

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Minimalizace silových a tepelných účinků v systémech
s masivními vodiči**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vlastimil HEBR**
Osobní číslo: **E12N0013P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Minimalizace silových a tepelných účinků v systémech s masivními vodiči**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte odbornou literaturu a internetové zdroje týkající se provedení systémů s masivními vodiči.
2. Sestavte matematický model problému a vytvořte algoritmus pro řešení rozložení elektromagnetického pole.
3. Realizujte numerický model na počítači.
4. Uvažujte různá uspořádání a různé tvary vodičů, respektujte použité materiály.
5. Minimalizujte silové a tepelné účinky v systémech s masivními vodiči.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. Mayer, Daniel: **Teorie elektromagnetického pole, Plzeň, ZČU v Plzni, 2001.**
2. Mayer, D., Ulrych, B.: **Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí, Praha, SNTL, 1988.**
3. Míka, S., Přikryl, P., Brandner, M.: **Speciální numerické metody. Numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice, Plzeň, Vydavatelský servis, 2006.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lenka Šroubová, Ph.D.**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na minimalizaci silových a tepelných účinků v systémech s masivními vodiči. Práce se specializuje na přípojnice. V úvodních kapitolách jsou popsány základní druhy přípojníc, jejich použití a používané materiály. V dalších částech jsou připomenuty vztahy z oblasti teplotního a elektromagnetického pole a sestaveny matematické modely. Celá problematika je řešena pomocí aplikace Agros2D jako sdružená úloha. Těžištěm práce je vytvoření jednotlivých modelů a poukázání na změny sledovaných veličin v závislosti na různých vstupních hodnotách. Vyhodnocení zjištěných informací je provedeno ve formě grafů.

Klíčová slova

Přípojnice, profilové vodiče, Agros2D, elektromagnetické pole, teplotní pole, Maxwellovy rovnice, Lorentzovy síly, matematické modely

Abstract

The present thesis is focused on minimizing the power and thermal effects on the systems with solid wires. The thesis is specialized in the busbars. The introductory chapters describe the basic types of busbars, their usage and materials, which are used. The other parts are referred to relations in the domain of the thermal and electromagnetic fields and are accompanied by mathematical models. The whole problem is solved by using Agros2D application as a coupled problem. The focus of the work is to create models and to point out the changes of observed quantities depending on various input values. The evaluation of established data is represented in the form of graphs.

Key words

Busbars, section conductors, Agros2D, electromagnetic field, temperature field, Maxwell's equations, Lorentz force, mathematical models

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 9.5.2014

Bc. Vlastimil Hebr

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Lence Šroubové, Ph.D. z Katedry teoretické elektrotechniky za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl také poděkovat Ing. Františkovi Machovi za odborné konzultace.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 PŘÍPOJNICE A ODBOČKY ROZVODNÝCH ZAŘÍZENÍ	12
1.1 PŘÍPOJNICE	12
1.2 ODBOČKY	18
2 ZÁKLADNÍ VZTAHY A VELIČINY Z TEORIE TEPLOTNÍHO POLE	19
2.1 ZÁKLADNÍ VELIČINY	19
2.2 ZPŮSOBY ŠÍŘENÍ TEPLA	20
3 ZÁKLADNÍ VZTAHY Z TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	23
3.1 MAXWELLOVY ROVNICE V DIFERENCIÁLNÍM TVARU	23
3.2 PODMÍNKY NA ROZHŘANÍ	23
3.3 MATERIÁLOVÉ VZTAHY	24
3.4 VEKTOROVÝ MAGNETICKÝ POTENCIÁL	24
4 FORMULACE MATEMATICKÝCH MODELŮ	25
4.1 PŘEDSTAVENÍ APLIKACE AGROS2D	25
4.2 MODULY PROGRAMU AGROS2D	25
4.3 POUŽITÁ METODA ŘEŠENÍ	26
4.4 MODEL MAGNETICKÉHO POLE	27
4.5 MODEL TEPLOTNÍHO POLE	28
5 NUMERICKÝ MODEL A ŘEŠENÍ PROBLÉMU	29
5.1 PRŮŘEZY ŘEŠENÝCH PŘÍPOJNIC	29
5.2 POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH PARAMETRY	30
5.3 USPOŘÁDÁNÍ ŘEŠENÝCH MODELŮ	31
5.4 REALIZACE MODELŮ V AGROS2D	32
5.5 KONVERGENCE ŘEŠENÍ	35
6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	36
6.1 MĚRNÉ JOULEOVY ZTRÁTY P_j	36
6.2 PROVOZNÍ TEPLoty PŘÍPOJNIC	37
6.3 VELIKOST PŮSOBENÍ LORENTZOVÝCH SIL	38
6.4 POROVNÁNÍ ZVOLENÝCH MATERIÁLŮ	39
ZÁVĚR	40
POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE	41
PŘÍLOHY	1

Seznam použitých obrázků

Obr. 1.1: Pocínované Cu přípojnice obdélníkového průřezu [6]	14
Obr. 1.2: Pocínovaná a holá H Cu přípojnice [6]	15
Obr. 1.3: Pocínovaná HH,H Cu přípojnice [6]	16
Obr. 4.1: Rozložení výpočtové sítě u H-přípojnice	27
Obr. 4.2: Detail výpočtové sítě u H-přípojnice	27
Obr. 5.1: Výkres průřezu ploché přípojnice. $S = 720 \text{ mm}^2$	29
Obr. 5.2: 3D model ploché přípojnice	29
Obr. 5.3: Výkres průřezu duté přípojnice. $S = 720 \text{ mm}^2$	30
Obr. 5.4: 3D model duté přípojnice	30
Obr. 5.5: Výkres průřezu H-přípojnice. $S = 720 \text{ mm}^2$	30
Obr. 5.6: 3D model H-přípojnice	30
Obr. 5.7: Uspořádání přípojnic. Varianta A	31
Obr. 5.8: Uspořádání přípojnic. Varianta B	31
Obr. 5.9: Uspořádání přípojnic. Varianta C	31
Obr. 5.10: Uspořádání přípojnic. Varianta D	31
Obr. 5.11: Uspořádání přípojnic. Varianta E	32
Obr. 5.12: Uspořádání přípojnic. Varianta F	32
Obr. 5.13: Uspořádání přípojnic. Varianta G	32
Obr. 5.14: Energie magnetického pole u oblasti Ω_4 v závislosti na jejím poloměru r	32
Obr. 5.15: Geometrické uspořádání modelu pro řešení magnetického pole u varianty C..	33
Obr. 5.16: Geometrické uspořádání modelu pro řešení teplotního pole u varianty C	34
Obr. 5.17: Velikost Jouleových ztrát v závislosti na nastavení parametrů řešené sítě	35
Obr. 6.1: Velikost Jouleových ztrát měděných přípojnicových systémů	36
Obr. 6.2: Velikost Jouleových ztrát přípojnicových systémů vyrobených ze slitiny hliníku	37
Obr. 6.3: Odečtené hodnoty teplot z přípojnice vyrobené ze slitiny hliníku	37
Obr. 6.4: Velikost Lorenzových sil působících na levé vodiče při $I = 2000 \text{ A}$ [22]	38
Obr. 6.5: Lorentzovy síly působící na okraji ploché přípojnice. Varianta D	39

Seznam symbolů a zkratek

A	$[\text{Wb}\cdot\text{m}^{-1}]$	vektorový magnetický potenciál
B	$[\text{T}]$	magnetická indukce
B_r	$[\text{T}]$	remanentní indukce
c	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
D	$[\text{C}\cdot\text{m}^{-2}]$	elektrická indukce
E	$[\text{V}\cdot\text{m}^{-1}]$	intenzita elektrického pole
F_L	$[\text{N}]$	Lorentzova síla
f	$[\text{Hz}]$	frekvence
H	$[\text{A}\cdot\text{m}^{-1}]$	intenzita magnetického pole
I	$[\text{A}]$	elektrický proud
J	$[\text{A}\cdot\text{m}^{-2}]$	proudová hustota
P	$[\text{W}]$	tepelný výkon
p_j	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-3}]$	měrné Jouleovy ztráty
Q	$[\text{J}]$	teplo
q	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	hustota tepelného toku
R	$[\Omega]$	elektrický odpor
R_m	$[\text{Mpa}]$	pevnost v tahu
S	$[\text{m}^2]$	plocha
T	$[\text{K}]$	termodynamická teplota
t	$[\text{°C}]$	teplota
t	$[\text{s}]$	čas
v	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	rychlost
W_m	$[\text{J}]$	energie magnetického pole
α	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
α_R	$[\text{C}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	teplotní součinitel elektrického odporu
γ	$[\text{S}\cdot\text{m}^{-1}]$	měrná elektrická vodivost
ε	$[-]$	emisivita povrchu
ε	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$	permitivita
λ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
λ	$[\text{m}]$	vlnová délka
μ	$[\text{H}\cdot\text{m}^{-1}]$	permeabilita
ρ	$[\Omega\cdot\text{m}]$	měrný elektrický odpor
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	měrná hmotnost
φ	$[\text{J}\cdot\text{s}^{-1}]$	tepelný tok
σ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$	Stefan-Boltzmannova konstanta
σ	$[\text{C}\cdot\text{m}^{-2}]$	plošná hustota náboje
ω	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	úhlová frekvence

Úvod

Masivní vodiče jsou jednou z nejdůležitějších součástí systému pro rozvod elektrické energie. Patří sem především vodiče přenosových vedení, silnoproudé kabely a profilové vodiče, resp. přípojnice. Vnitřní silnoproudé rozvody se běžně realizují pomocí přípojnicových systémů, nicméně trendem moderní doby je jejich využití i u řady venkovních provedení. To je také jedním z důvodů, proč se práce specializuje na vlastnosti profilových vodičů využívaných u přípojnicových systémů.

Při navrhování přípojnic se klade důraz především na bezpečnost, a to jak při provozním, tak poruchovém stavu. Při provozu je na přípojnice soustředován veškerý výkon přivedený do rozvodny. Vodiče musí být dimenzovány tak, aby odolávaly tepelným a silovým účinkům procházejícího proudu. Přestože silové účinky elektrického proudu nabývají na významu spíše u poruchových jevů, tepelné účinky proudu ovlivňují vlastnosti přípojnicového systému i během jeho provozního stavu. Vysoké teploty totiž vedou ke změně mechanických a elektrických vlastností vodiče a u všech spojů v systému zvyšují jejich přechodový odpor. Z tohoto důvodu je vhodné analyzovat vlastnosti používaných profilových vodičů z hlediska tvarů, uspořádání a používaných materiálů, což je právě předmětem této práce.

Celkově je práce koncipována do šesti přehledných kapitol, přičemž v první kapitole se práce zaměřuje na typy používaných profilových vodičů a jejich uspořádání. Dále jsou zde popsány základní materiály, z kterých jsou přípojnice nejčastěji vyráběny a stručný přehled nabízených přípojnicových řešení dostupných na trhu. Ve druhé kapitole jsou vysvětleny některé základní pojmy z oblasti termodynamiky zahrnující matematické popsání všech způsobů přenosu tepelné energie. Ve třetí části jsou uvedeny elementární vztahy a odvození z teorie elektromagnetického pole, které se nadále využívají při sestavování matematických modelů řešeného problému. Ve čtvrté kapitole je popsána aplikace Agros2D, včetně matematické formulace modelů dvou fyzikálních polí pomocí parciálních diferenciálních rovnic – elektromagnetického a teplotního, které jsou v práci využívány pro namodelování zadaného problému. Následuje část, která obsahuje samotné řešení, tedy popsání zvolených průřezů, materiálů a geometrického uspořádání jednotlivých fází přípojnic. Všechny výsledky jsou v práci prezentovány ve formě grafů a tabulek s vypočtenými hodnotami.

