

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

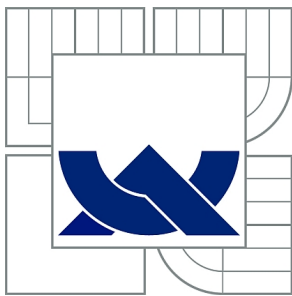
Simulace nadproudové spouště jističe

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

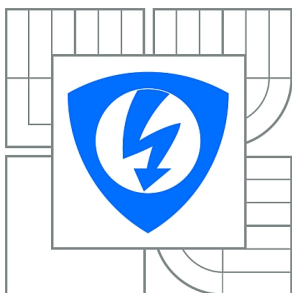
Bc. Lukáš Dostál

BRNO 2010



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 NADPROUDOVÉ SPOUŠTĚ JISTIČE

SIMULATION OF CIRCUIT-BREAKER TRIP UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

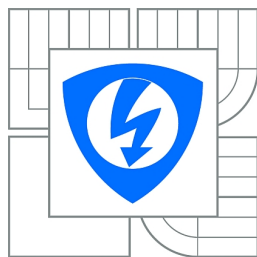
Bc. LUKÁŠ DOSTÁL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VALENTA, Ph.D.

BRNO 2010



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. Lukáš Dostál

ID: 83839

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Simulace nadproudové spouště jističe

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište princip činnosti nadproudové spouště jističe.
2. Pro zadané podmínky proveďte výpočet rozložení hustoty proudu a dalších veličin.
3. Proveďte rozbor získaných výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 20.5.2010

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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Jištění elektrických zařízení je důležité nejen z důvodu ochrany proti zničení účinky elektrického proudu, ale také ochrany před úrazem elektrickým proudem lidí či domácích zvířat. Se zvyšující se životní úrovní obyvatel se zvyšuje i spotřeba elektrické energie. V soustavě nízkého napětí elektrické sítě proto narůstají zkratové proudy. Se zlepšující se technologií se klade značný požadavek na výkonnost, bezpečnost a spínací kapacitu jističů. Tato práce je zaměřená na vývoj tepelné a elektromagnetické spouště jističe, na který se klade velký důraz při vývoji nových typů jističe. Práce je zajímavá z hlediska všestranného využití jističe, neboť ho bude možno použít v sítích stejnosměrných i střídavých, s frekvencí 50Hz i 400Hz.

Abstract

Securing of electrical devices is important not only to protect against destruction under the effects of electric current, but also for protection of people or animals against electric shock. With increasing of living standards goes hand in hand increasing of the electricity consumption. Therefore In the grid of low voltage, there are increasing short-circuit currents. With improving technology is posed considerable demand on the performance, security and switching capacity of circuit breakers. This thesis is oriented on development of thermal and electromagnetic switch of circuit breaker on which is put a big demand in development of new types of circuit breakers. The thesis is interesting because of comprehensive use of circuits' breakers since it can be used in AC and DC networks with frequency of 50 Hz and 400 Hz.

Klíčová slova

Jistič, výkonový jistič, proudová hustota, Joulovy ztráty, tepelná spoušť, zkratová spoušť, ztrátový výkon, úbytek napětí, topítko, OEZ

Keywords

Circuit breaker, moulded case circuit breakers, Joule heat, current density, thermal trip unit, short circuit trip unit, power dissipation, voltage drop, heater, OEZ

DOSTÁL, L. *Simulace nadproudové spouště jističe*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 43 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Simulace 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 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 a společnosti OEZ při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne Podpis autora



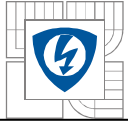
OBSAH

1 ÚVOD	11
2 ELEKTRICKÝ PROUD	12
2.1 HUSTOTA ELEKTRICKÉHO PROUDU	12
3 JISTIČ	13
3.1 MODULÁRNÍ JISTIČ	13
3.2 VÝKONOVÝ JISTIČ	15
3.2.1 PRINCIP VYBAVENÍ TEPELNÉ SPOUŠTĚ.....	16
3.2.2 PRINCIP VYBAVENÍ ZKRATOVÉ SPOUŠTĚ	17
3.3 NOVÁ GENERACE JISTIČŮ	18
3.3.1 ELEKTRONICKÝ JISTIČ 1. GENERACE.....	18
3.3.2 ELEKTRONICKÝ JISTIČ 2. GENERACE.....	19
3.3.3 ELEKTRONICKÝ JISTIČ 3. GENERACE.....	20
3.4 ROGOWSKÉHO CÍVKA	21
3.4.1 PRINCIP ROGOWSKÉHO CÍVKY.....	22
4 MODEL PROUDOVÉ DRÁHY JISTIČE	23
4.1 ZMĚNA GEOMETRIE PROUDOVÉ DRÁHY JISTIČE XX	23
4.2 SIMULACE PROUDOVÉ CESTY V PROGRAMU ANSYS	24
4.2.1 ROZDĚLENÍ MODELU NA KONEČNÉ PRVKY	24
4.2.2 ZADÁNÍ PODMÍNEK SIMULACE.....	25
5 ZÍSKANÉ HODNOTY PRO STEJNOSMĚRNÝ PROUD	26
5.1 ÚBYTEK NAPĚTÍ	26
5.2 ROZLOŽENÍ HUSTOTY PROUDU	27
5.3 JOULOVY ZTRÁTY	27
5.4 GRAFY S HODNOTAMI PRO STEJNOSMĚRNÝ PROUD	28
6 KONTROLNÍ MĚŘENÍ	30
7 POVRCHOVÝ JEV – SKINEFEKT	31
8 OVĚŘENÍ MKP POMOCÍ VZOROVÉHO PŘÍKLADU	33
8.1 VZOROVÝ PŘÍKLAD Č. 1 – NUMERICKÝ VÝPOČET	35
8.2 VÝPOČET POMOCÍ MKP – ANSYS	36
8.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ OBOU METOD	38
9 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ AC A DC	39
10 ZÁVĚR	41
11 POUŽITÁ LITERATURA	42
12 PŘÍLOHY	43



Seznam obrázků

<i>Obrázek 3-1: Modulární jistič.....</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 3-2: Charakteristika jističe LPN dle normy ČSN. [2]</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3-3: Výkonový jistič BD. [2]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3-4: Ilustrační popis tepelné spouště. [2]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3-5: Ilustrační popis zkratové spouště. [2]</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 3-6: První generace elektronického jističe.</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 3-7: Druhá generace elektronického jističe.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 3-8: Třetí generace elektronického jističe.</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3-9: Porovnání magnetizační charakteristiky feromagnetika (měř. transf.) a vzduchu (Rogowského cívka).....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 3-10. Rogowského cívka. [3]</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 5-1: Ztrátový výkon PD jističe XX (2 mm; typ proudu DC).</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 5-2: Ztrátový výkon PD jističe XX (3 mm; typ proudu DC).</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 7-1: Závislost hloubky vniku na materiálu a frekvenci proudu.</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 8-1: Činitel ks.[4]</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 8-2: MKP - Stejnoseměrný proud 400 A.</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 8-3: MKP - Střídavý proud 400 A; 50 Hz.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 8-4: Střídavý proud 100 A; 400 Hz.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 8-5: Nedostatečná volba prvků pro simulaci při AC 100 A, 400 Hz.</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 9-1: Porovnání ztrátového výkonu PD pro AC a DC, PD je vyrobena z bronzu.</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 9-2: Porovnání ztrátového výkonu PD pro AC a DC, PD je vyrobena z mosazi.</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 9-3: Porovnání ztrátového výkonu PD pro AC a DC, PD je vyrobena z nikelinu.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 9-4: Porovnání ztrátového výkonu PD pro AC a DC, PD je vyrobena z mědi.....</i>	<i>40</i>



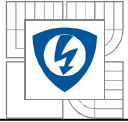
Seznam tabulek

<i>Tabulka 3-1: Jmenovité hodnoty výkonového jističe BD.</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 6-1: Tabulka s kontrolním měřením na vzorcích PD jističe XX.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 7-1: Hloubka vniku v závislosti na materiálu a frekvenci proudu.</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 8-1: Vzorový příklad.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 8-2: Absolutní chyba simulace pomocí metody MKP.</i>	<i>38</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AC	střídavý elektrický proud
DC	stejnoseměrný elektrický proud
f	frekvence
I	elektrický proud
I_n	jmenovitá hodnota elektrického proudu
J	hustota elektrického proudu
MKP	Metoda Konečných Prvků
PD	proudová dráha (topítka)
$P_{Z,BEZ}$	ztrátový výkon na modelu bez otvorů pro snýtování
$P_{Z,AC}$	ztrátový výkon, střídavý proud
$P_{Z,DC}$	ztrátový výkon, stejnosměrný proud
$P_{Z,OT}$	ztrátový výkon na modelu s otvory pro snýtování
Q	elektrický náboj
R_T	činný odpor vodiče
S	obsah průřezu vodiče
t	čas
$U_{BEZ,OT}$	úbytek napětí u modelu bez otvorů pro snýtování
$U_{MĚŘ}$	úbytek napětí na zkušebním modelu
U_{OT}	úbytek napětí u modelu s otvory pro snýtování
U_{sim}	úbytek napětí získaný simulací
μ	permeabilita
γ	konduktivita – měrná elektrická vodivost
ρ	rezistivita materiálu
δU_{sim}	procentuální chyba měření úbytku napětí
δ	hloubka vniku

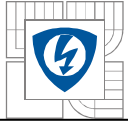


1 ÚVOD

Možnost ochrany člověka nebo domácích zvířat před účinky elektrického proudu se od první poloviny 20.století, kdy došlo k masovému rozšíření elektřiny (elektrifikace obcí a výstavba elektráren) do současnosti důkladně propracovalo. Během užívání elektrických spotřebičů je úraz elektrickým proudem v dnešní době výjimečnou záležitostí. Nikdy by se ale bezpečnost před úrazem elektrickým proudem neměla podceňovat. Jakékoliv opomenutí nebo zanedbání příslušných ochranných opatření může být životu nebezpečno. Jelikož musí být dodržovány určité směrnice a zákony, jsou vytvořeny normy ČSN (EN, ISO), které se musejí dodržovat.

Jeden z nejdůležitějších přístrojů v jištění proti zkratu je jistič. Toto samočinně vypínací zařízení s velkým vypínacím proudem se skládá z kontaktní soustavy, zhášecích komor, poháněcího mechanismu, spouště a relé. Podstatou celého mechanického systému jističe je jeho rychlé vybavení při nadproudu, kde vyhodnocení vybavení jističe zabezpečuje tepelná a zkratová spoušť.

S těmito nadproudovými spouštěmi se v této práci seznámíme a jejich modely upravíme pro kompatibilitu s výpočtním programem ANSYS a následně bude proveden výpočet proudové hustoty spouště jističe včetně ztrátového úbytku napětí pro stejnosměrný proud a střídavý proud o frekvenci 50 a 400 Hz.



2 ELEKTRICKÝ PROUD

Pojmem elektrický proud rozumíme uspořádaný pohyb elektrických nábojů v určitém směru. Dohodnutý směr toku ss. proudu je od kladného pólu zdroje, přes spotřebič k zápornému pólu zdroje. Tento směr je bohužel ke skutečnému směru toku elektronů opačný.

Velikost elektrického proudu vyjadřuje vzorec (2.1), kde proud je dán množstvím elektrických nábojů, které projdou vodičem za jednotku času.

