i>	koeficient tření [-]

t	čas [s]
$TMTU$	termomagnetická spoušť z angl. Thermal Magnetic Trip Unit
U	napětí, rozdíl potenciálů [V]
USB	univerzální sériová sběrnice z angl. Universal Serial Bus
V	objem [m ³]
v	střední rychlost pohybujících se nosičů náboje [m/s]
W_m	energie magnetického pole [J]
ρ	objemová hustota náboje [C/m ³]
γ	konduktivita prostředí [S/m]
ϕ	potenciál [V]
π	Ludolfovo číslo, konstanta
μ_0	permeabilita vakua [H/m]
Ψ	spřažený magnetický tok [Wb]