1 Přípojnice a odbočky rozvodných zařízení

Pro popis vodičů používaných v přípojnicových systémech z hlediska přehledu nejčastěji používaných typů, tvarů průřezů, materiálů a uspořádání, je vhodné stručně vysvětlit některé základní pojmy, jako jsou například přípojnice a odbočky.

1.1 Přípojnice

Zpravidla se jedná o holé vodiče, jejichž úkolem je zajistit přenos elektrické energie mezi odběrným místem a výstupní stanicí. Jejich průřez a profil je dán proudovým zatížením, požadavky na pevnost a zkratovými poměry. Elektrická energie je k těmto vodičům přiváděna přívodními odbočkami a odváděna vývodovými odbočkami. Soubor n fází přípojnic se pak nazývá přípojnicový systém.[1]

Vodiče pro přípojnice rozvodných zařízení

Vodiče používané pro přípojnice v rozvodných zařízeních nn a vn bývají nejčastěji provedeny z holých pásových vodičů s obdélníkovým profilem, které jsou vyrobeny z elektrovedného hliníku EA1, mědi. V případě potřeby se používají také vodiče s jiným tvarem průřezu. U venkovních provedení rozvodných zařízení vvn jsou přípojnice velmi často realizovány pomocí ocelohliníkových lan AlFe nebo svazkových vodičů s rozpěrkami. Při realizaci vnitřního rozvodu elektrické energie jsou pak nejčastěji používány profilové vodiče. U nově budovaných venkovních rozvodů vvn se velmi často přechází na využívání trubkových vodičů. V případě značného proudového zatížení se používá paralelních plochých tyčí zpevněných výztužnými vložkami. U zařízení nn mohou mít přípojnice odstupňovaný průřez podle skutečného proudu, který jimi v jednotlivých úsecích protéká. [1][2]

Uspořádání vodičů v přípojnicovém systému

Uspořádání profilových vodičů se v přípojnicovém systému volí na základě velikosti zatěžovacího proudu a jmenovitého napětí při provozním stavu, přičemž je brán ohled i na poruchový stav. Přípojnice musí být odolné proti tepelným a dynamickým účinkům zkratového proudu. Počet a zapojení přípojnicových systémů udává stupeň důležitosti napájených spotřebičů. V rozvodných zařízeních se navíc klade důraz na využití prostoru, tedy aby přípojnicový systém zabíral co nejméně místa při zachování všech bezpečnostních opatření. Z těchto hledisek mohou být přípojnice uspořádány: [1][3]

- V rovině vodorovné
- V rovině svislé
- V rovině šikmé do trojúhelníka

Používané typy profilových vodičů

Profilové vodiče bývají vyráběny v mnoha modifikacích. Mohou mít různé tvary průřezů nebo povrchové úpravy, což závisí většinou na výrobcí a požadavku zákazníka. Nejčastěji používanou přípojnici je přípojnice, jejíž průřez má obdélníkový tvar, ale vyrábí se i přípojnice s průřezem ve tvaru H, HH, T, TCC a mnoho dalších.

Materiál používaný při výrobě profilových vodičů

Jak již bylo zmíněno výše, nepoužívanějším materiálem pro výrobu profilových vodičů je měď, resp. hliník. Volba materiálu závisí především na použití dané přípojnice a je zde potřeba zvážit několik aspektů, jimiž mohou být například očekávané materiálové vlastnosti nebo ekonomická výhodnost. S ohledem na materiálové parametry je ve většině fyzikálních vlastností lepší měď. Jedinou výhodou hliníku je zde menší hmotnost, avšak ta může hrát při výběru materiálu významnou roli. [2]

Měď je materiál s výbornou vodivostí elektrické energie a tepla. Mezi další jeho výhody patří odolnost proti korozi, na které má významný podíl jeho ochranná vrstva, tzv. měděnka. Měděnka je směs uhličitanu mědnatého a hydroxidu mědnatého, která na mědi vzniká působením kyslíku, oxidu uhličitého a vody. [4]

Hliník je na tom s elektrickými vlastnostmi poněkud hůře (o 40 % horší elektrická vodivost), nicméně stále je zde několik důvodů, díky kterýmž je jeho využití pro řadu aplikací mnohem výhodnější. Na vzduchu je stejně tak jako měď velmi odolný, protože ho pokrývá ochranná vrstva oxidu hlinitého Al_2O_3 . Hliník je oproti mědi mnohem lehčí, což umožňuje dimenzovat nosné prvky zařízení na nižší hmotnost. Aby se u hliníkové přípojnice docílilo stejné elektrické vodivosti jako u mědi, je potřeba zvětšit její průřez. Z toho vyplývá, že je systém přípojníc využívající hliníkové vodiče náročnější na prostor. [4][11]

Ekonomické zhodnocení

Rozdíl ceny jednoho kilogramu mědi a hliníku se na trhu liší zhruba o 75 %. Dalším faktorem, který významně ovlivní výslednou cenu přípojnicového systému je rozdíl hustoty mědi a hliníku. Z následující tabulky je patrné, že cena materiálu jednoho metru dlouhé přípojnice s obdélníkovým průřezem o rozměrech 80x10 mm se liší zhruba o 1100 %.

Tab. 1.1 Rozdíl ceny jednoho metru dlouhé ploché přípojnice 80x10 mm.

přípojnice 80x10mm	Hmotnost přípojnice [kg/m]	cena za kilogram [kč/kg]	cena za kus [kč/ks]
měď	7,17	132,87*	952,24
hliník 1350A ALE 99,5	2,16	36,47*	78,78
rozdíl			873,46

* Ceny mědi a hliníku k datu 21. 4. 2014. [19][20]

Přehled přípojnicových systémů podle výrobců

Použití přípojnicových systémů je pro rozvod elektrické energie velmi efektivní. Rozvod energie se provádí uvnitř skříňového rozvaděče velice přehledně a rychle a snadno se k němu připojují další měřicí nebo jistící prvky. [7]

Přípojnicové systémy od firmy Wöhner

Hlavním sortimentem společnosti Wöhner jsou přípojnicové systémy. Nejrozšířenější je přípojnicový systém, ve kterém rozteč mezi jednotlivými středy měděných přípojnic činí 60 mm.

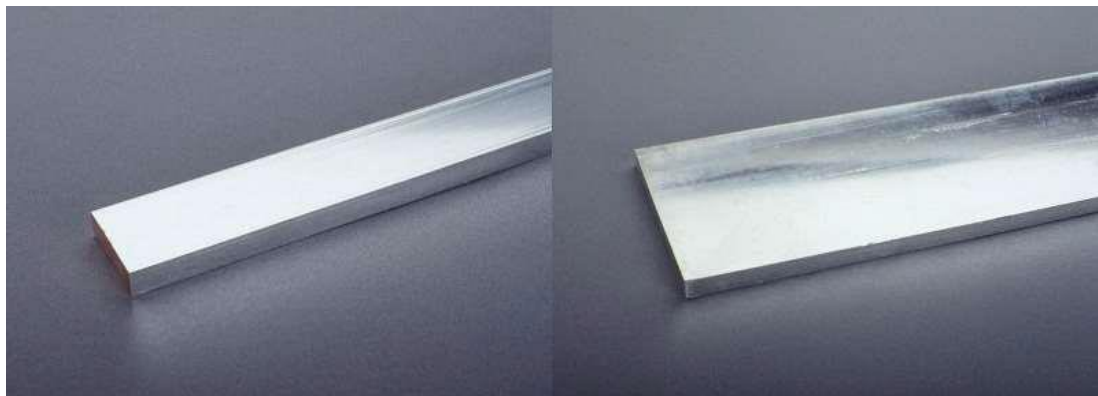
Základním prvkem je držák, kterým jsou pevně zajištěny jednotlivé měděné přípojnice. Ty slouží jednak k přenosu elektrické energie, ale také jako nosný prvek pro připojení dalších zařízení. Držák je univerzální pro rozměry přípojnic šířky 12 až 30 mm a tloušťky 5 a 10 mm. Šířka i tloušťka se nastavuje vnitřním posuvným dílem. Jestliže je požadováno větší proudové zatížení než 630 A, (max. proud měděné přípojnice 30 x 10 mm) jsou připraveny speciální držáky a měděné profily tvaru H s proudovým zatížením až 2500 A. To vše s dodržáním šířky 60 mm a kompatibilitou se zbytkem příslušenství. [5][6]

Firma Wöhner v současné době nabízí tyto přípojnicové systémy: [6]

- Systém přípojnic do 360 A (60 mm)
- Systém přípojnic compact 360 A (60 mm)
- Systém přípojnic classic 630 A (800 A) / 2500 A (60 mm)
- Systém přípojnic do 1250 A (100 mm)
- Systém přípojnic power do 2500 A (185 mm).

Měděné pocínované přípojnice

Zde jsou uvedeny profilové vodiče přípojnicových systémů používaných firmou Wöhner. Proudová zatížitelnost je udána u plochých sběrnic při teplotě okolí 35°C a teplotě sběrnice 65°C. [6]



Obr. 1.1: Pocínované Cu přípojnice obdélníkového průřezu. Převzato z [6]

Tab. 1.2 Hodnoty - rozměry, jmenovitý proud Cu přípojnic obdélníkového průřezu[6].

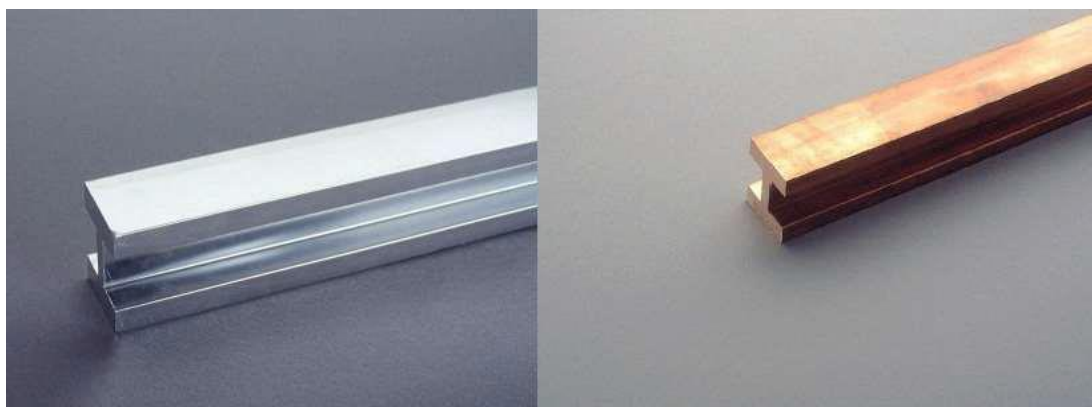
Rozměry	Jm. Proud	Délka
12x5 mm	200 A	2,4 m
15x5 mm	250 A	2,4 m
20x5 mm	320 A	2,4 m
25x5 mm	400 A	2,4 m
30x5 mm	450 A	2,4 m
12x10 mm	360 A	2,4 m
20x10 mm	520 A	2,4 m
30x10 mm	630 A	2,4 m
30x10 mm	630 A	2,4 m
40x10 mm	850 A	2,4 m
50x10 mm	1000 A	2,4 m
60x10 mm	1250 A	2,4 m
80x10 mm	1500 A	2,4 m
100x10 mm	1800 A	2,4 m
120x10 mm	2100 A	2,4 m