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{[C]}{[s]} = [A] \quad (2.1)$$

Kde: Q elektrický náboj [C]
 t čas [s]

2.1 Hustota elektrického proudu

Velikost hustoty elektrického proudu je určena podílem toku elektrického proudu procházejícím daným elementem průřezu vodiče. Doporučené značení proudové hustoty je písmeno **J** a jednotkou je $[A \cdot m^{-2}]$, tedy 1 ampér na metr čtverečný.

$$J = \frac{I}{S} = \frac{[A]}{[m^2]} = [A \cdot m^{-2}] \quad (2.2)$$

Kde: I elektrický proud [A]
 S průřez vodiče $[m^2]$

V odborné literatuře se můžeme často setkat i s užíváním jednotky $[A \cdot mm^{-2}]$. Převod mezi jednotkami je dán vztahem:

$$1 [A \cdot m^{-2}] = 10^{-6} [A \cdot mm^{-2}] \quad (2.3)$$

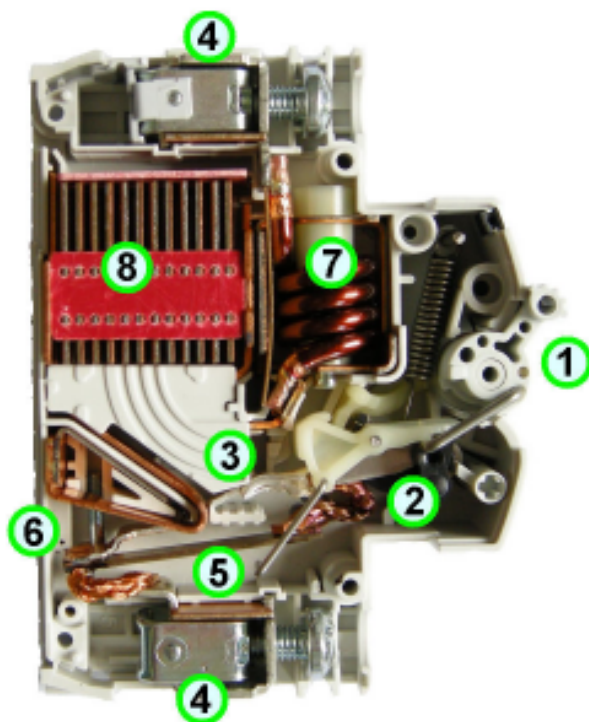
3 JISTIČ

Samočinné vypínací zařízení, které v jednom přístroji zajišťuje funkci jištění i vypínání. Při zapnutí jističe se vypínací pružina napne pomocí natahovacího mechanismu. Pružina zpětně působí na pohyblivé kontakty při vypínání. V zapnuté poloze je jistič zablokován pomocí zámku. Při nadproudu či zkratu je vybavovací mechanismus uvolněn a dojde k rozpojení kontaktu. Reakční doba mechanismu je při zkratu 3 – 4 ms. Takto dlouhá odezva není vhodná pro jištění polovodičů, kde se pro jejich ochranu používají pojistkové systémy.

Při vypínání malých nadproudů má jistič obvod s tepelným prvkem, jehož teplota je závislá na proudovém zatížení ($I^2 \cdot t$). Kromě toho toto čidlo teploty integruje i okolní účinky oteplení nebo ochlazení. Velikost a konstrukce tepelného prvku (nadproudové ochrany) jističe určuje jeho proudovou kapacitu. Jističe s tepelnou ochranou jsou vhodné zejména pro jištění vedení. [1]

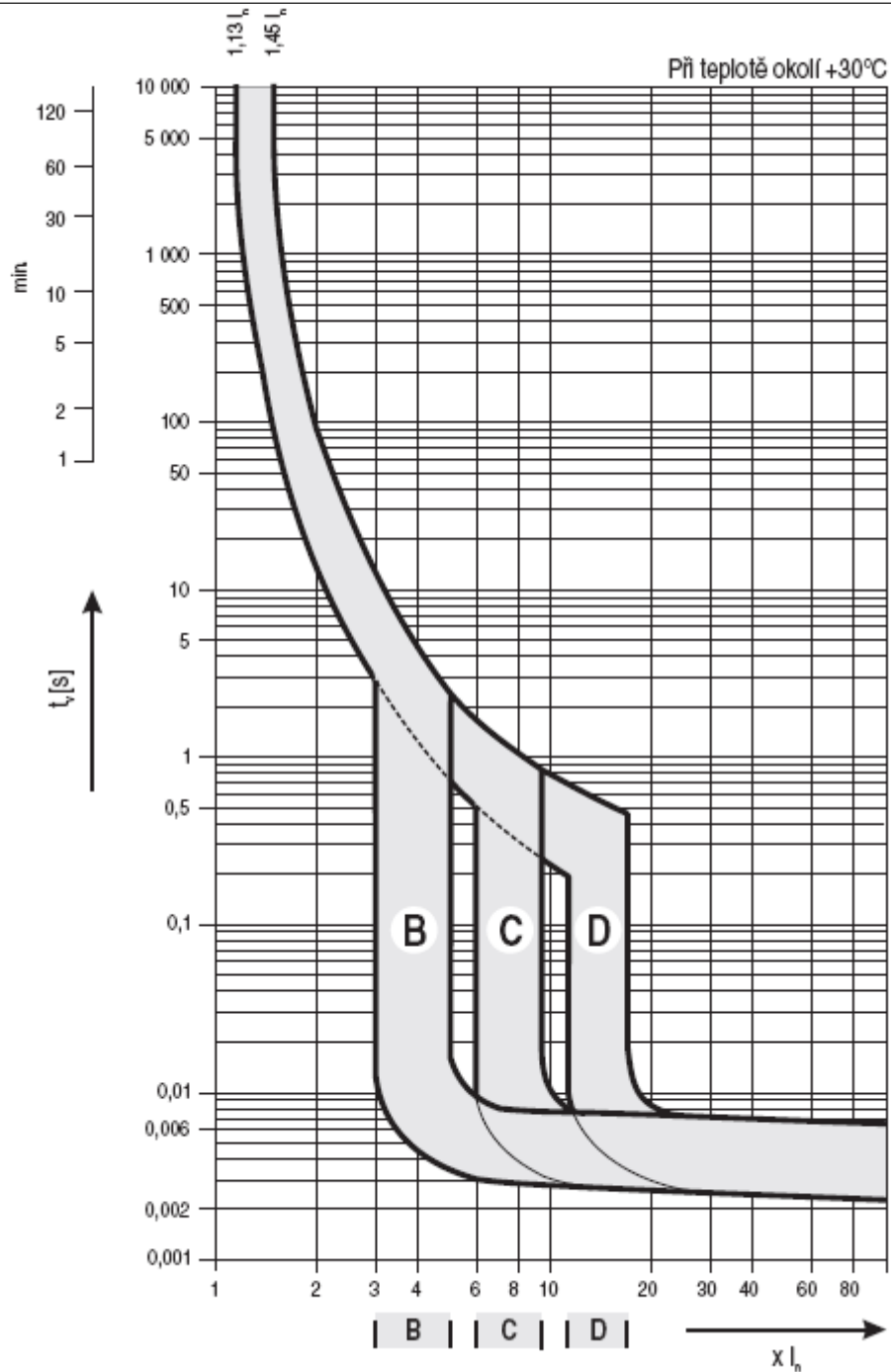
3.1 Modulární jistič

Jističe pro vedení jsou nadproudové ochranné přístroje, které je možné po automatickém vypnutí opět manuálně zapnout. Obsahují tepelnou a magnetickou spoušť a chrání vedení i zařízení jak proti přetížení, tak i proti zkratu. Obě spouště jsou zapojeny za sebou. Při přetížení vedení se zahřeje bimetal a vypne jistič. Při zkratu odblokuje elektromagnetická spoušť zámek jističe. Úderná kotva odpojí kontakt dříve, než zkratový proud dosáhne maxima. Jističe LPN se vyrábějí pro jmenovitý proud 0,2A – 63A.



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

Obrázek 3-1: Modulární jistič.



Obrázek 3-2: Charakteristika jističe LPN dle normy ČSN. [2]

Charakteristika B: pro jištění elektrických obvodů se zařízením, která nezpůsobují proudové rázy (světelné a zásuvkové obvody apod.). Zkratová spoušť nastavena na $(3 \div 5)I_n$.

Charakteristika C: pro jištění elektrických obvodů se zařízením, která způsobují proudové rázy (žárovkové skupiny, motory apod.). Zkratová spoušť nastavena na $(6 \div 9)I_n$.

Charakteristika D: pro jištění elektrických obvodů se zařízením, která způsobují vysoké proudové rázy (transformátory, 2p. motory apod.) Zkratová spoušť nastavena na $(12 \div 16)I_n$.

3.2 Výkonový jistič

Je ochranný vypínací přístroj, který umí bezpečně vypnout provozní proudy, proudy při přetížení a zkratové proudy. Vypíná při poruše v kterékoli ze tří fází a to současně všechny tři, čím zabrání běhu trojfázového přístroje jenom na dvě fáze. Tepelná a elektromagnetická spoušť se nastavují odděleně. Tím je možné docílit selektivity vzhledem k jističům, které jsou zařazeny před i za výkonovým jističem.



Obrázek 3-3: Výkonový jistič BD. [2]

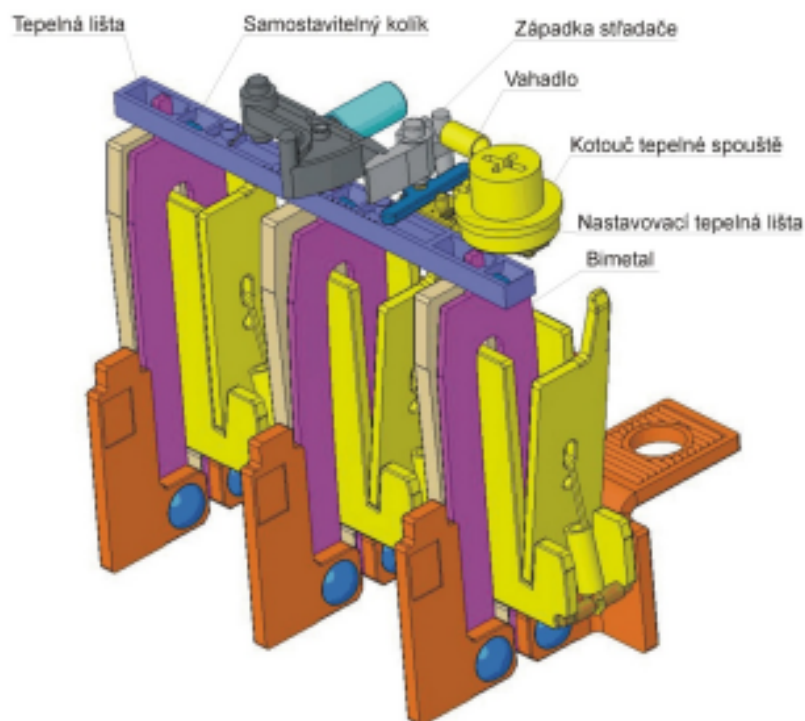
Parametry	Hodnoty
Jmenovitý proud	100, 160, 200, 250A
Jmenovité pracovní napětí	690V a.c.
Jmenovitý kmitočet	50 - 60 Hz
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost 230V	100 kA
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost 400V	65 kA
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost 500V	25 kA
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost 690V	13 kA
Jmenovitá mezní zkratová zapínací schopnost 415V	140 kA

Tabulka 3-1: Jmenovité hodnoty výkonového jističe BD.

3.2.1 Princip vybavení tepelné spouště

Při nadproudu dojde ke zvětšení průhybu bimetalu. Ten svým horním koncem zatlačí do kolíku zatmeleného v tepelné liště. Tato lišta prostřednictvím vahadla převede svůj posuv na západku střadače, která po dostatečném otočení uvolní páku střadače. Páka střadače pak vybaví mechanismus jističe.

Pro nastavení jmenovitého proudu tepelné spouště slouží kotouč tepelné spouště. Ten je na spodu vybaven labyrintem s jeho pomocí lze posouvat nastavovací tepelnou lištu. Mechanismus musí být velice čistý a volný, aby k vymezení všech vůlí docházelo výhradně silou bimetalu.