Profilové měděné holé a pocínované přípojnice

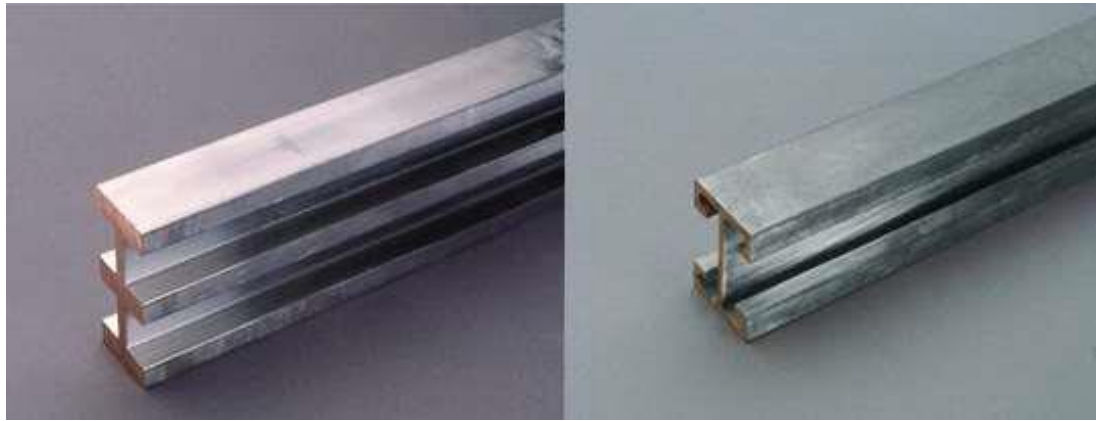
Systém 60 mm / 1600 A

Tab. 1.3 Hodnoty – rozměry, jmenovitý proud Cu přípojnic T, H, HH průřezů[6].

Jm. proud [A]	Průřez [mm ²]	Délka [m]	Povrchová úprava
1250	500 T - profil	2,4	pocínovaná
		3,6	
		2,4	holá
		3,6	
1600	740 H - profil	2,4	pocínovaná
		3,6	
		2,4	holá
		3,6	
2500	1140 HH - profil	2,4	pocínovaná
		3,6	



Obr. 1.2: Pocínovaná a holá H Cu přípojnice. Převzato z [6]



Obr. 1.3: Pocínovaná HH, H Cu přípojnice. Převzato z [6]

Přípojnicové systémy od firmy Rittal

Společnost Rittal patří mezi špičku v oboru na systémy určené pro rozvod elektrické energie. Ve svém portfoliu nabízí přípojnicové systémy od 250 A do 3000 A jmenovitého proudu. Úkolem těchto systémů je zjednodušit a zefektivnit montáž komponentů silnoproudých rozvodů a zajistit co možná nejvyšší úroveň bezpečnosti.

Společnost Rittal nabízí tyto přípojnicové systémy: [8][9]

- Přípojnicové systémy Mini-PLS do 250 A (40 mm)
- Rittal RiLine60 přípojnicové systémy do 800 A (60 mm)
- Rittal RiLine60 přípojnicové systémy 800/1600 A (60 mm)
- Přípojnicové systémy Ri4Power do 1250 A (100 mm)
- Přípojnicové systémy Ri4Power do 1600 A (185 mm)
- Přípojnicové systémy Ri4Power do 2500 A/3000 A (150 mm).

Přípojnicové systémy od firmy Siemens

Sortiment přípojnicových systémů společnosti Siemens nabízí komplexní, bezpečné a flexibilní řešení transportu a rozvodu proudu do 6300 A. Prefabrikované prvky s obchodním názvem Sivacon 8PS zajišťují přenos elektrické energie mezi transformátorem a spotřebičem. Jedná se o ucelený systém s dobrými elektrickými vlastnostmi a vlastní pevnou mechanickou konstrukcí. Celý systém disponuje velkou odolností proti zkratovým proudům. Napájení koncových spotřebičů je realizováno pomocí odbočných skříněk, které jsou umístěny na rozvodných trasách co nejbližší ke spotřebiči a jsou opatřeny ochrannými nebo ovládacími prvky.[10]

Společnost Siemens nabízí v současné době tyto přípojnicové systémy:

- Přípojnicový systém SIVACON 8PS BD01 od 40 do 160 A
- Přípojnicový systém SIVACON 8PS BD2 od 160 do 1250 A
- Přípojnicový systém SIVACON 8PS LD od 1100 do 5000 A
- Přípojnicový systém SIVACON 8PS LX od 800 do 6300 A
- Přípojnicový systém SIVACON 8PS LR od 400 do 6150 A

Přípojnicové systémy od firmy Ege

Společnost Ege nabízí hliníkové přípojnice vyrobené ze slitiny, které splňují EN 755-2 EN AW-1350A E-Al 99,5. Jsou speciálně určeny k použití tam, kde se vyžaduje vysoká elektrická vodivost. Typickými příklady použití jsou přípojnice a ostatní elektrické vodiče. Hliníkové přípojnice od této společnosti nacházejí uplatnění pro výkonová propojení ve vysokonapěťových systémech venkovních rozveden. V těchto strategických bodech jsou přípojnice velmi spolehlivou alternativou ke kabelům a jsou vhodné v technickém i ekonomickém smyslu.[11]

Hlavní výhody přípojnic vyrobené ze slitin hliníku

Mezi hlavní výhody přípojnic vyrobené ze slitin hliníku patří dle [11]

- Přípojnice jsou lehčí a mají větší tvrdost než kabely se stejnou kapacitou přenosu proudu, což umožňuje větší volné rozpětí, méně podpěrných bodů a základů, zatížení na body základny je nižší než v případě kabelů.
- Přípojnice mají menší zátěž na podpory, spínače a transformátory než paralelně zapojené kabely v případě zkratového proudu.
- Jsou dobrými vodiči díky povrchovému jevu skin efektu: povrch přípojnice má hustotu proudu, která je relativně nižší než hustota kabelu. Jsou trvale odolné vůči korozi, vykazují výborné vlastnosti elektrické vodivosti, mají hladký povrch, nevyžadují údržbu, mají velmi dlouhou životnost.
- Díky přírodním vlastnostem hliníku nepotřebují hliníkové přípojnice téměř žádnou údržbu. Poněvadž koroze není problém, nákladná konzervativní ošetření a nátěry s velkým dopadem na životní prostředí, nejsou nutné. Skutečnost, že hliníkové přípojnice lze recyklovat, je samozřejmě pro životní prostředí také příznivá.

Vodiče ploché z hliníku s vysokou vodivostí

Vodiče pro elektrické přípojnice ze slitiny podle normy EN AW-1350, E-Al 99,5

Tab. 1.4 Chemické složení přípojnic podle EN573-3[11].

Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mg [%]	Zn [%]	Cr+Mn+Ti+V [%]	Hliník min. [%]
0,25	0,4	0,02	0,05	0,05	0,03	99,5

Tab. 1.5 Mechanické vlastnosti přípojnic podle EN755-2[11].

Stav	Rozměry [mm]	Mez průtažnosti Rp0,2 [Mpa]	Pevnost v tahu Rm [Mpa]	prodloužení	
				A [%]	A50mm [%]
F, H112	všechny	[-]	>60	>25	>23

Tab. 1.6 Fyzikální vlastnosti přípojnic, 20°C[11].

Hustota [kg/m ³]	Rozsah tavení [°C]	Elektrická vodivost [MS/m]	Tepelná vodivost [W/mK]	Koeficient tepelné expanze [10 ⁻⁸ /K]	Modul elasticity [Gpa]
2700	646-657	>35,4	218	23,8	~69

Tab. 1.7 Proudová zatížitelnost plochých přípojnic[11].

šířka A [mm]	Tloušťka B [mm]	Průřez [mm ²]	Hmotnost [kg/m]	Proudová zatížitelnost [A]
40	5	200	0,54	493
40	10	400	1,08	734
50	5	250	0,675	600
50	10	500	1,35	882
63	5	315	0,85	731
63	10	630	1,7	1069
80	5	400	1,72	899
80	10	800	2,16	1307
100	10	1000	2,7	1580
100	16	1600	4,32	2039
160	10	1600	4,32	2371
160	16	2560	6,858	3038

1.2 Odbočky

Odbočky patří stejně tak jako přípojnice mezi základní prvky rozvodného zařízení. Představují soubor propojených přístrojů, které jsou nezbytné ke spínání měření a zabezpečení vývodů nebo přívodů elektrické energie. Tento soubor přístrojů bývá u různých druhů rozveden velice podobný a liší se pouze napětíovou hladinou, proudovou a zkratovou odolností a dalšími podružnými ukazateli, na které je systém dimenzován. Mezi základní

zařízení odboček patří: spínací přístroje, přípojnicové odpojovače, vývodové odpojovače, přístrojové transformátory napětí a proudu, měřicí a ochranné zařízení. [1][3]

2 Základní vztahy a veličiny z teorie teplotního pole

Velká část této práce se zabývá modelováním teplotního pole uvnitř přípojnice protékané elektrickým proudem. Z tohoto důvodu je vhodné vysvětlit některé základní pojmy a principy šíření tepla uvedené v [3][12][13].

2.1 Základní veličiny

Pro popsání základních tepelných dějů, které vznikají ve vodiči vlivem protékajícího elektrického proudu, je vhodné vysvětlit některé ze základních veličin popisující teplotní pole. Patří sem například teplota, termodynamická teplota, tepelný tok, hustota tepelného toku, součinitel tepelné vodivosti nebo měrná tepelná kapacita.

Teplo

Jedná se o fyzikální stavovou veličinu. Vyjadřuje tepelnou energii, která je sdělena mezi termodynamickou soustavou a okolím. Teplo je součást vnitřní energie U , kterou systém přijme nebo odevzdá při styku s jiným systémem, aniž by přitom docházelo ke konání práce. Při tomto jevu dochází ke změně vnitřní energie, jakožto souhrnu potenciální a kinetické energie spojené s náhodným pohybem atomů a molekul. Teplo není vlastností systému a popisuje pouze změnu termodynamického stavu.

Teplota

Teplota je skalární veličina, která vyjadřuje velikost vnitřní energie látky a charakterizuje tak její tepelný stav. Bývá uváděna v různých jednotkách. Pro běžné využití v praxi je nejpoužívanější zřejmě Celsiova stupnice, která byla definována na základě teplot skupenských přeměn vody a jejich vlastností. Jsou-li neizolované termodynamické soustavy při vzájemném styku v tepelné rovnováze, jejich teplota se neliší.

Termodynamická teplota

Termodynamická teplota patří mezi základní veličiny SI a vyjadřuje skutečnou míru vnitřní energie látky v Kelvinech. Na začátku termodynamické stupnice se nachází absolutní nula, jejíž hodnota se rovná 0 K. Při této teplotě nemá látka žádnou vnitřní energii.

Tepelný tok

Jedná se o skalární veličinu vyjadřující teplo, které se přenese za jednotku času z místa s vyšší teplotou do místa s teplotou nižší. Tepelný tok tedy představuje množství tepla za jednotku času.

Hustota tepelného toku

Hustota tepelného toku je vektorová veličina značená písmenem \mathbf{q} a lze jí vyjádřit

$$\mathbf{q} = \frac{\Phi}{S}, \quad (2.1)$$

kde Φ je tepelný tok a S plocha. Hustota tepelného toku vyjadřuje množství energie, která projde průřezem S za určitý čas. Pokud by hustota tepelného toku vyšla nulová, znamená to, že v daném místě nedochází k přenosu tepla. Přenos tepla se ve všech látkách uskutečňuje pomocí mechanických pohybů.

Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla není materiálová konstanta, ale veličina vyjadřující, jak velký tepelný tok protéká plochou o velikosti 1 m^2 při rozdílu teplot 1°C . Součinitel přestupu tepla udává, jak snadno se šíří teplo z jedné látky do druhé. Jeho hodnoty bývají většinou získané experimentální cestou a jsou uvedeny v tabulkách.

Součinitel tepelné vodivosti

Jedná se o koeficient, který se charakteristicky liší pro daný materiál a určuje, kolik tepla přejde za jednotku času rovinnou stěnou o tloušťce 1 m při teplotním rozdílu 1°C mezi jejími povrchy, je-li velikost průřezu stěny 1 m^2 . Součinitel tepelné vodivosti udává, jak snadno se teplo šíří uvnitř dané látky, přičemž se jeho hodnota s tlakem a teplotou mění.

Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je charakteristickou vlastností každé látky a vyjadřuje teplo potřebné k ohřátí nebo ochlazení 1 kg látky o 1°C .

Teplotní součinitel elektrického odporu

Jedná se o fyzikální veličinu vyjadřující závislost odporu vodiče na teplotě.

2.2 Způsoby šíření tepla

Aby došlo k šíření tepla, musí být narušena tepelná rovnováha. Teplo se šíří z teplejšího prostředí do chladnějšího a může se šířit prouděním, vedením, sáláním a kombinacemi všech těchto způsobů šíření tepla.

Tepelná rovnováha

Tepelná rovnováha je stav, kdy neprobíhá žádná energetická výměna a soustava se nachází ve stabilním stavu. Při tomto jevu soustava ani nespotebovává, ani neprodukuje žádnou energii. V běžné praxi nelze tohoto stabilního stavu nikdy dosáhnout, jelikož bude daná soustava z mikroskopického hlediska vždy nestabilní.[12]

Šíření tepla vedením

Šíření tepla vedením, resp. kondukcí je způsoben srážkami částic s odlišnou velikostí energií. Jedná se tedy o mechanický způsob šíření tepla. Při tomto jevu si částice předávají svoji energii tak dlouho, dokud nenastane rovnovážný stav. Rychlost způsobu šíření tepla vedením závisí na množství částic, které jsou v daném materiálu schopné přenášet energii. Jedná se například o šíření tepla z jedné části pevné látky na druhou nebo přechodu tepla mezi dvěma pevnými tělesy, pokud se vzájemně dotýkají.[3] Hustotu tepelného toku \mathbf{q} lze v homogenním tělese definovat pro případ ustáleného přestupu tepla vedením dle vztahu

$$\mathbf{q} = -\lambda \text{grad}T, \quad (2.2)$$

kde λ představuje tepelnou vodivost a T teplotu. Na základě prvního termodynamického zákona můžeme vyjádřit celkovou energetickou bilanci daného tělesa vzhledem k jeho tepelnému stavu rovnicí

$$-\oint_S \mathbf{q} dS = \int_V \frac{dw}{dt} dV - \int_V p dV, \quad (2.3)$$

kde \mathbf{q} je hustota tepelného toku přes hranice tělesa, w vnitřní energie tělesa a p teplo vznikající uvnitř tělesa vnějšími vlivy, kterými mohou být například Jouleovy ztráty. Dosazením za tepelný tok \mathbf{q} z rovnice (2.3) a aplikováním Gauss-Ostrogradského věty získáme rovnici

$$\text{div}(\lambda \text{grad}T) = \frac{dw}{dt} - p. \quad (2.4)$$

Pokud vyjádříme vnitřní energii tělesa jako součin jeho měrné hmotnosti ρ , měrné tepelné kapacity c a teploty T , získáme rovnici vyjadřující přestup tepla ve výsledném tvaru[17]

$$\text{div}(\lambda \text{grad}T) = \rho c \frac{dT}{dt} - p. \quad (2.5)$$

Šíření tepla prouděním

Konvekce je druh šíření tepelné energie vlivem přesunu hmoty s vyšší teplotou na místo hmoty s nižší teplotou a uplatňuje se zejména mezi pevnými a kapalnými, resp. plynnými látkami. Jedná se o děj, který vzniká například při zahřívání tekutiny při styku s nějakým předmětem o vyšší teplotě.[3] Tepelný výkon P , který se z pevného tělesa přenesse prouděním lze vyjádřit vztahem

$$P = \alpha \cdot S(T - T_{ext}), \quad (2.7)$$

kde α je koeficient přestupu tepla, S je plocha tělesa, přes kterou k proudění dochází, T je teplota povrchu a T_{ext} je teplota okolí. Hustotu tepelného toku q lze tedy obecně zapsat ve tvaru[17]

$$q = \alpha(T - T_{ext}). \quad (2.8)$$

Šíření tepla sáláním

Každé těleso vyzařuje a pohlcuje svým povrchem tepelnou energii. Záření, které tuto energii přenáší, nazýváme tepelné záření. Pokud se teplo přenáší z jednoho tělesa na druhé pomocí elektromagnetického záření, nazýváme tento druh šíření tepla sálání. Tento druh přestupu tepla se šíří přímočaře a všemi směry. Tepelné záření, které vzniklo z tepelné energie, označujeme jako emisi. Naopak přeměnu záření v tepelnou energii jako absorpci. Tato přeměna záření v teplo a obráceně je závislá na hmotnosti tělesa. Každá látka záření částečně odráží, částečně propouští a zbytek pohlcuje. Velikost pohlcené energie závisí na materiálu, povrchu a tvaru tělesa, na které záření dopadá. Dále pak záleží na množství energie, která se od tělesa odrazí, nebo kolik se jí propustí bez jeho oteplení. Díky tomu byly zavedeny veličiny, které tyto vlastnosti látky popisují: pohltivost, odrazivost a propustnost.

Pohltivost vyjadřuje poměr pohlcené energie k celkové energii, která na dané těleso dopadá. Poměr odražené energie k energii dopadající se pak nazývá odrazivost a poměr propuštěné energie k energii dopadající se nazývá propustnost.

Energie tepelného záření se šíří ve formě elektromagnetických vln o vlnové délce λ . [3][12] Závislost teploty tělesa T a vlnové délky λ tepelného záření, které toto těleso vyzařuje, resp. pohlcuje, popisuje Wienův posunovací zákon

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T}, \quad (2.9)$$

kde konstanta v čitateli se nazývá Wienova. Pro tepelný výkon P lze pak zapsat rovnici

$$P = \varepsilon \sigma \cdot S(T^4 - T_{ext}^4), \quad (2.10)$$

kde ε je emisivita povrchu, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, T teplota povrchu a T_{ext} teplota okolních objektů.[17]

3 Základní vztahy z teorie elektromagnetického pole

3.1 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru

Maxwellovy rovnice formulují základní zákony elektromagnetického pole. V technických výpočtech je výhodné počítat s jejich diferenciálním tvarem. V takovémto případě však tyto rovnice platí pouze v regulérních bodech elektromagnetického pole, ve kterých jsou spojitě a spojitě diferencovatelné.[18]

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (3.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3.4)$$

Ve výše uvedených rovnicích je \mathbf{H} intenzita magnetického pole, \mathbf{J} proudová hustota, \mathbf{D} elektrická indukce, \mathbf{E} intenzita elektrického pole, \mathbf{B} magnetická indukce a ρ hustota náboje.

3.2 Podmínky na rozhraní

Z důvodu omezení Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru pouze na regulérní body elektromagnetického pole je nutné zavést rovnice, které platí také v bodech singulárních. Tyto rovnice se nazývají podmínky na rozhraní a lze je zapsat následujícími rovnicemi[15][17]

$$E_{1t} = E_{2t}, D_{2n} - D_{1n} = \sigma, \quad (3.5)$$

kde jednotlivé indexy u veličin představují složky daných vektorů (tečné a normálové). U magnetického pole pak můžeme zapsat rovnice vyjadřující podmínky na rozhraní rovnicemi

$$B_{1n} = B_{2n}, H_{2t} - H_{1t} = J_t, \quad (3.6)$$

a stejně tak pro elektrické proudové pole

$$J_{1n} = J_{2n}. \quad (3.7)$$

3.3 Materiálové vztahy

K popisu intenzity elektrického pole \mathbf{E} a magnetické indukce \mathbf{B} v látkovém prostředí je nutné zavést následující matematické vztahy.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{J} = \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{E}_V), \quad (3.10)$$

kde μ je permeabilita, ε permitivita a γ elektrická vodivost.

Permitivita ε charakterizuje izolační vlastnosti dielektrika. Udává vztah mezi vektory elektrické intenzity a elektrické indukce. Je dána vztahem

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (3.11)$$

kde ε_r je relativní permitivita a ε_0 permitivita vakua. Platí $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m. Relativní permitivita vyjadřuje, kolikrát se zvýší elektrická síla tělesa s elektrickým nábojem v daném prostředí (na rozdíl od umístění tělesa ve vakuu).

Permeabilita μ charakterizuje magnetické vlastnosti prostředí. Udává míru magnetizace v důsledku působení magnetického pole. Je dána vztahem

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (3.12)$$

kde μ_r je relativní permeabilita a μ_0 permeabilita vakua. $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.[15]

3.4 Vektorový magnetický potenciál

Při řešení rozložení magnetického pole je velmi výhodné zavést vektorový magnetický potenciál \mathbf{A} , který nám umožní zapsat rovnici (3.4) ve tvaru

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = \operatorname{div} \operatorname{rot} \mathbf{A}. \quad (3.13)$$

Z nadcházející rovnice plyne, že musí platit

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad (3.14)$$

nicméně magnetická indukce \mathbf{B} se může lišit o libovolný vektor nebo gradient funkce. Obor funkcí lze omezit Coulombovskou kalibrační podmínkou[15]

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0. \quad (3.15)$$

4 Formulace matematických modelů

V této kapitole je představena aplikace Agros2D, která je v práci využívána pro simulaci dvou fyzikálních polí v okolí přípojníc protékaných proudem. Dále je zde podrobněji popsán obecný matematický model, pomocí něhož se v Agros2D daný problém řeší. Jedná se o matematický model magnetického a teplotního pole, která jsou navzájem sdružená.