Obrázek 3-4: Ilustrační popis tepelné spouště. [2]

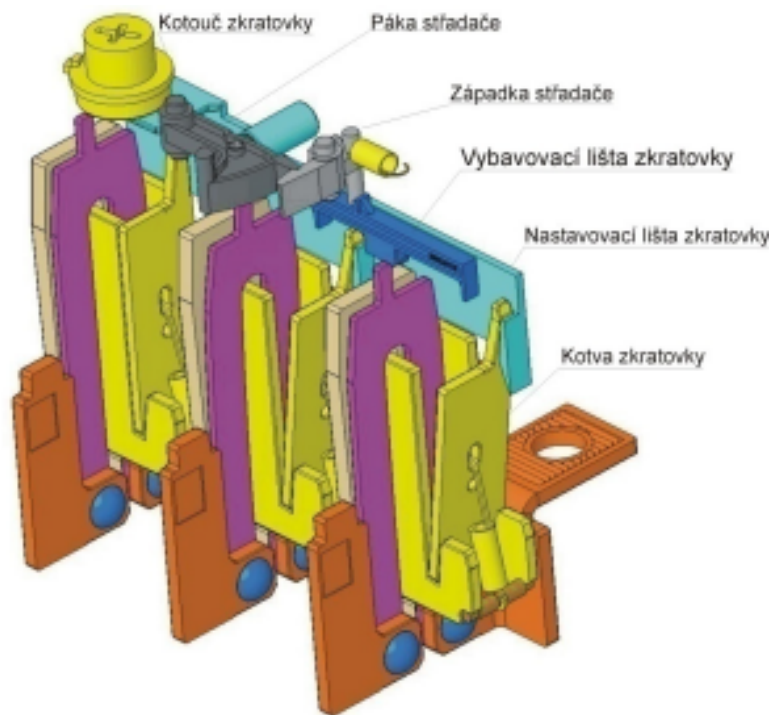
Základní parametr tepelné spouště je ztrátový výkon vyhřívacího topítka. Pro jeho volbu existuje řada kritérií:

- 1) Ztrátový výkon topítka musí být maximálně takový, aby rozdíl teplot a tím i průhybu byl v intervalu $1,05 - 1,2 \times I_n$ dostatečný pro bezpečné vybavení jističe.
- 2) Ztrátový výkon topítka musí být maximálně takový, aby teplota v okolí uložení bimetalu nepřekročila dovolenou teplotu pro provoz plastu, ve kterém je bimetal uložen.

3.2.2 Princip vybavení zkratové spouště

Při nadproudu dojde k přitažení kotvy zkratovky. Ta svým horním koncem udeří do vybavovací lišty zkratovky. Tato lišta uvede do pohybu západku střídače, která po dostatečném otočení uvolní páku střídače, jenž vybaví páku mechanismus jističe.

Pro nastavení jmenovitého proudu zkratové spouště slouží kotouč zkratovky. Ten je na své spodní straně vybaven labyrintem, s jehož pomocí lze posouvat nastavovací lištu zkratovky. Ta potom zvětší nebo zmenší vzduchovou mezeru.



Obrázek 3-5: Ilustrační popis zkratové spouště. [2]

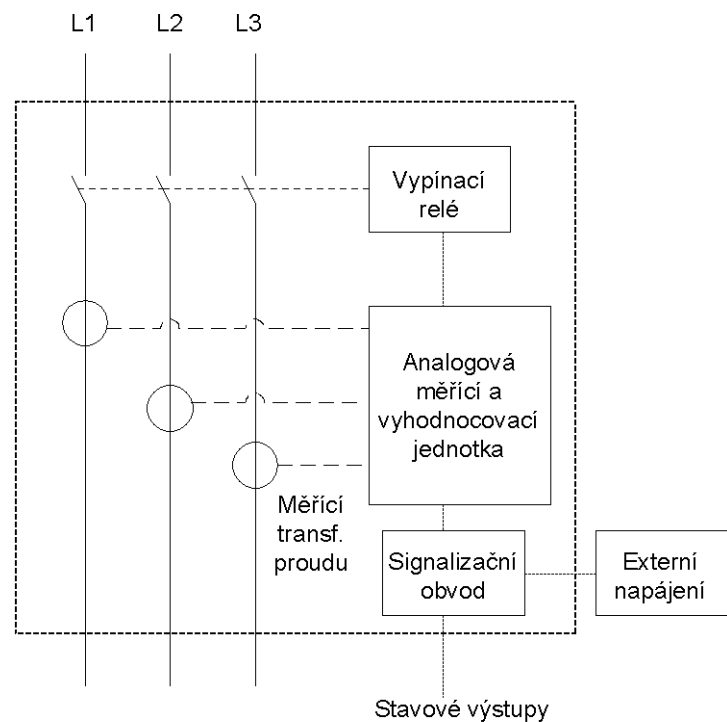
Zkratová spoušť je zde tvořena jedním průvlekem (bimetal a topítko), kotvou, pružinou a hřídelí pružiny. Pro různé proudové rozsahy je možné použít různé materiály, pružina je pro každý proudový rozsah jiná. Zkratová spoušť je nastavitelná zpravidla v rozsahu $(5 - 10) \times I_n$.

3.3 Nová generace jističů

Jistící přístroje v posledních patnácti letech prošly velkou inovací. Změna se projevila jak na jistících funkcích, tak i na přídatných funkcích pro měření parametrů jištěného obvodu a jejich předávání do nadřazeného řídicího systému. Vývoj postupně prošel třemi generacemi:

3.3.1 Elektronický jistič 1. Generace

Proud, který protéká proudovou dráhou jističe je vyhodnocen analogově a pomocí proudového transformátoru s listěným jádrem, které zároveň napájí vyhodnocovací obvody a vypínací relé. Vyhodnocovací jednotka umožňuje vyvedení analogového signálu pro dálkové měření, to již musí být doplněno o externí napájení.

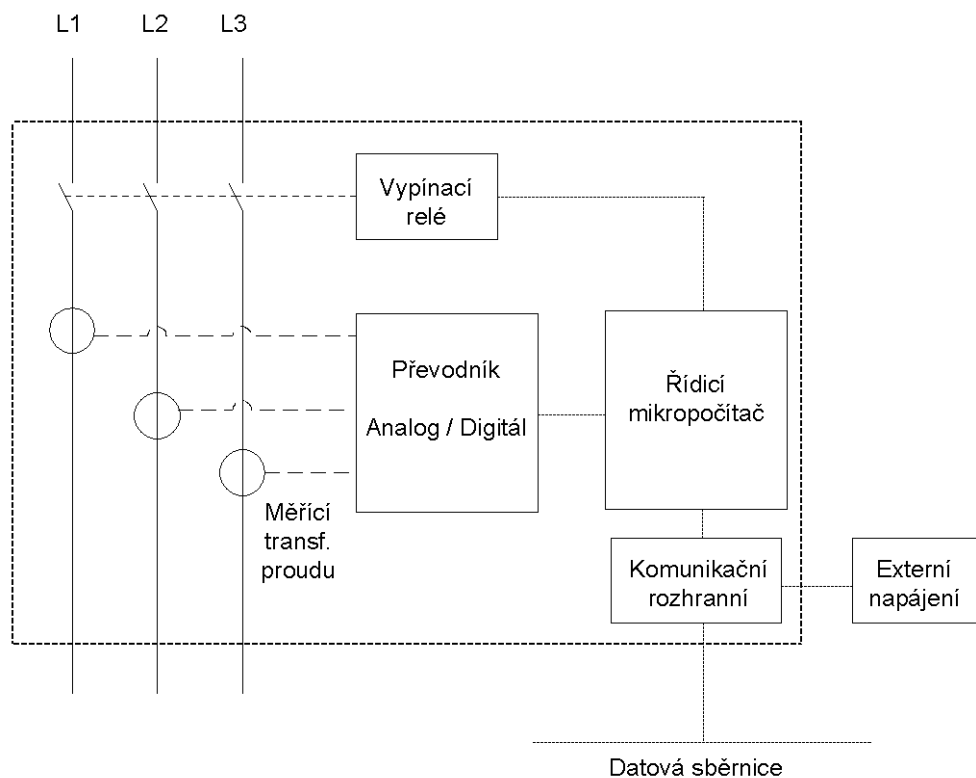


Obrázek 3-6: První generace elektronického jističe.

3.3.2 Elektronický jistič 2. Generace

Proud protékající proudovou dráhou jističe je změřen pomocí měřících transformátorů proudů. Jejich analogový výstup je zpracován v převodníku a k dispozici je digitální signál, který je v mikropočítači vyhodnocen. Dojde-li k vyhodnocení, že protékající proud jističem je větší než povolený, mikropočítač aktivuje vypínací relé a dojde k vybavení jističe.

Komunikační rozhraní řídicího mikropočítače umožňuje výměnu dat s nadřazeným systémem po sériové sběrnici. Napájení elektrického obvodu zajišťující základní funkce jističe (jištění nadproudu a zkratu) je z měřících transformátorů proudu. Komunikační rozhraní a trvale měřící obvody jsou napájeny z externího zdroje.

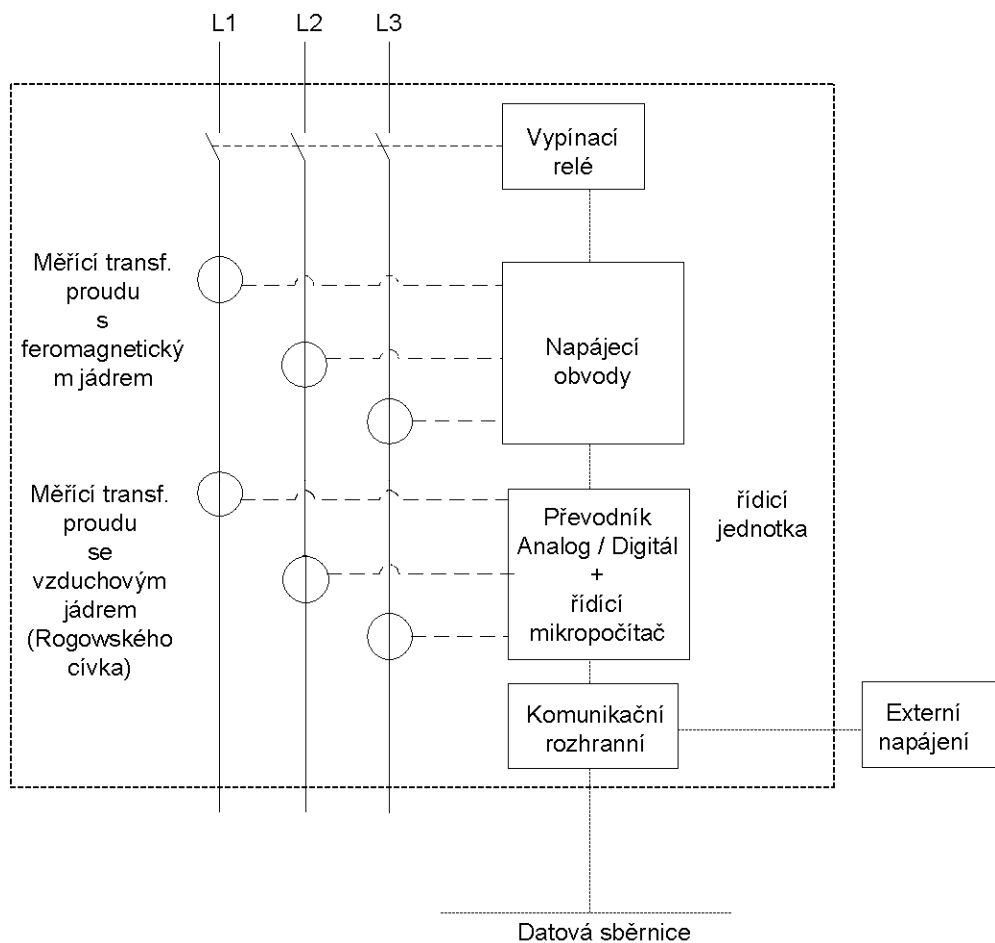


Obrázek 3-7: Druhá generace elektronického jističe.

3.3.3 Elektronický jistič 3. Generace

Jistič se z hlediska použití digitální technologie příliš neliší od druhé generace. Velkou změnou v této generaci je oddělení napájení základních elektronických obvodů.