4.1 Představení aplikace Agros2D

Agros2D je aplikace určená k řešení fyzikálních polí. Je vyvíjena jako multiplatformní aplikace a lze ji tedy využívat na většině dnes používaných operačních systémů, mezi které patří Microsoft Windows, GNU/Linux a MacOSX. K řešení parciálních diferenciálních rovnic využívá knihovnu Hermes2D, která je založena na metodě konečných prvků vyšších řádů přesnosti. Jeho velkou výhodou je možnost simulace dějů, které jsou v praxi velmi obtížné řešit analytickou cestou. Agros2D je programován jako univerzální nástroj a jsou v něm tedy možné řešit různá fyzikální pole, mezi které patří například:

- elektrostatické pole
- magnetické pole (ustálený stav, přechodový děj a harmonická analýza)
- proudové elektrické pole
- teplotní pole (ustálený stav i přechodový děj)
- termoelastické pole napětí a deformací
- pole mechanického namáhání

Mezi velké výhody Agros2D patří především možnost využití pokročilých adaptivních algoritmů (h , p a hp), které vytváří síť s křivočarými elementy s libovolným počtem visících uzlů.[14]

4.2 Moduly programu Agros2D

Simulace v aplikaci Agros2D je rozdělena do třech základních modulů: preprocesor, procesor a postprocesor

Modul preprocesor

V tomto modulu se vytváří geometrie řešeného modelu pomocí uzlů, hran a značek oblastí. Modul obsahuje definice, které jsou vytvořeny pomocí okrajových podmínek

a materiálů. Modul nabízí základní operace pro práci s uzly, hranami a značkami oblastí. Jednou z operací je například geometrická transformace (posun, otočení a zvětšení). Další výhodou aplikace Agros2D je možnost importu geometrie daného problému ve formátu DXF, což je formát používaný většinou CAD systémů.[14]

Modul procesor

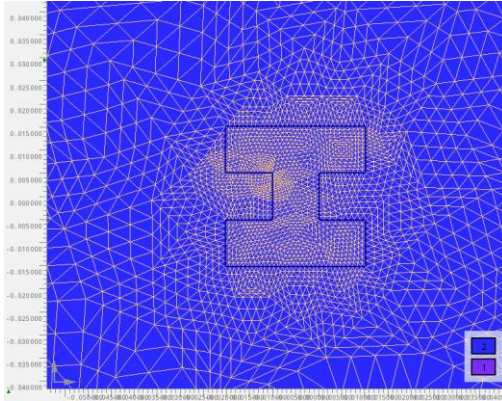
V tomto modulu dochází k diskretizaci geometrie řešeného modelu. K tomu je využíváno programu Triangle, který je založený na Delaunay triangulaci. S jeho pomocí lze vytvořit velmi přesnou nestrukturovanou trojúhelníkovou síť. Modul využívá při výpočtu elementy vyššího řádu přesnosti a automatickou *hp*-adaptivitu, což je automatické zjemnění sítě a řádu polynomu na elementu dle potřeby. Pro řešení získané soustavy algebraických rovnic je použit UMFPACK z balíku SuiteSparse.[14]

Modul postprocesor

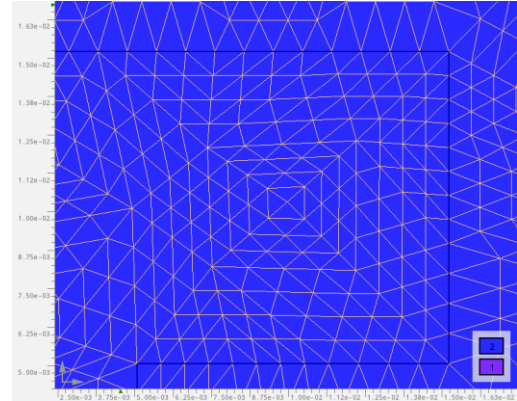
V posledním modulu se vyhodnocují výsledky. Vypočtená data můžeme následně zobrazit pomocí barevných map a vektorů nebo je dále zpracovat jako povrchové či objemové integrální veličiny. Další možností zobrazení výsledných hodnot je ve formě grafu, kde máme na výběr mezi závislostí na souřadnicích resp. v čase.[14]

4.3 Použitá metoda řešení

Aplikace Agros2D využívá k výpočtu rozložení fyzikálních polí metodu konečných prvků vyššího řádu přesnosti. Základní myšlenkou této numerické metody pro řešení diferenciálních rovnic je rozdělení řešené oblasti na podoblasti, tzv. konečné prvky. V našem případě se jedná o rozdělení řešené oblasti na hustou trojúhelníkovou síť. Poté, co se formulují rovnice pro chování jednotlivých elementů, následuje jejich složení a získání výsledné soustavy rovnic. Využitím rovnic získaných při analýze jednotlivých elementů popíšeme chování celého systému. S ohledem na okrajové či počáteční podmínky získáme vlastní řešení systému rovnic, včetně primárních neznámých, které se dle potřeby využijí k dopočítání dodatečných výsledků.[15][16][21]



Obr. 4.1: Rozložení výpočtové sítě u H-přípojnice



Obr. 4.2: Detail výpočtové sítě u H-přípojnice

4.4 Model magnetického pole

Model magnetického pole vychází z první Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru (3.1). V této rovnici můžeme zanedbat účinky posuvných proudů, jelikož uvažujeme pomalé časové změny elektrického pole. Danou rovnici můžeme tedy zapsat ve tvaru

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (4.1)$$

kde \mathbf{H} je vektor intenzity magnetického pole a \mathbf{J} vektor celkové proudové hustoty. Pokud využijeme vztahu (3.8), kde indukci vyjádříme pomocí magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} , dostaneme rovnici ve tvaru

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) = \mathbf{J}, \quad (4.2)$$

kde μ je permeabilita a \mathbf{B}_r remanentní indukce permanentních magnetů.

Pomocí zobecněné intenzity elektrického pole \mathbf{E}_0 vyjádříme proudovou hustotu. Zobecněná intenzita elektrického pole vyplývá z Lorentzova zákona, a je dána součtem intenzity vnějšího elektrického pole \mathbf{E} a intenzity elektrického pole vznikající vlivem vzájemného pohybu prostředí a vnějšího magnetického pole

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (4.3)$$

kde \mathbf{v} představuje rychlost vzájemného pohybu a \mathbf{B} je indukce vnějšího magnetického pole.

Dosadíme-li získanou rovnici (4.3) do druhé Maxwellovy rovnice (3.2), získáme

$$\operatorname{rot} (\mathbf{E}_0 - \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) = -\operatorname{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (4.4)$$

Odstraněním operátoru rotace a vynásobením celé rovnice elektrickou vodivostí γ získáme výsledný vztah pro celkovou proudovou hustotu vířivých proudů

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}_0 = \gamma (\mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{A}) - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \text{grad} \varphi + \mathbf{J}_{ext}, \quad (4.5)$$

kde první člen představuje pohybovou složku, druhý člen složku transformační, třetí člen složku potenciální (proudová hustota od vnějšího zdroje) a poslední čtvrtý člen představuje proudovou hustotu vzniklou jinými vlivy, než jsou výše uvedené.

Dosazením výše odvozeného vztahu pro celkovou proudovou hustotu vířivých proudů \mathbf{J} do rovnice (4.2) získáme výslednou parciální diferenciální rovnici popisující rozložení magnetického pole

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} (\text{rot } \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma (\mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{A}) = \mathbf{J}_{ext} - \gamma \text{grad} \varphi. \quad (4.6)$$

Pokud je magnetické pole harmonické, zavedeme symbolicko-komplexní zobrazení a popíšeme ho následující rovnicí

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} (\text{rot } \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) - \gamma (\mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{A}) + j\omega \gamma \mathbf{A} = \mathbf{J}_{ext}, \quad (4.7)$$

kde poslední člen levé strany představuje transformační složku respektující budící frekvenci magnetického pole [16][17].

4.5 Model teplotního pole

Model teplotního pole je popsán pomocí Fourier-Kirchhoffovy rovnice, která je odvozena ve druhé kapitole. Lze ji vyjádřit

$$\text{div} (\lambda \text{grad} T) = \rho c \frac{dT}{dt} - p_j, \quad (4.8)$$

kde λ je tepelná vodivost, T teplota, ρ měrná hmotnost, c měrná tepelná kapacita a p_j jsou objemové Jouleovy ztráty. Tyto ztráty vznikají na základě tepelných účinků vířivých proudů a lze je vyjádřit následující rovnicí

$$p_j = \frac{\|\mathbf{J}_v\|^2}{\gamma}, \quad (4.9)$$

kde \mathbf{J}_v je proudová hustota vířivých proudů.

Po úpravě lze výslednou parciální diferenciální rovnici popisující rozložení teplotního pole zapsat ve tvaru

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T \right) - p_j, \quad (4.10)$$

kde \mathbf{v} je vektor rychlosti pohybu příslušné části systému vůči okolnímu prostředí.[16][17]

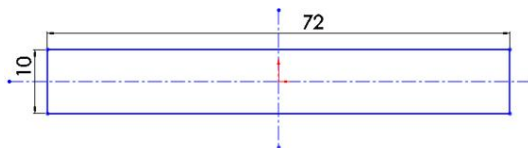
5 Numerický model a řešení problému

Pro vytvoření modelů třífázových přípojnicových systémů bylo důležité zvolit průřezy jednotlivých vodičů, jejich materiály a prostorové uspořádání dílčích fází. Problém byl řešen jako slabě sdružená úloha magnetického a teplotního pole s pevně zadanými materiálovými parametry. Nejprve bylo vyřešeno rozložení magnetického pole, z něhož byly následně vypočteny měrné Jouleovy ztráty p_j . Na základě hodnot získaných z řešení magnetického pole bylo vypočteno rozložení teplotního pole, z kterého se dále odečítaly hodnoty zkoumaných veličin.

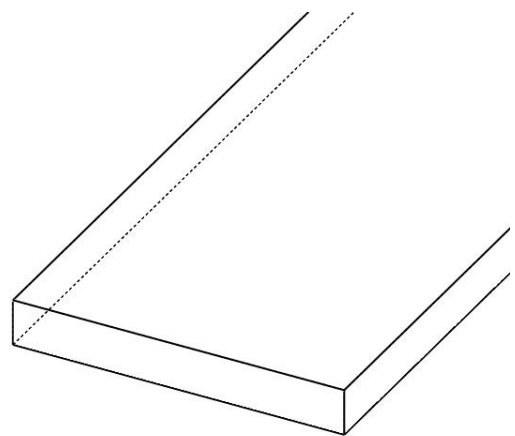
5.1 Průřezy řešených přípojnic

Při výběru tvarů průřezů modelovaných přípojnic byl brán ohled zejména na jejich četnost využití v technické praxi. Pro všechny přípojnice byl stanoven jednotný obsah průřezu $S = 720 \text{ mm}^2$, což nám u všech modelů poskytuje vytvoření identických podmínek.

První z řešených typů přípojnic znázorněných na obrázcích 5.1 a 5.2 má obdélníkový tvar. Tento druh přípojnice je velmi často koncipován s velkým rozdílem v poměru stran, což má za následek omezení skin efektu u protékajícího proudu. Výhodou těchto přípojnic je velmi snadná realizace rozvodu elektrické energie a tím významné ušetření času.

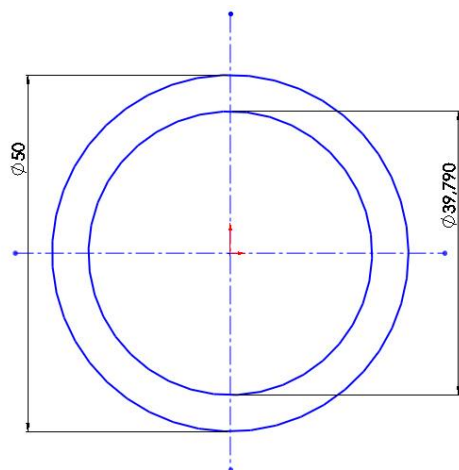


Obr. 5.1: Výkres průřezu ploché přípojnice.
 $S = 720 \text{ mm}^2$

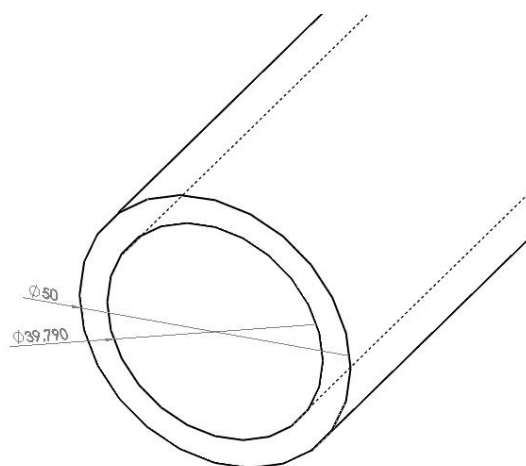


Obr. 5.2: 3D model ploché přípojnice

Druhým modelovaným typem profilového vodiče je dutá přípojnice znázorněná na obrázku 5.3 a 5.4. Tento tvar průřezu je vhodný zejména kvůli omezení velikosti ztrát, které by v přípojnici vznikaly vlivem průchodu proudu v povrchové vrstvě materiálu, resp. skin efektu. Nevýhodou dutých přípojnic je na rozdíl od plochých přípojnic složitost jejich kompletace, která se provádí pomocí svařování s využitím spojovacích vložek.[11]

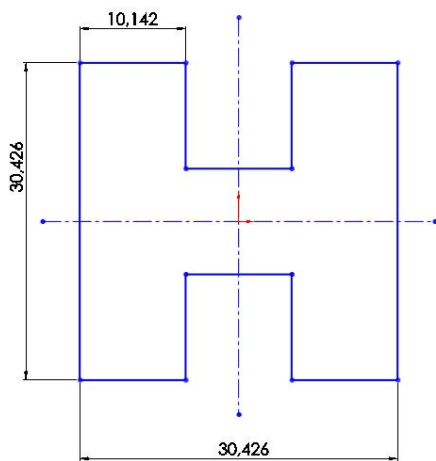


Obr. 5.3: Výkres průřezu duté přípojnice.
 $S = 720 \text{ mm}^2$

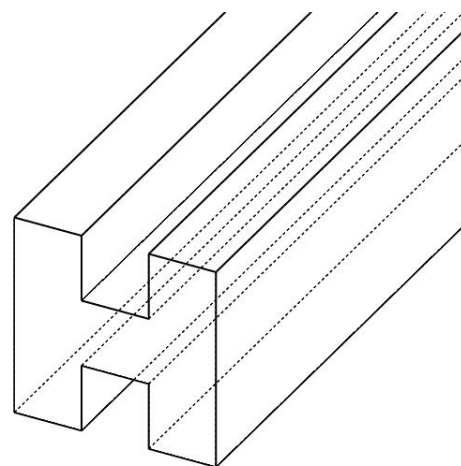


Obr. 5.4: 3D model duté přípojnice

Posledním zvoleným druhem přípojnice je profilový vodič s průřezem ve tvaru H znázorněný na obrázcích 5.5 a 5.6. Tyto přípojnice jsou v praxi využívány tam, kde je nutné při zachování menších rozměrů celého systému přenášet vyšší jmenovité proudy.



Obr. 5.5: Výkres průřezu H-přípojnice.
 $S = 720 \text{ mm}^2$



Obr. 5.6: 3D model H-přípojnice

5.2 Použité materiály a jejich parametry

Pro vytvoření dílčích modelů bylo nutné definovat potřebné parametry všech použitých materiálů, a to jak pro magnetické, tak teplotní pole. Jako materiál pro přípojnice byla zvolena slitina hliníku s vysokou vodivostí Al99,5-E splňující normy EN AW-1350 a měď E-Cu57

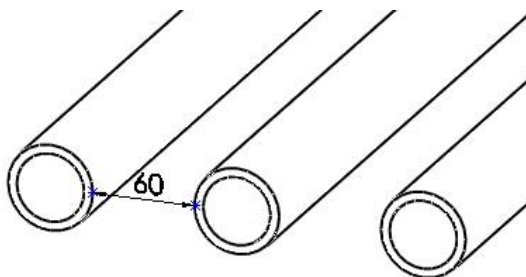
splňující normy EN CW004A. Jako materiál okolního prostředí byl zvolen vzduch. Následující tabulka obsahuje přehled parametrů, které byly při realizaci jednotlivých modelů použity.

Tab. 5.1 Fyzikální vlastnosti použitých materiálů

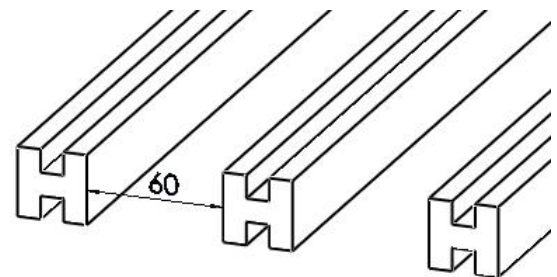
	γ [S/m]	μ_r [-]	λ [W/m.K]
měď E-Cu57	$57 \cdot 10^6$	1	387,17
hliník Al99,5-E	$35,4 \cdot 10^6$	1	218
vzduch	0	1	

5.3 Uspořádání řešených modelů

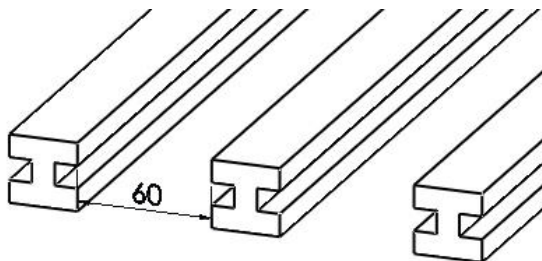
Po určení průřezů a materiálů vhodných k realizaci jednotlivých modelů zbývalo zvolit vzájemná uspořádání dílčích fází. S ohledem na komerčně nabízená řešení přípojnicových systémů byla vybrána dvě používaná uskupení. Vhodným zkombinováním všech takto zvolených kritérií bylo vytvořeno celkem 14 variant určených k vytvoření samotných modelů. Všechny varianty jsou bez uvažování použitých materiálů zobrazeny na obrázcích 5.7 až 5.13. Z důvodu zachování stejných podmínek bylo u všech variant nutné stanovit jednotný odstup fází. Po analýze trhu byl s ohledem na četnost využití v technické praxi zvolen vzájemný odstup přípojníc 60mm.



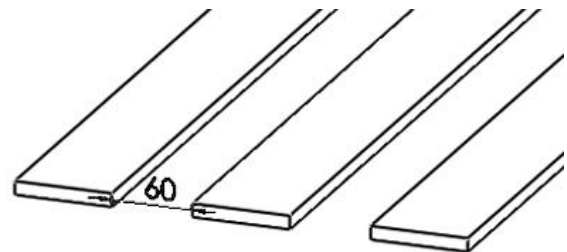
Obr. 5.7: Uspořádání přípojníc. Varianta A



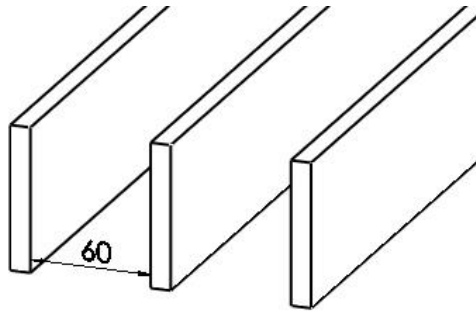
Obr. 5.8: Uspořádání přípojníc. Varianta B



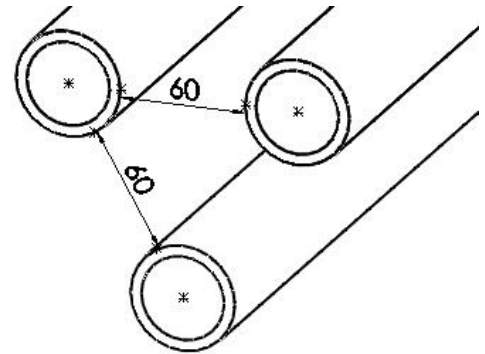
Obr. 5.9: Uspořádání přípojníc. Varianta C



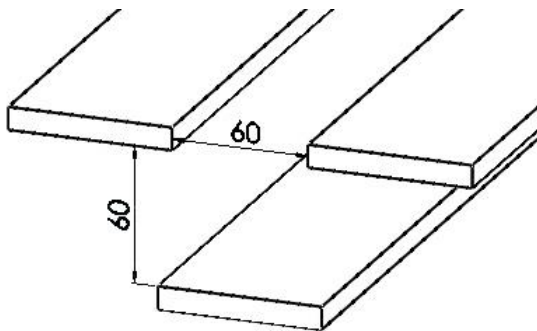
Obr. 5.10: Uspořádání přípojníc. Varianta D



Obr. 5.11: Uspořádání přípojnic. Varianta E



Obr. 5.12: Uspořádání přípojnic. Varianta F

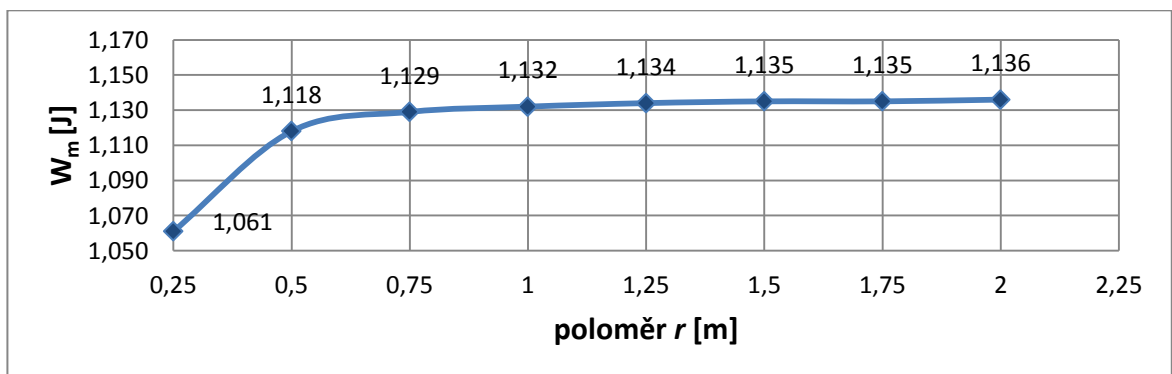


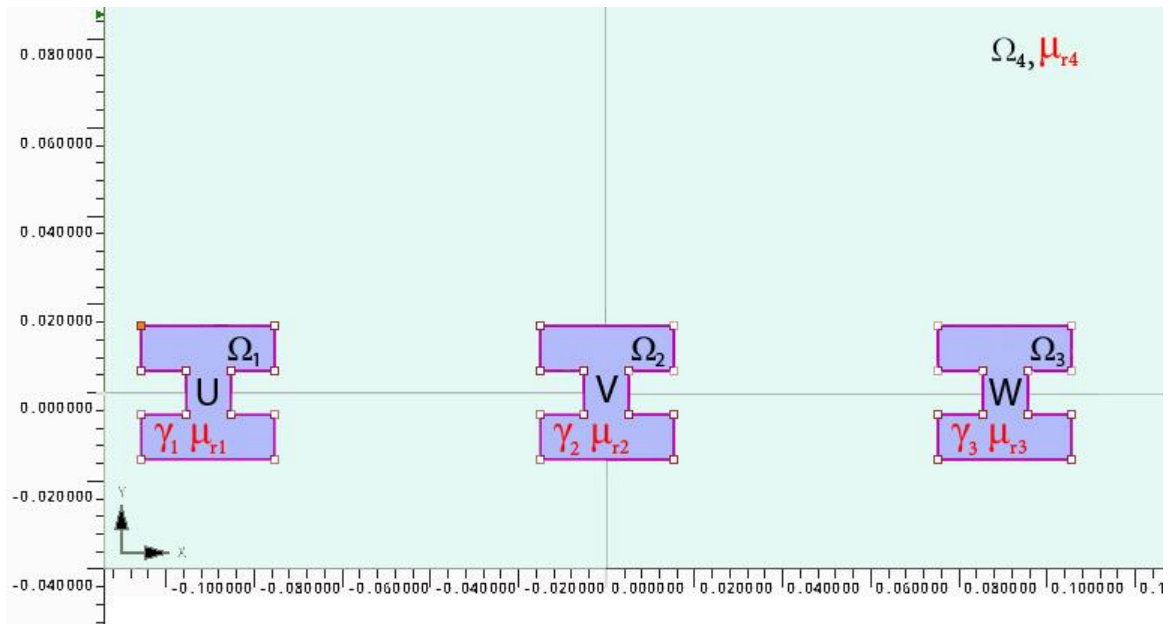
Obr. 5.13: Uspořádání přípojnic. Varianta G

5.4 Realizace modelů v Agros2D

Řešení magnetického pole

Na obrázku 5.15 můžeme vidět geometrické uspořádání jednoho z modelů vytvořeného v aplikaci Agros2D. Oblasti Ω_1 , Ω_2 a Ω_3 v modelu charakterizují materiál přípojnic. Kruhová oblast Ω_4 , jejíž velikost poloměru byla zvolena $r = 2$ m, pak respektuje parametry zvoleného prostředí, tedy v našem případě vzduchu. Takovýto rozsah oblasti Ω_4 se z hlediska náročnosti výpočtu ukázal jako přijatelný a pro řešení uvedených modelů plně dostačující, což dokazuje i obrázek 5.14. Přiřazením Dirichletovy okrajové podmínky na hranici této oblasti, resp. vzduchu, definujeme celkovou oblast daného řešení. V případě magnetického pole se jedná o přiřazení pomyslnému okraji oblasti Ω_4 velikost vektoru magnetického potenciálu $A = 0$.