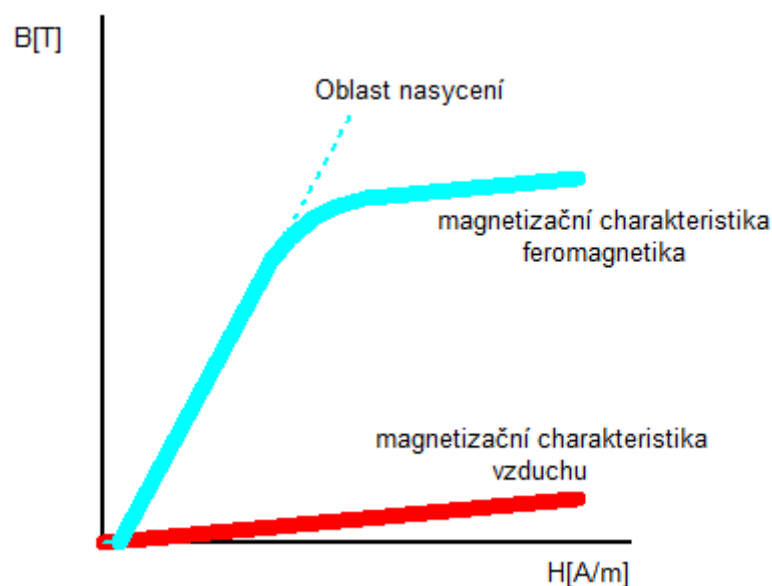
Napájecí obvody jističe 3. Generace jsou realizovány pomocí proudového transformátoru v provedení s listěným jádrem. Měřicí obvody jsou realizovány pomocí proudového transformátoru s toroidním vinutím a vzduchovým jádrem – Rogowského cívka. Komunikační rozhraní a trvale měřicí obvody jsou opět napájeny z externího zdroje.



Obrázek 3-8: Třetí generace elektronického jističe.

3.4 Rogowského cívka

Senzor pro přesné měření velkého rozsahu proudu s vynikající přesností. Její hlavní předností je lineární charakteristika. Jde o toroidní cívku bez železného jádra (vzduchovou cívku) umístěného kolem primárního měřeného vodiče stejným způsobem jako sekundární vinutí proudového transformátoru. Rozdíl mezi nimi je ve výstupním signálu. U proudového transformátoru je výstupní signál v podobě proudu, zatímco u Rogowského cívky je výstupní signál napětí. Magnetizační křivka feromagnetického materiálu listěného jádra umožňuje navrhnout proudový transformátor tak, aby pracoval již při nízkých protékajících proudech, celková charakteristika je ve velkém rozsahu díky nasycení magnetického obvodu výrazně nelineární. Magnetizační charakteristika Rogowského cívky je lineární v širokém rozsahu proudu. Výsledný signál tvaru vlny primárního proudu je získán integrací získaného napěťového signálu.



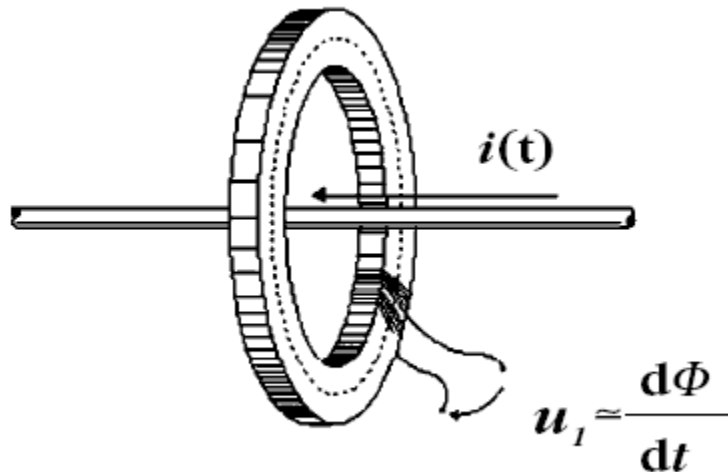
Obrázek 3-9: Porovnání magnetizační charakteristiky feromagnetika (měř. transf.) a vzduchu (Rogowského cívka).

3.4.1 Princip Rogowského cívky

Je možné ji popsat jako měřicí prvek, který měří změny proudu ve sledovaném vodiči díky indukovanému napětí ve vodiči cívky. Princip je podobný jako u běžného transformátoru, kde střídavý proud sledovaného vodiče vytváří kolem sebe střídavé magnetické pole, jenž způsobí indukci napětí ve vodiči Rogowského cívky. Výsledné napětí je úměrné změně magnetického toku a tedy i hodnotě střídavého proudu, který ho vyvolal.

Nejvýhodnější metodou pro zpracování napěťového výstupu cívky je napětí elektronicky integrovat. Integrovaný výstup je frekvenčně nezávislý a přesně zobrazuje průběh měřeného proudu. Použitím vhodných integrátorů lze měřit proud od hodnot menších než je jeden ampér až do několika milionů ampér.

Pevná Rogowského cívka má větší přesnost a stabilitu než ohebné cívky a jsou mimořádně odolné proti rušení vnějšími magnetickými poli. Jsou vhodnější pro měření malých proudů a nižších frekvencí. Určitým nedostatkem tohoto řešení je výstupní napětí, které odpovídá zhruba 1 mV/A.



Obrázek 3-10. Rogowského cívka. [3]



4 MODEL PROUDOVÉ DRÁHY JISTIČE

Od společnosti OEZ jsem získal pro uskutečnění simulací výkres proudové dráhy jističe s označením XX. U jističe XX je použit podobný princip vybavení tepelné i zkratové části popsané v kapitole (3.2.1,2).

4.1 Změna geometrie proudové dráhy jističe XX

Pro použití modelu proudové dráhy jističe XX v simulačním programu ANSYS je zapotřebí upravit jeho geometrii, a to tak, aby kontaktní plochy dvou objemu na sebe navazovaly vždy celou styčnou plochou.

Pro budoucí úpravy geometrie je doporučeno výsledný model složit z více objemu, neboť při dodatečných konstrukčních úpravách se vyhneme překreslování celého modelu.

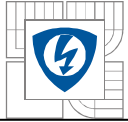
Upravená geometrie proudové dráhy jističe XX je sestaven z jednotlivých objektů a následně spojena pomocí vazeb v programu SolidWorks.

Přívodní styčná plocha není vyrobena z jednoho objektu, ale pospojována z 10-ti objektu, čímž dojde ke splnění podmínky styčných ploch kontaktních objemů a můžeme připojit komponent, který umožní usazení celého topítka do plastového šasi jističe XX.

Pro získání přesné proudové hustoty na simulovaném modelu je zapotřebí připojit tento model do reálných podmínek, ve kterých se v jističi bude nacházet. Je tedy nutné styčné plochy určené pro připojení měděných pásů v jističi připojit k pomocným pásům, které v simulacích nahradí uspořádaný pohyb elektrických nábojů směřující do proudové cesty jističe XX. Ztráty vzniklé v pomocných pásech jističe nebudou ve výsledcích zahrnuty.

Délka pomocného pásu připojeného na proudovou dráhu jističe XX je dvojnásobná styčné ploše simulovaného modelu. Tloušťka pomocného pásu je zvolena na 2 mm. Tato tloušťka bude zachována i při změně tloušťky proudové cesty jističe XX.

Nyní je model proudové cesty jističe XX připraven pro implementování do simulačního programu ANSYS, kde budou zadány okrajové podmínky nutné pro výpočet, model bude rozdělen na konečné prvky a následně bude proveden výpočet s metodou konečných prvků.



4.2 Simulace proudové cesty v programu ANSYS

Program ANSYS je jeden z hlavních programů pro počítačové simulování. Získané poznatky vedou k řešení problémů, kterou mohou vést například ke změně výrobní metody, materiálů, nebo odstranění konstrukčních nedostatků.

Možnost analýz v programu ANSYS je nespočetně. Zvládne jakékoliv výpočty, které se opírají o fyzikální zákony (mechanické či tepelné zatížení, elektromagnetismus atd.).

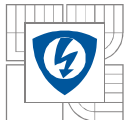
ANSYS velmi dobře spolupracuje s moderními parametrickými CAD systémy. Touto spoluprací se naskytuje možnost použít geometrii z parametrického systému, jako je např. (SolidWorks, Autodesk Inventor atd.). Geometrii simulovaného modelu tak nemusíme vytvářet přímo v prostředí ANSYS, ale můžeme se zaměřit pouze na samotnou simulaci.

4.2.1 Rozdělení modelu na konečné prvky

Metodu konečných prvků je možno využít k řešení všech okrajových úloh inženýrské praxe popsanych diferenciálními rovnicemi. Metoda byla vyvinuta s nástupem digitální technologie k řešení úloh z pružnosti a pevnosti v leteckém průmyslu ke konci padesátých let. V krátké době se rozšířila do všech technických oblastí. Podobně jako v metodě konečných diferencí, kde jsou uzly, uzlové potenciály a pole rozloženy rovnoměrně, u metody konečných prvků mohou být uzly rozloženy v oblasti nerovnoměrně a mohou tak sledovat tvar hraničících ploch. V místech, kde dochází k velké změně hraničících ploch, se použije větší hustota sítě.

Soustava rovnic se sestaví pro neznámé uzlové hodnoty. Koeficienty matice soustavy a pravých stran nejsou počítány z diferencí, nahrazujících derivace, ale jako jisté integrály přes elementární plošky nebo objemy, v jejichž vrcholech jsou uzly. Tyto elementární útvary jsou nazývány konečné prvky. [1]

Výsledná geometrie je rozdělena na cca 600 000 prvků.



4.2.2 Zadání podmínek simulace

Zadání podmínek je potřebné k úspěšnému provedení simulace. Pro simulaci rozložení hustoty proudu, Joulových ztrát a úbytku napětí je nutné nastavit rezistivitu materiálu, nulový potenciál proudové dráhy a hodnotu elektrického proudu.

- Rezistivita charakterizuje elektrickou vodivost látky v závislosti na teplotě. Čím je rezistivita větší, tím je menší vodivost dané látky. Čím větší je rezistivita, tím větší je elektrický odpor.

Simulace proudové cesty jističe XX bude prováděna s materiály:

Materiál pasu	ρ [$\Omega \cdot m$]
Měď	1,77E-08
Bronz	1,35E-07
Mosaz	7,10E-08
Nikelin	4,00E-07

Tabulka 4-1: Rezistivita materiálu potřebná pro okrajové podmínky simulace.

- Nulový potenciál je nutné zadat na vstupní hranu pomocných pasů, které jsou připojeny na model proudové cesty jističe XX.
- Jmenovitou hodnotu elektrického proudu je zapotřebí nastavit na hranu opačného pasu, než byl nastaven nulový potenciál.
- Nulový magnetický potenciál na stěny vzduchového bloku, který je okolo PD (pouze u střídavého proudu).

Po zadání rezistivity materiálu, nulového potenciálu, jmenovitého elektrického proudu a u střídavého proudu nulový magnetický potenciál do simulačního programu je model proudové dráhy připraven pro samotnou simulaci.



5 ZÍSKANÉ HODNOTY PRO STEJNOSMĚRNÝ PROUD

Po úspěšném výpočtu simulačního programu ANSYS je zapotřebí vykreslit vypočítané poznatky. K tomu nám dopomůže funkce „plot results“.