Obr. 5.14: Energie magnetického pole u oblasti Ω_4 v závislosti na jejím poloměru r



Obr. 5.15: Geometrické uspořádání modelu pro řešení magnetického pole u varianty C

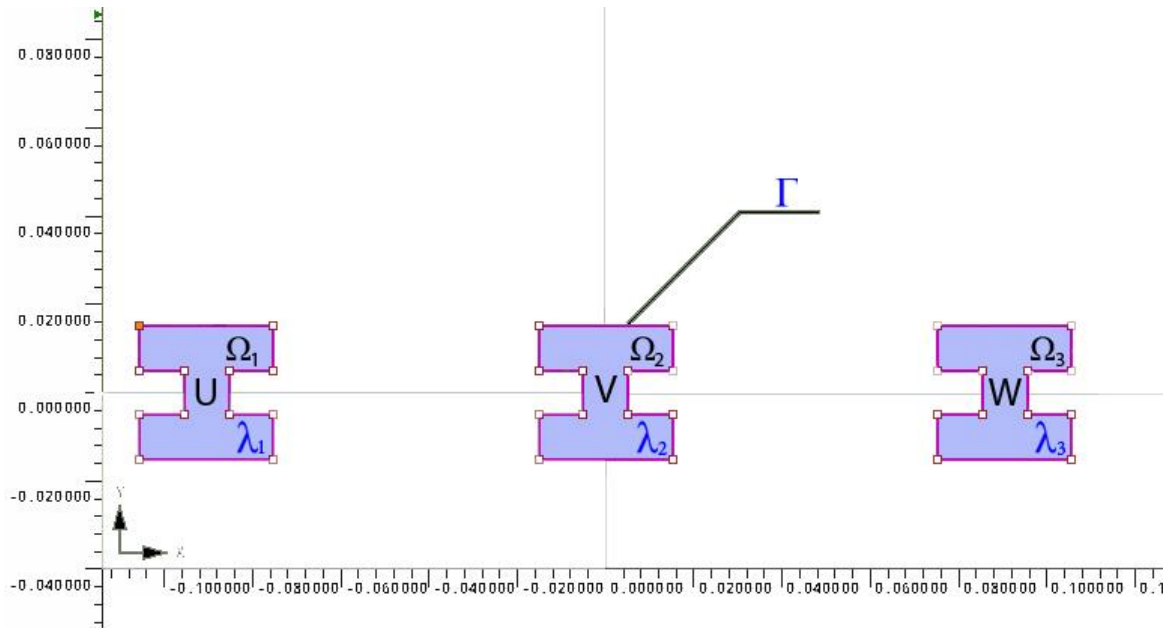
Rozložení magnetického pole bylo v okolí přípojníc řešeno jako harmonický problém při frekvenci $f = 50$ Hz. Hodnoty jmenovitých proudů, které jednotlivými vodiči procházely, se měnily od 800 A do 2000 A, přičemž jejich fázový posuv byl vždy 120° . Pro všechny definiční oblasti určující materiál byly potřeba zadat hodnoty jejich vodivosti γ a relativní permitivity μ_r . Rozložení magnetického pole, které vzniklo na základě harmonického proudu procházejícího v přípojnících, vyjádříme pomocí Helmholtzovy rovnice (4.7). V našem případě můžeme tuto rovnici vyjádřit bez uvažování remanentní indukce permanentních magnetů \mathbf{B}_r , a s nulovým vektorem rychlosti pohybu \mathbf{v} v podobě

$$\text{rot}(\text{rot}\mathbf{A}) - \gamma j \mu \omega \mathbf{A} = \mu \mathbf{J}_{ext}. \quad (5.1)$$

Pro docílení přesného řešení byla pro oblasti Ω_1 , Ω_2 a Ω_3 zjemněna výpočtová síť tak, že obsah jednoho elementu nebyl vyšší než 10^{-6} m². Řešená výpočtová síť H-přípojnice je patrná na obrázcích 4.1 a 4.2.

Řešení teplotního pole

Model pro řešení teplotního pole vytvořený v aplikaci Agros2D je zobrazen na obrázku 5.16. Jeho geometrie je podobná jako u předchozího modelu, nicméně se zde neuvažuje jako okolní prostředí vzduch, jelikož by docházelo ke značné chybě výpočtu. Toto zkrácení by způsobilo omezení aplikace Agros2D modelovat přirozené proudění vzduchu, ke kterému v normálu běžně dochází.



Obr. 5.16: Geometrické uspořádání modelu pro řešení teplotního pole u varianty C

Při řešení rozložení teplotního pole se v jednotlivých definičních oblastech Ω_1 , Ω_2 a Ω_3 vychází z velikosti měrných Jouleových ztrát p_j , které vnikají v celém objemu jednotlivých přípojníc a jsou rovnoměrně rozloženy po jejich povrchu. Tento fakt vyjadřuje i rovnice (4.10), kterou můžeme v našem případě bez uvažování pohybu systému zapsat pro ustálený stav jako

$$-\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = p_j. \quad (5.2)$$

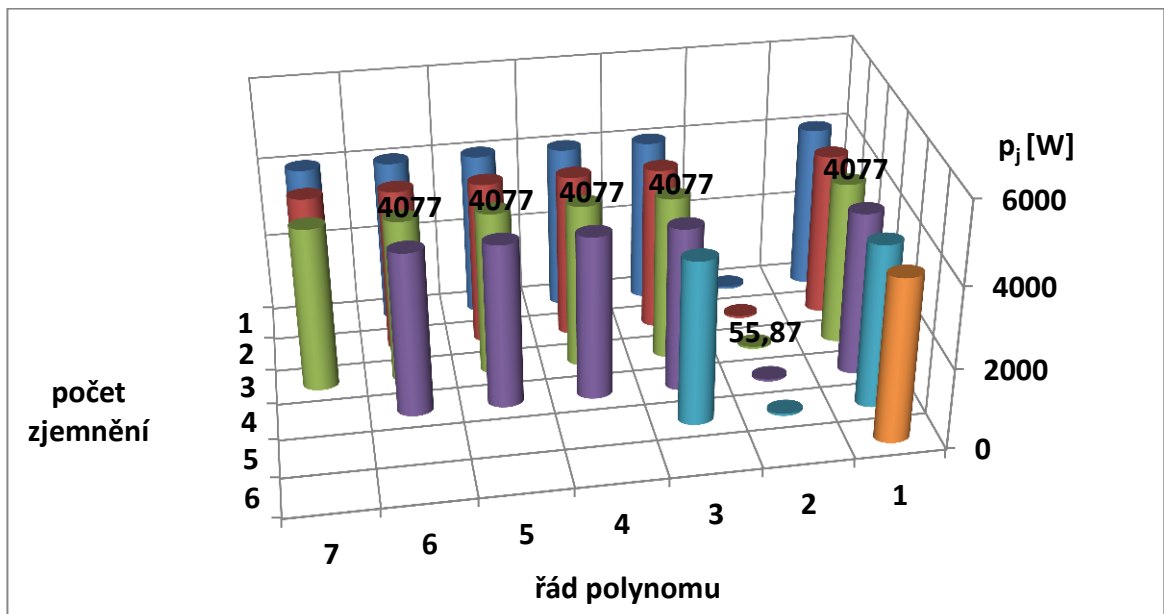
K tomu, aby mohla být tato rovnice vyřešená, bylo důležité u každé oblasti definující materiál zadat velikost součinitele tepelné vodivosti λ . Nicméně výše uvedená rovnice neuvažuje přenos tepla konvekcí do prostoru, čehož docílíme přiřazením Neumannovy okrajové podmínky pro teplotní tok na hranice Γ dílčích přípojníc z rovnic (2.2) a (2.8) v podobě

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n_0} = \alpha(T - T_{ext}), \quad (5.3)$$

kde součinitel α respektuje přestup tepla konvekcí, T je teplota ohřívaného tělesa a T_{ext} představuje teplotu okolního prostředí. V našem případě byla velikost těchto teplot stanovena 20°C a velikost koeficientu pro součinitel přestupu tepla $\alpha = 17$. Pro získání co nejpřesnějšího výsledku byla opět pro oblasti Ω_1 , Ω_2 a Ω_3 velmi významně zjemněná výpočetní síť.

5.5 Konvergence řešení

Při analýze konvergence řešení u jednotlivých modelů byl zjištěn zajímavý jev, který způsoboval významné zkreslení výsledků. Pokud se totiž při výpočtu rozložení magnetického pole neaproximovala rovnice (5.1) polynomem druhého řádu, došlo k rezonanci řešení, resp. zkreslení veličin odečítaných z magnetického pole až o několik řádů. Míra zkreslení Jouleových ztrát p_j je pro zatěžovací proud $I = 2000$ A zobrazena na obrázku 5.17.



Obr. 5.17: Velikost Jouleových ztrát v závislosti na nastavení parametrů řešené sítě

Tab. 5.1: Velikost Jouleových ztrát p_j [W] v závislosti na nastavení parametrů řešené sítě [22]

		počet zjemnění					
		1	2	3	4	5	6
řád polynomu	1	4076	4077	4077	4077	4077	4077
	2	55,87	55,87	55,87	55,87	55,87	-
	3	4080	4078	4077	4077	4077	-
	4	4079	4078	4077	4077	-	-
	5	4079	4078	4077	4077	-	-
	6	4079	4078	4077	4077	-	-
	7	4079	4078	4077	-	-	-

Tab. 5.2: Počet stupňů volnosti řešení v závislosti na nastavení parametrů sítě [22]

		počet zjemnění					
		1	2	3	4	5	6
řád polynomu	1	11506	11678	12310	14502	23494	59910
	2	11678	12310	14502	23494	59910	-
	3	11946	13214	18230	38630	120902	-
	4	12310	14502	23494	59910	-	-
	5	12770	16174	30294	87334	-	-
	6	13326	18230	38630	120902	-	-
	7	13978	20670	48502	-	-	-

Tento jev se vyskytoval u všech řešených variant. Z toho vyplývá, že zvyšování počtu stupňů volnosti pomocí vyššího řádu aproximace řešených rovnic nebylo možné. Pro docílení co nejpřesnějšího výsledku tedy pouze stačila nastavit větší jemnost sítě, což potvrzují i tabulky (5.1) a (5.2).