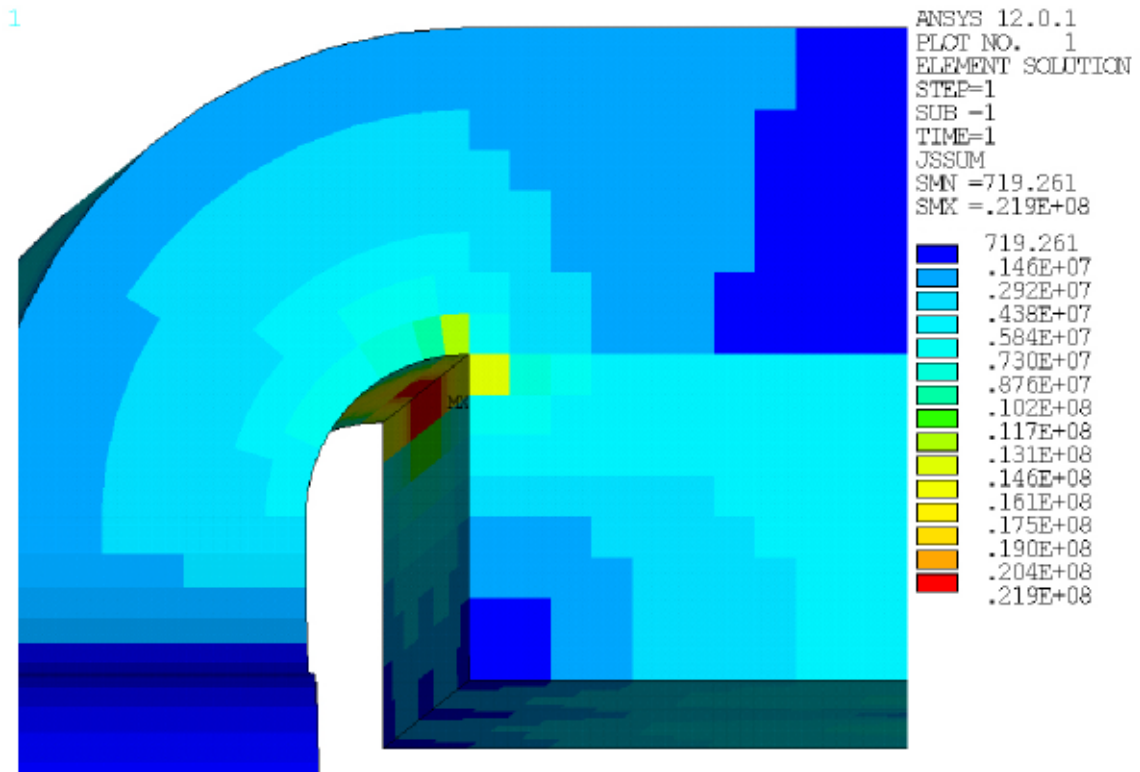
5.1 Úbytek napětí

Výpočet proběhl v naprostém pořádku a úbytek napětí je postupný dle rezistivity materiálu. Podle červené barvy, kterou je vykreslena poslední část proudové dráhy jističe XX je zjištěn celkový úbytek napětí na proudové dráze jističe XX.

Pro získání přesné hodnoty úbytku napětí na proudové dráze jističe XX (bez pomocných pasů) je zapotřebí zjistit rozdíl potenciálu dvou prvků, které vybereme pomocí kurzoru. Prvky budou zvoleny v oblasti kolem polovičního průměru otvorů na přívodním (výstupním) pasu. Nyní dostaneme správnou hodnotu.

5.2 Rozložení hustoty proudu

Díky poznatku proudové hustoty zjistíme, po které trajektorii je uskutečněn uspořádaný pohyb nositelů elektrického náboje. Číselné hodnoty simulace mají jednotku $[A \cdot m^{-2}]$.



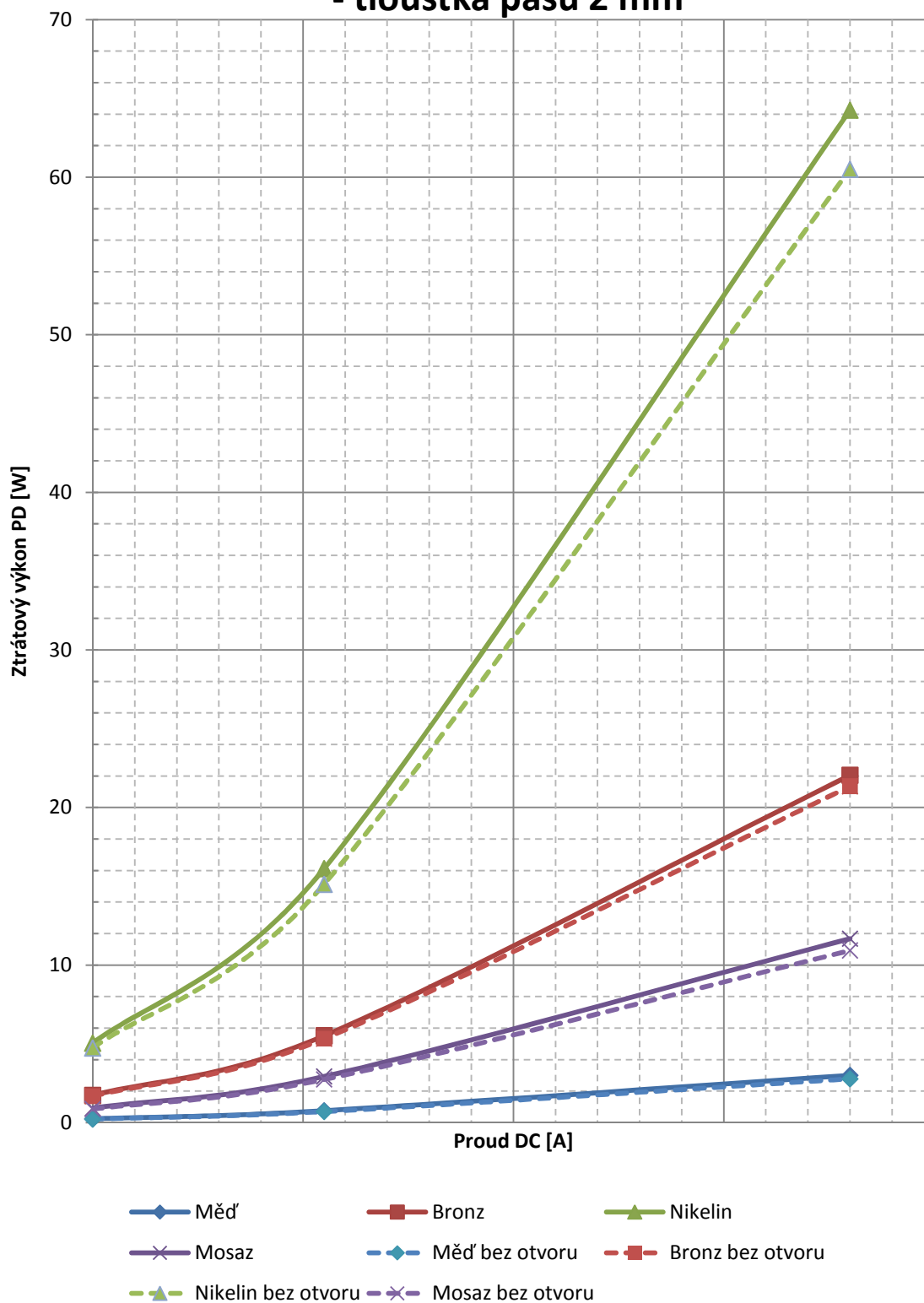
Obrázek 5-1: Rozložení proudové hustoty na PD jističe. Maximální hodnota.

5.3 Joulovy ztráty

Joulovy ztráty jsou ztráty, které vznikají v materiálu, kterým prochází elektrický proud. Jedná se o přeměnu elektrické energie na vnitřní energii. Zahřívání vodiče lze vysvětlit přenecháváním části kinetické energie částic, jež přenáší elektrický náboj (elektrony) částicím, které elektrický proud nepřenášejí (kladné ionty). Zvyšuje se tepelný pohyb částic a vodič se zahřívá. [5]

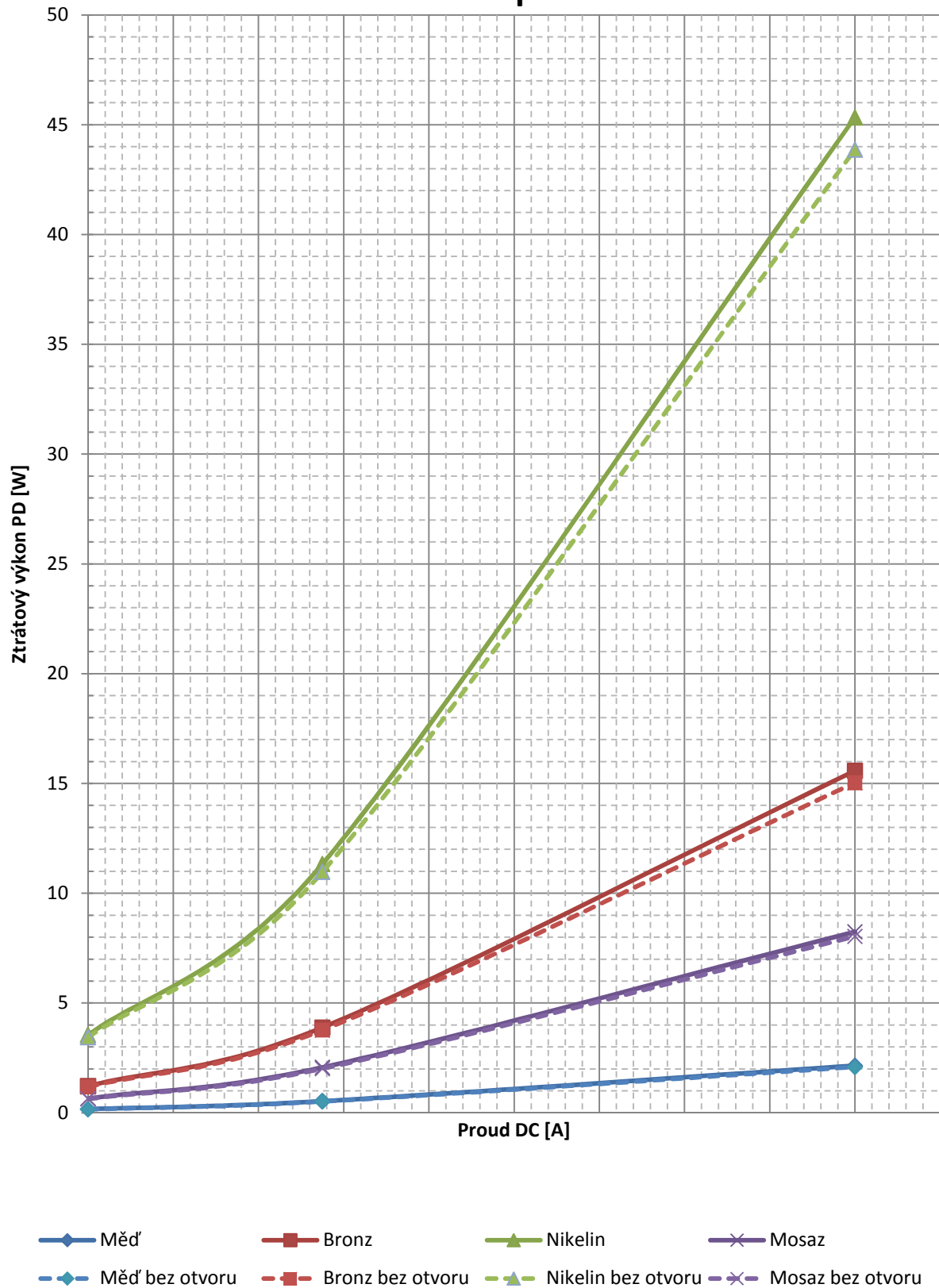
5.4 Grafy s hodnotami pro stejnosměrný proud

Ztrátový výkon PD jističe XX - tloušťka pásu 2 mm

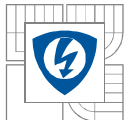


Obrázek 5-1: Ztrátový výkon PD jističe XX (2 mm; typ proudu DC).

Ztrátový výkon PD jističe XX - tloušťka pásu 3 mm



Obrázek 5-2: Ztrátový výkon PD jističe XX (3 mm; typ proudu DC).



6 KONTROLNÍ MĚŘENÍ

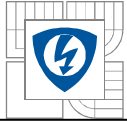
Pro ověření správnosti simulaci bylo provedeno kontrolní měření na zkušebních vzorcích. Proudová dráha jističe XX z materiálu nikelin nebylo možné změřit, neboť vzorek ještě neexistuje. Vzorky jsou pro lepší vodivost pokoveny technickým stříbrem.

Měření bylo provedeno na speciálním zařízení pro měření úbytku napětí na zkušebně OEZ v Letohradě. Naměřené výsledky jsou shrnuty v tabulce (tab. 6-1).

Tloušťka pasu 2mm	
Materiál topítka	chyba simulace
	[%]
Měď	11,2
Bronz	30,7
Nikelin	---
Mosaz	3,7

Tabulka 6-1: Tabulka s kontrolním měřením na vzorcích PD jističe XX.

Úbytky napětí na proudové cestě jističe XX byly měřeny za studena pro stejnosměrný proud. U materiálu měď se odchylka simulace od naměřené hodnoty na zkušebním vzorku odchýlila o 11,2 %. U simulace s materiálem mosaz vyšla odchylka pouze 3,7 %. Simulace s materiálem Bronz dosahuje odchylku 30,7 %. Simulace tohoto měření byla proto pro tento materiál měřena 3×, ale vždy vyšel podobný výsledek. Chyba je s největší pravděpodobností způsobena použitím jiné slitiny bronzu pro měřený a simulovaný vzorek a tím i rozdílem rezistivity obou vzorků.



7 POVRCHOVÝ JEV – SKINEFEKT

Proudová hustota je s intenzitou vázána lineárním vztahem:

$$\vec{J} = \gamma \cdot \vec{E} \quad (7.1)$$

Kde \vec{J} vektor hustoty elektrického proudu [A.m²]
 γ konduktivita – měrná elektrická vodivost [S/m]
 \vec{E} vektor intenzity elektrického pole [V/m]

Proudová hustota směrem od povrchu ubývá, neboť při průchodu střídavého proudu vodičem dochází k nerovnoměrnému rozložení proudové hustoty – vytěsnění proudu směrem k povrchu. Vytěsnění se nazývá povrchový jev. Vnitřek vodiče není k vedení proudu zcela využit, a proto se projeví růst činné rezistence. Zároveň vnitřní indukčnost vodiče, v porovnání s indukčností při rovnoměrném rozložení proudové hustoty, poklesne.

Za předpokladu, že frekvence proudu je dostatečně vysoká, dojde k zániku pole již v těsné blízkosti pod povrchem. Vlna postupující do vodiče má pak charakter vlny rovinné a mluvíme o vyhraněném povrchovém jevu.

Útlum postupující vlny určuje hloubka vniku δ , pro kterou je odvozen vzorec:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \frac{1}{\rho_T}}} \quad (7.2)$$

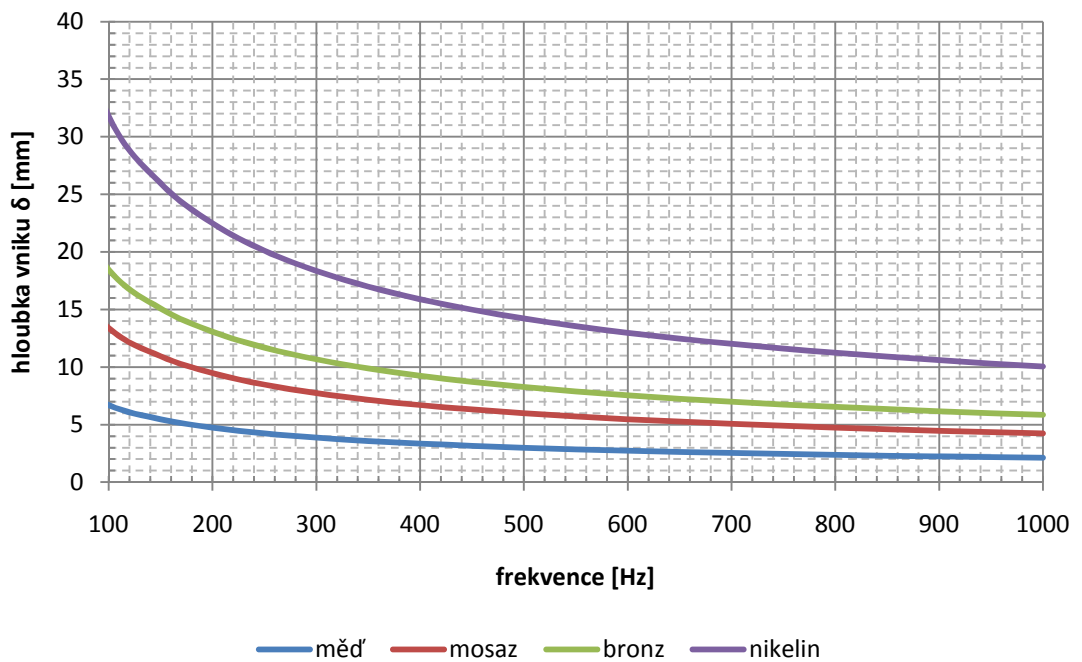
Kde: f frekvence protékajícího proudu [Hz]
 μ permeabilita [H/m]
 ρ_T měrný odpor materiálu vodiče při sledované teplotě [Ω .m]

Pro proudovou dráhu jističe XX jsou použity 4 různé materiály, které mají různou rezistivitu. Hloubka vniku δ pro tyto materiály a frekvenci 50 a 400 Hz je odlišná a proto je vyřešena v tabulce (tab.7-1). Podrobnější průběh hloubky vniku jsou zobrazeny na grafu (obr. 7-1).

Frekvence proudu	Hloubka vniku δ [mm]			
	měď	mosaz	bronz	nikelin
50 [Hz]	9,47	18,97	26,16	45,03
400 [Hz]	3,35	6,71	9,25	15,92

Tabulka 7-1: Hloubka vniku v závislosti na materiálu a frekvenci proudu.

Hloubka vniku δ



Obrázek 7-1: Závislost hloubky vniku na materiálu a frekvenci proudu.



8 OVĚŘENÍ MKP POMOCÍ VZOROVÉHO PŘÍKLADU

Pro ověření správnosti získaných výsledků z programu ansys je důležitý numerický výpočet vzorového příkladu. Tento výpočet porovnáme se simulací a odečteme absolutní chybu simulace. Vzorový příklad přídavných ztrát při průchodu průmyslovou frekvencí 50 a 400 Hz přímočarého plného vodiče bude z materiálu měď.

Činný odpor vodiče konstantního průřezu S a délce l je dán vztahem:

$$R_T = k_s \cdot \rho_T \cdot \frac{l}{S} \quad (8.1)$$

Kde: ρ_T měrný odpor materiálu vodiče při sledované teplotě [$\Omega \cdot m$]

Činitel k_s zahrnuje vliv povrchového jevu na velikosti činného odporu. Pro stejnosměrný proud, tento jev nevzniká, je $k_s = 1$. Pro střídavý proud je činitel odečten z grafu (Obr. 8-1) pomocí výrazu:

$$c = \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_T}} \quad (8.2)$$

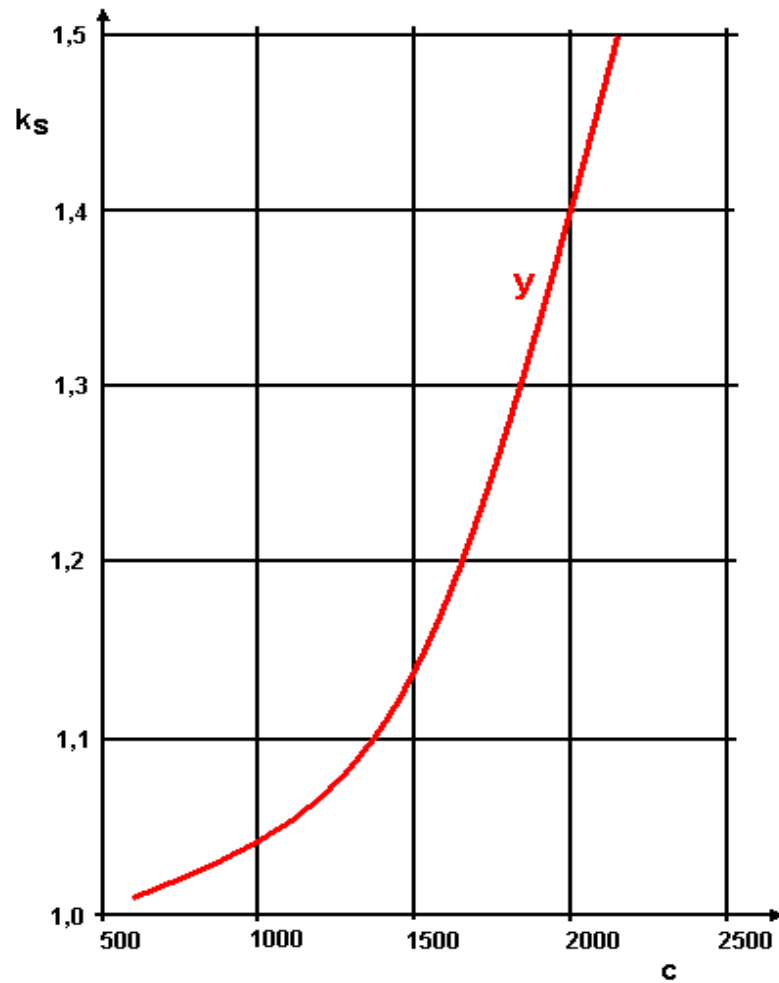
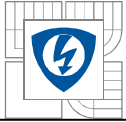
Kde: f frekvence protékajícího proudu [Hz]

ρ_T měrný odpor materiálu vodiče při sledované teplotě [$\Omega \cdot m$]

S průřez vodiče [m^2]

Matematicky je možno vyjádřit činitel povrchového jevu:

$$k_s = \varphi(c; y) \quad (8.3)$$

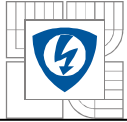


Obrázek 8-1: Činitel k_s . [4]

Vzorový příklad č.1	
ρ_T [$\Omega \cdot m$]	1,77000E-08
l [m]	1,00000E+00
d_1 [m]	4,24608E-02
S_1 [m^2]	1,41601E-03
f_1 [Hz]	50
c [-]	2,000E+03
k_s [-]	1,4

Vzorový příklad č.2	
ρ_T [$\Omega \cdot m$]	1,77000E-08
l [m]	1,00000E+00
d_2 [m]	1,50121E-02
S_2 [m^2]	1,77000E-04
f_2 [Hz]	400
c [-]	2,000E+03
k_s [-]	1,4

Tabulka 8-1: Vzorový příklad



8.1 Vzorový příklad č. 1 – numerický výpočet

Vzorový příklad č. 1

$$c = \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_T}} = \sqrt{\frac{1,41601e - 3 \cdot 400}{1,77e - 8}} = \sqrt{4000028,249} = 2000,007062 \doteq \underline{\underline{2e + 3 [-]}}$$

Z grafu na (Obr. 8-1) odečteme z funkce y činitel k_s

$$k_s = \varphi(c; y) = \underline{\underline{1,4 [-]}}$$

Činný odpor vodiče konstantního průřezu S o délce l a průmyslovou frekvenci f bude o 40% větší než činný odpor u stejnosměrného proudu, který má velikost:

$$R_{T,DC} = k_s \cdot \rho_T \cdot \frac{l}{S} = 1 \cdot 1,77e - 8 \cdot \frac{1}{1,41601e - 3} = \underline{\underline{1,25e - 8 [\Omega]}}$$

Ztrátový výkon vodičem, kterým bude procházet stejnosměrný proud, bude dán vztahem:

$$P_{Z,DC} = R_{T,DC} \cdot I^2$$

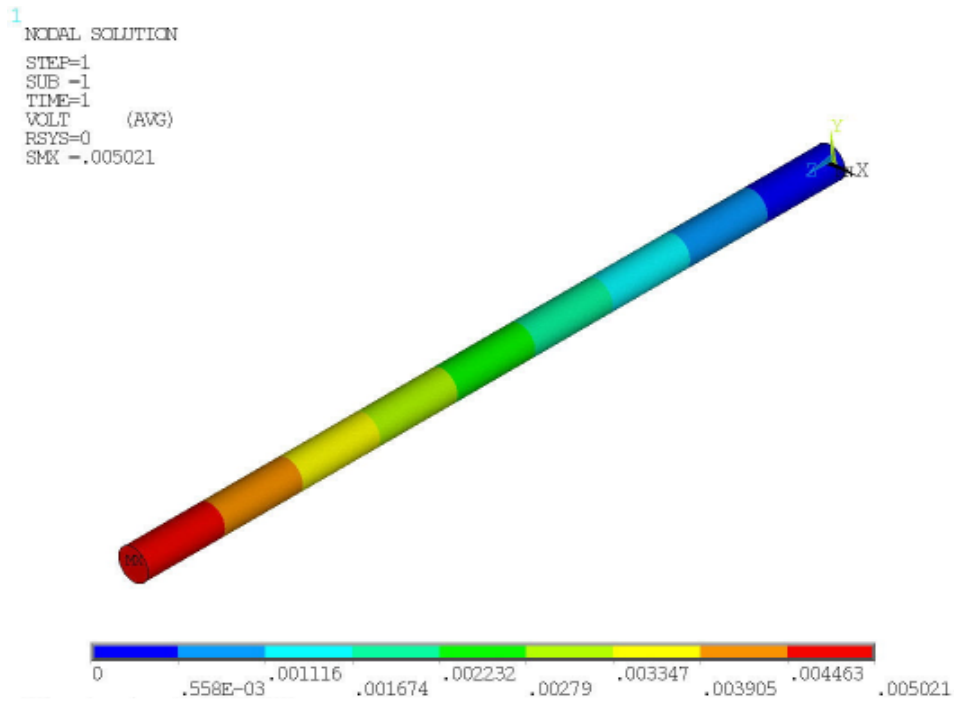
Pro stejnosměrný proud 400 A bude ztrátový výkon:

$$P_{Z,DC} = R_{T,DC} \cdot I^2 = 1,25e - 8 \cdot 400^2 = 1,999986 \doteq \underline{\underline{2 [W]}}$$

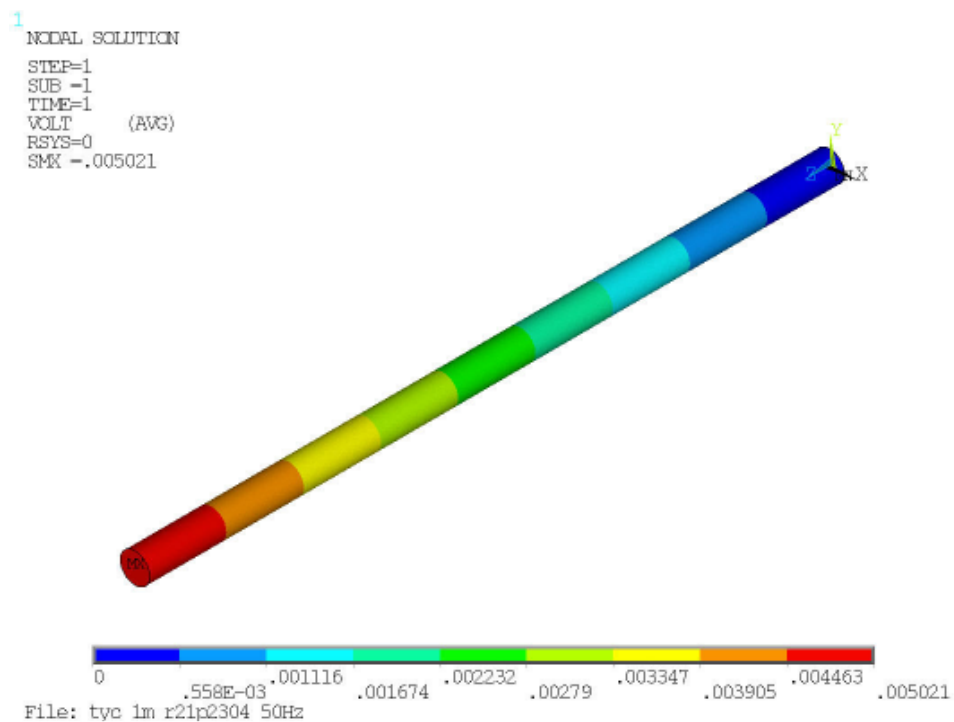
Pro střídavý proud 400 A o průmyslové frekvenci 50 Hz bude ztrátový výkon:

$$P_{Z,AC} = 1,4 \cdot R_{T,DC} \cdot I^2 = 1,4 \cdot 1,25e - 8 \cdot 400^2 = 2,79998 \doteq \underline{\underline{2,8 [W]}}$$

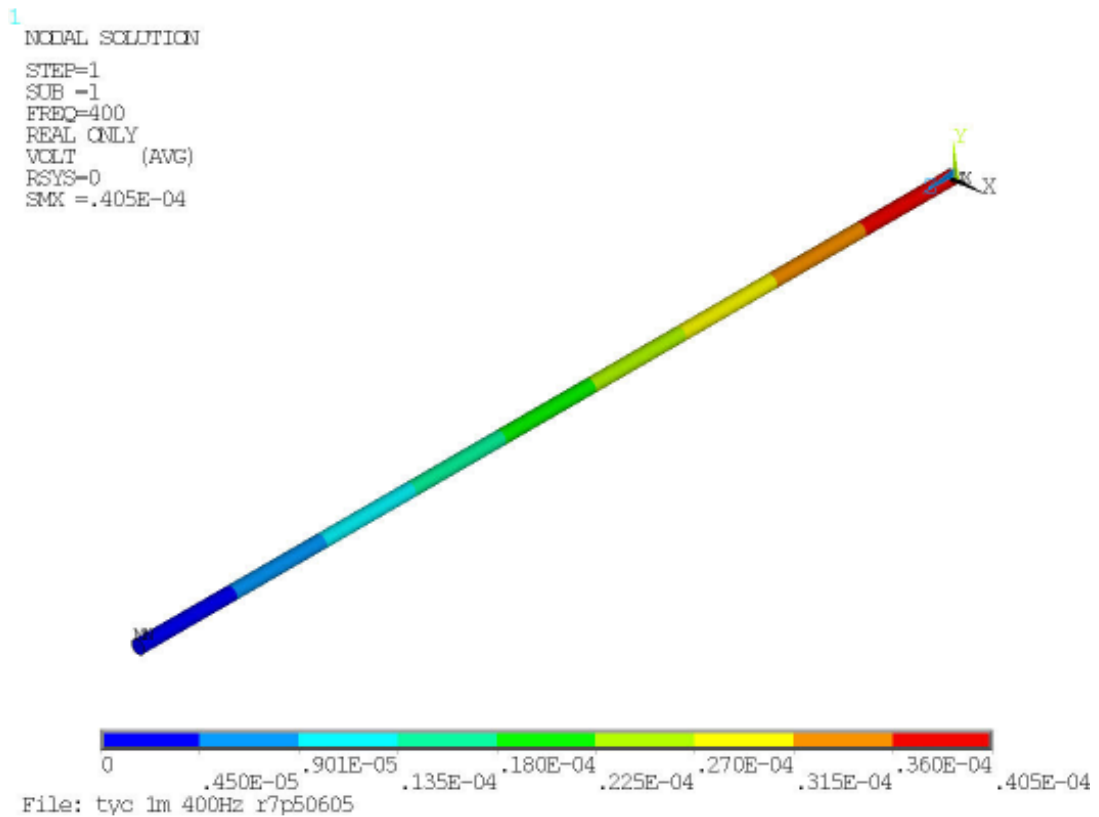
8.2 Výpočet pomocí MKP – Ansys



Obrázek 8-2: MKP - Stejnoseměrný proud 400 A.

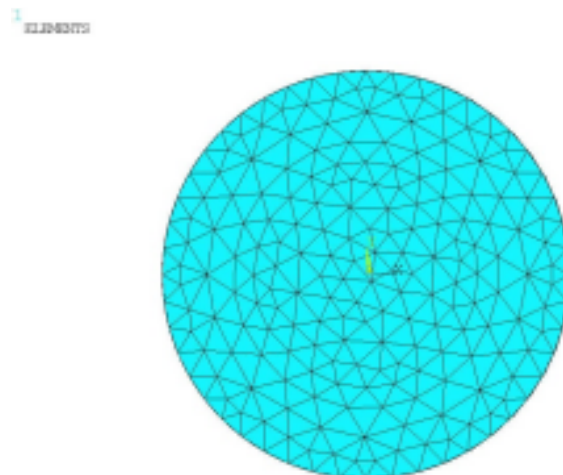


Obrázek 8-3: MKP - Střídavý proud 400 A; 50 Hz.

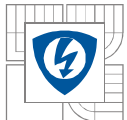


Obrázek 8-4: Střídavý proud 100 A; 400 Hz.

Na obrázku (Obr. 8-2) je vykreslen úbytek napětí simulace pro stejnosměrný proud 400 A. Hodnota úbytku napětí na tomto vodiči je reálná. Bohužel hodnota úbytku napětí na obrázku (Obr. 8-3,4) je \int , který není omezen. Omezení tohoto integrálu nebylo zjištěno ani v dokumentaci ansys pro příslušný typ simulace.



Obrázek 8-5: Nedostatečná volba prvků pro simulaci při AC 100 A, 400 Hz.



8.3 Porovnání výsledků obou metod

výpočetní metoda	proud		ztrátový výkon	absolutní chyba
	[A]	[Hz]	[W]	[%]
numerický výpočet	DC 400	---	2	0,42
metoda MKP - ANSYS	DC 400	---	2,00845	
numerický výpočet	AC 400	50	2,8	0,45
metoda MKP - ANSYS	AC 400	50	2,81249	
numerický výpočet	AC 100	400	1,4	2,65
metoda MKP - ANSYS	AC 100	400	1,43713	

Tabulka 8-2: Absolutní chyba simulace pomocí metody MKP.

Díky vzorovému příkladu, který byl vypočten jak numerickou metodou tak i pomocí MKP v programu ansys zjišťujeme, že chyba vzniklá při výpočtu u stejnosměrného proudu dosahuje odchylky 0,42 %. Tato chyba je způsobena výpočetní chybou programu ansys, tak i nedostatečným rozdělením modelu na konečné prvky, zejména jeho vzduchové okolí.

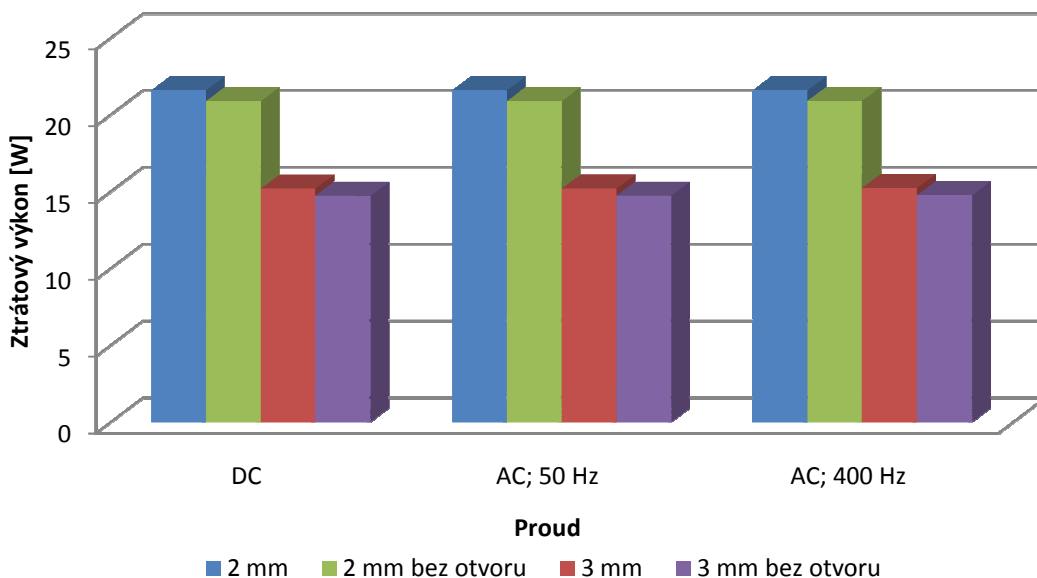
Chyba vzniklá u simulace pro střídavý proud při frekvenci 50 Hz je 0,45 %. Chyba vznikla ze stejného důvodu jako u simulace stejnosměrným proudem.

Simulace při střídavém proudu o frekvenci 400 Hz je 2,65 %. Chyba taktéž vznikla nedostatečným rozdělením proudové dráhy, tato chyba je patrná z obrázku. (Obr. 8-5), kde díky velikosti elementu není zcela dodržen kruhový tvar vodiče, i vzduchového okolí a chybou výpočetního programu ansys.

Při porovnání výsledků simulace, numerického výpočtu a kontrolního měření na příslušném vzorku nikdy nemůžeme docílit nulové odchylky. K této hodnotě se můžeme pouze přiblížit, neboť zde musíme zahrnout spoustu dílčích chyb, kterých se dopustíme jak zaokrouhlováním, chybami měřících přístrojů, nebo i nedokonalým rozdělením modelu na konečné prvky.

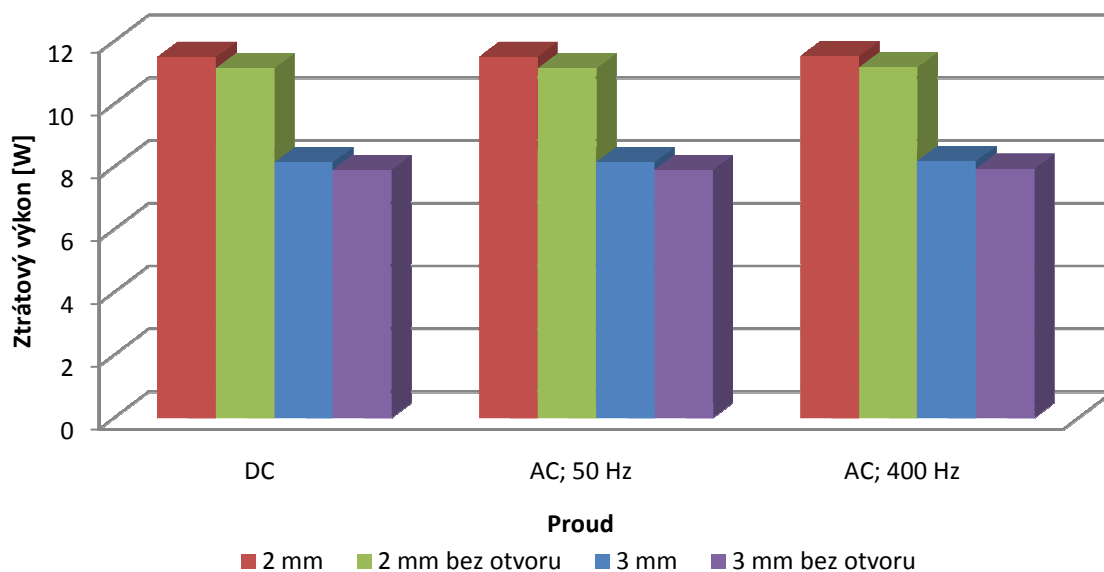
9 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ AC A DC

Ztrátový výkon PD jističe XX materiál bronz



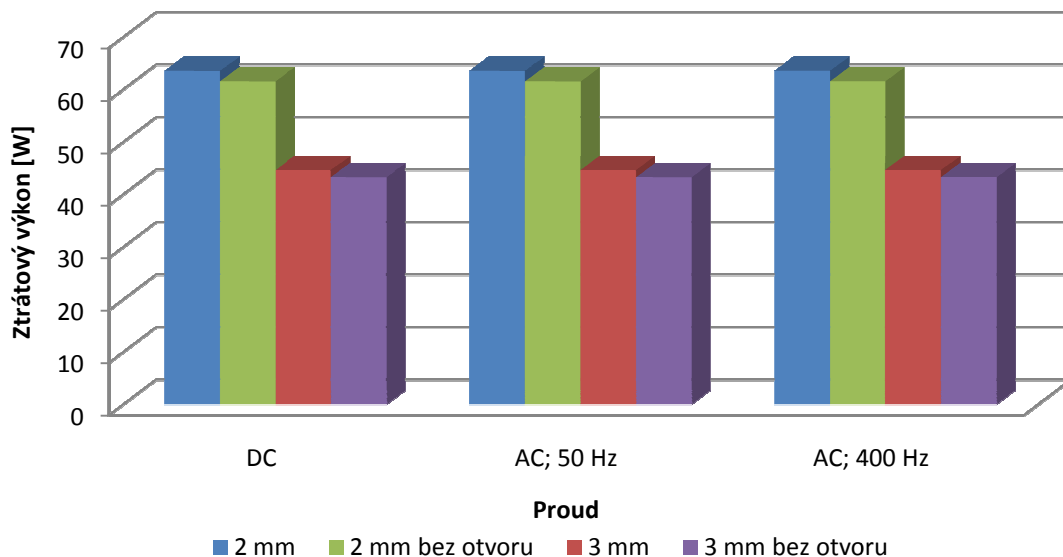
Obrázek 9-1: Porovnání ztrátového výkonu PD pro AC a DC, PD je vyrobena z bronzu.

Ztrátový výkon PD jističe XX materiál mosaz



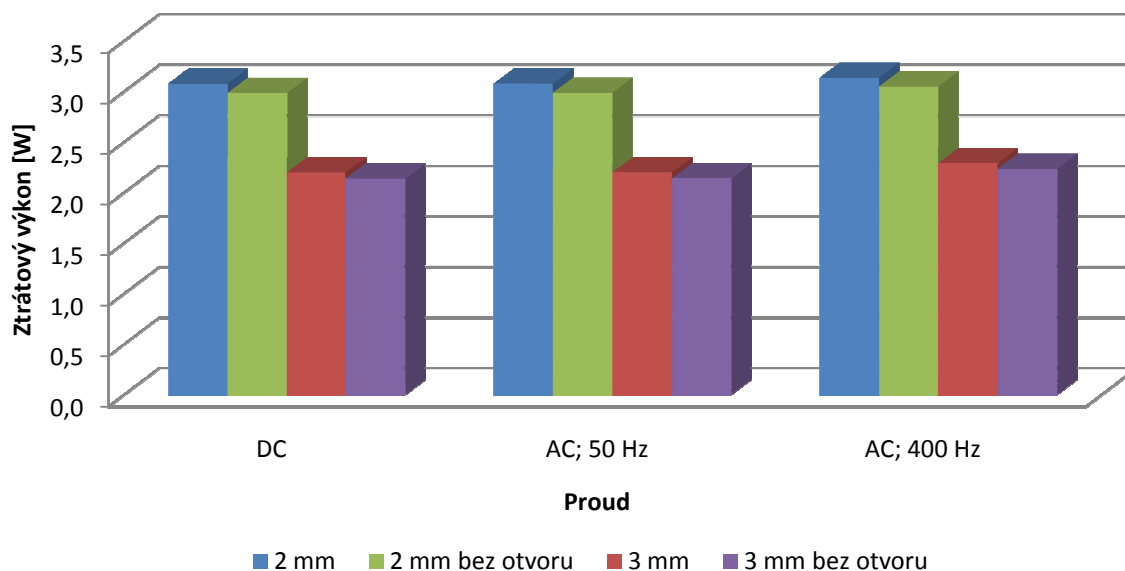
Obrázek 9-2: Porovnání ztrátového výkonu PD pro AC a DC, PD je vyrobena z mosazi.

Ztrátový výkon PD jističe XX materiál nikelin



Obrázek 9-3: Porovnání ztrátového výkonu PD pro AC a DC, PD je vyrobena z nikelinu.

Ztrátový výkon PD jističe XX materiál měď



Obrázek 9-4: Porovnání ztrátového výkonu PD pro AC a DC, PD je vyrobena z mědi.



10 ZÁVĚR

Pro umožnění simulace proudové dráhy jističe XX v simulačního programu ANSYS bylo zapotřebí překreslit celou geometrii modelu, a tak celkový model importovaný do simulačního programu ANSYS je složen ze 45ti objemů. Pro simulaci byly vytvořeny celkem 4 různé geometrie (tloušťka pasu proudové dráhy 2 a 3 mm, s otvory pro snýtování proudové dráhy s bimetalem a bez otvoru). Díky kombinaci 4 geometrií, 3 hodnot proudů a 4 druhy materiálu, bylo provedeno celkem 48 simulací proudové dráhy jističe XX pro stejnosměrný proud.

Naměřené hodnoty simulace stejnosměrným proudem pro tloušťku pásu proudové dráhy 2 a 3 mm byly vyneseny do grafu, kde je vidět, že pro různé materiály vychází jiné úbytky napětí. Tyto rozdíly jsou dány rezistivitou použitého materiálu. Díky získaným hodnotám ztrátového výkonu dojde ke správné volbě materiálu pro různé hodnoty jmenovitých proudů. Ztrátový výkon proudové dráhy jističe, který se přemění na teplo, bude ohřívat tepelnou spoušť a zajišťovat tak správnou funkci při vybavení jističe následkem přetížení.

Bylo provedeno i porovnání ztrátového výkonu proudové dráhy pro stejnosměrný a střídavý (50 a 400 Hz) proud. Ztrátový výkon pro střídavý proud s frekvencí 50 a 400 Hz měl povrchový jev u materiálu bronz, mosaz a nikelin minimální vliv (do 0,5 %). U materiálu měď byl povrchový jev již patrný a nejvýše se projevil na frekvenci 400 Hz u geometrie s tloušťkou proudové dráhy 3 mm.

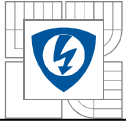
Pro ověření správného postupu simulace byla provedena kontrolní simulace dle numerického podkladu. Následným porovnáním výsledků bylo zjištěno, že u stejnosměrného proudu činila chyba simulace 0,42 %. Podobná hodnota odchylky byla zjištěna i u střídavého proudu o frekvenci 50 Hz. U střídavého proudu o frekvenci 400 Hz byla odchylka 2,65 %. Velikost této odchylky způsobila výpočetní chyba simulace programu ANSYS.

Hodnoty simulací jsou s malou odchylkou shodné s naměřenými, můžeme tedy předpokládat, že simulace proběhly v pořádku. U materiálu bronz došlo k odchylce oproti naměřené hodnotě 30,7 %. Nevýhodou kontrolního měření bylo pokovení proudové dráhy jističe technickým stříbrem, toto pokovení v simulacích nebylo zohledněno.

Po prozkoumání tabulky materiálů s měrným odporem dodané společností OEZ bylo zjištěno, že u materiálu bronz může dosáhnout chyba až 35 % vlivem odlišného poměru složení této slitiny a tím i jiné hodnoty měrného odporu.

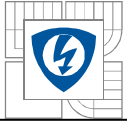
Ze získaných poznatků lze vyvodit závěr neměnit pro různé jmenovité hodnoty proudu materiál proudové dráhy, ale nutný ztrátový výkon dosáhnout změnou průřezu. Tedy zúžením proudové dráhy hned za topítkovými nýty.

Simulace byly provedeny na počítači s výkonem 2×3 GHz a operační pamětí 4 GB. Všech 96 simulací bylo vyřešeno metodou konečných prvků v programu ANSYS za 110 hodin a zabírají 280 GB.



11 POUŽITÁ LITERATURA

- [1.] Jističe. In VŠB - TU OSTRAVA. *Silnoproudá elektrotechnika*. [s.l.] : [s.n.], 2006 [cit. 2010-05-12]. Dostupné z WWW: <fei1.vsb.cz/kat453/www453/>. 453-512/1.
- [2.] OEZ s.r.o. Jističe. In *Interní domumenty*. Letohrad : [s.n.], 2008. s. 50.
- [3.] VOJÁČEK, Antonín. Co je, k čemu je a jak funguje Rogowského cívka?. *Automatizace.hw* [online]. 29.10.2007, no 1, [cit. 2010-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz>>.
- [4.] DĚDEK, Libor, DĚDKOVÁ, Jarmila. *Elektromagnetismus*. 1. autoriz. vyd. Brno : VUTIUM, 1998. 600 s. ISBN 80-214-1106-6.
- [5.] Wikipedie. *Joulovo teplo* [online]. 2008 , 30.6.2008 [cit. 2009-12-07]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Jouleovo_teplo>.
- [6.] ANSYS – software – studentská licence, VUT - Brno
- [7.] SolidWorks – software – studentská licence



12 PŘÍLOHY

DVD-RW 1 kus → výsledky simulací