6 Zhodnocení výsledků

Zpracováním odečtených hodnot Jouleových ztrát p_j , teplot T a Lorentzových sil F_L můžeme jednoduše porovnat chování řešených systémů přípojnic při jejich provozním stavu. V následující kapitole jsou všechny výsledky, získané na základě simulací v aplikaci Agros2D, vyjádřeny ve formě 2D a 3D grafů.

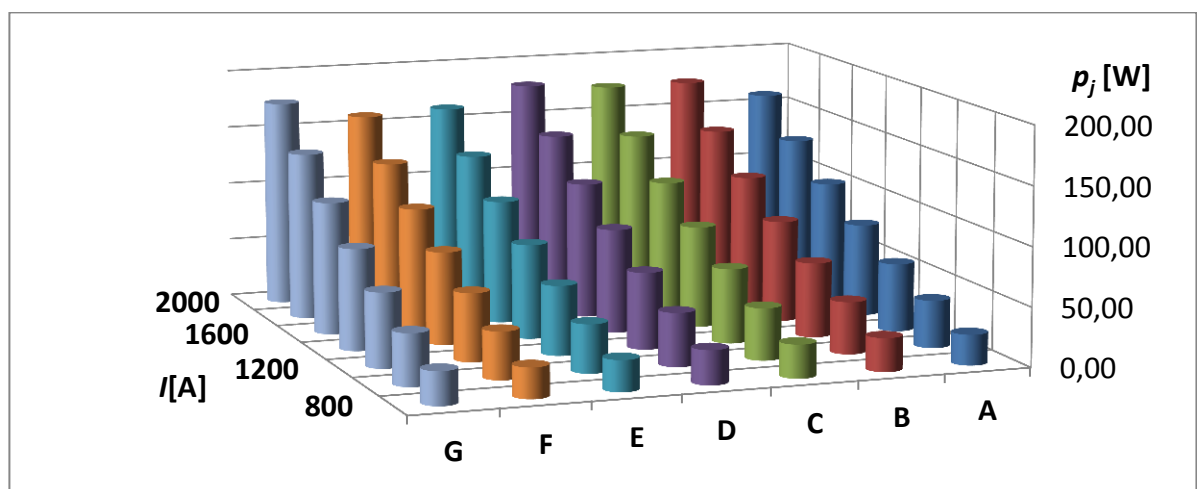
6.1 Měrné Jouleovy ztráty p_j

Jedná se o tepelné ztráty, které vznikají v přípojnicích o odporu R vlivem protékajícího proudu I . Jejich velikost můžeme vyjádřit jako

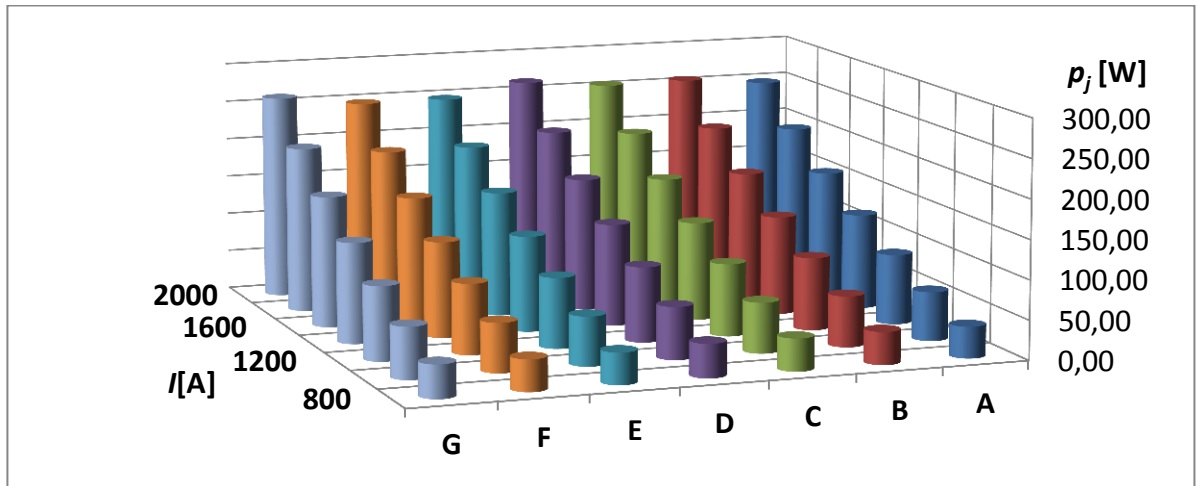
$$p_j = RI^2. \quad (6.1)$$

Tuto závislost potvrzují i naměřené hodnoty, kde je u dílčích variant možné sledovat nárůst Jouleových ztrát s kvadrátem zvyšujícího se zatěžovacího proudu.

Odečtené hodnoty Jouleových ztrát se pro jednotlivé varianty příliš neliší, nicméně je třeba si uvědomit, že získané výsledky jsou aplikací Agros2D vypočteny pro pouhý jeden metr délky vodiče. V průmyslových rozvodech, kde tyto vodiče dosahují délky desítek metrů, by se činné ztráty lišily až o několik kilowattů. V průměru bylo nejvyšších ztrát dosahováno v plochých přípojnicích umístěných vedle sebe a naopak nejnižších ztrát v trubkovitých přípojnicích uspořádaných do rovnostranného trojúhelníku. Následující grafy představují velikost Jouleovo ztrát p_j pro všechny modelované varianty.



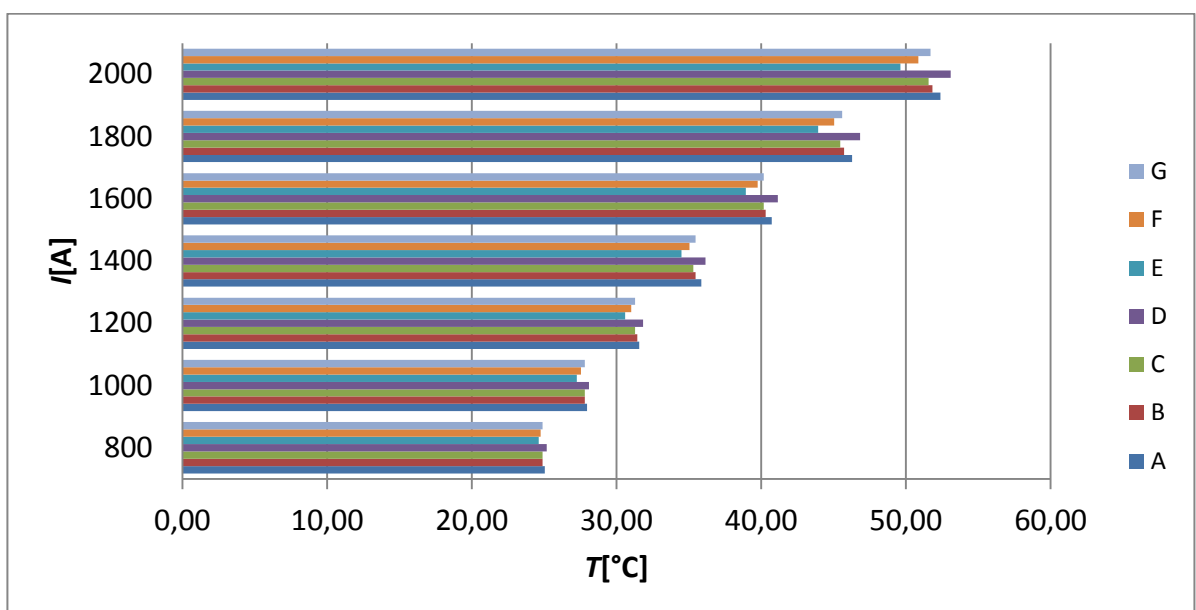
Obr. 6.1: Velikost Jouleových ztrát měděných přípojnicových systémů



Obr. 6.2: Velikost Jouleových ztrát přípojnicových systémů vyrobených ze slitiny hliníku

6.2 Provozní teploty přípojnic

Provozní teploty byly u jednotlivých přípojnic vypočteny na základě měrných Jouleových ztrát, což potvrzuje i fakt, že obě porovnávané veličiny dosahují svého maxima u stejných variant uspořádání. Z důvodu omezení aplikace Agros2D modelovat v okolí přípojnic běžné chování vzduchu není ve výsledcích oteplení jednotlivých vodičů započten podíl vzájemného ohřívání vlivem konvekce a radiace. Okrajová podmínka na hranicích vodiče respektuje pouze jeho ochlazování vlivem přestupu tepla do okolí. I přes to, že byly tyto stejné podmínky nastavené u všech modelovaných variant, mohlo dojít k lehkému zkreslení výsledků. Celý problém je řešen v ustáleném stavu, a tak jsou rozdíly teplot v celém objemu přípojnice zcela minimální. Odečtená velikost teploty pak představuje její průměrnou hodnotu v celém objemu vodiče. Na obrázku 6.3 můžeme vidět hodnoty dosahovaných teplot u jedné z přípojnic vyrobené ze slitiny hliníku.

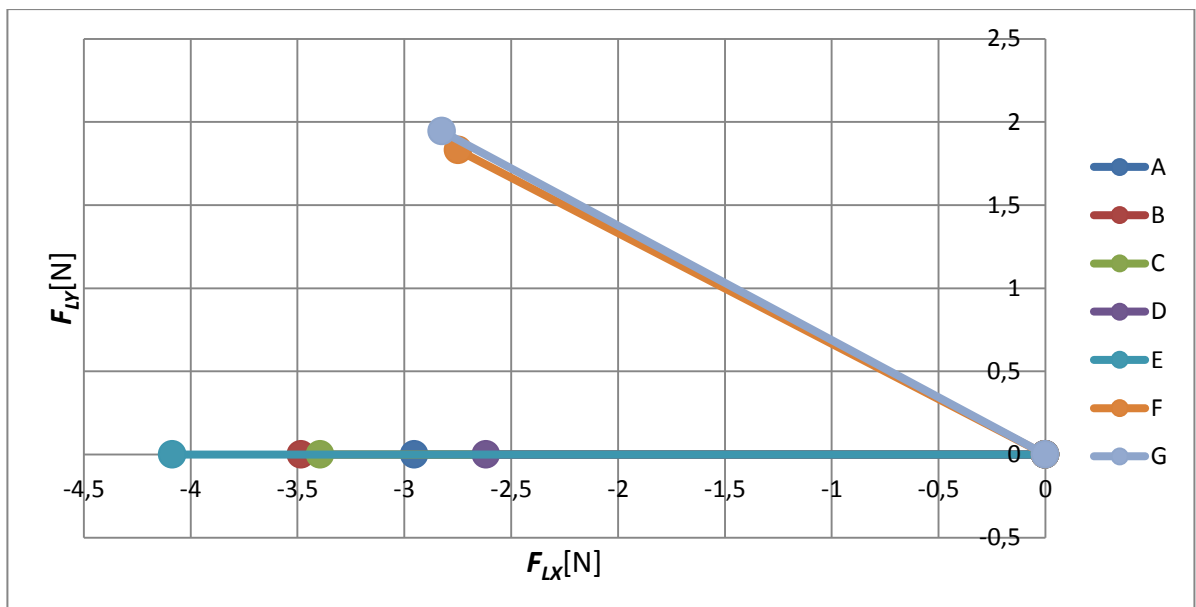


Obr. 6.3: Odečtené hodnoty teplot z přípojnice vyrobené ze slitiny hliníku

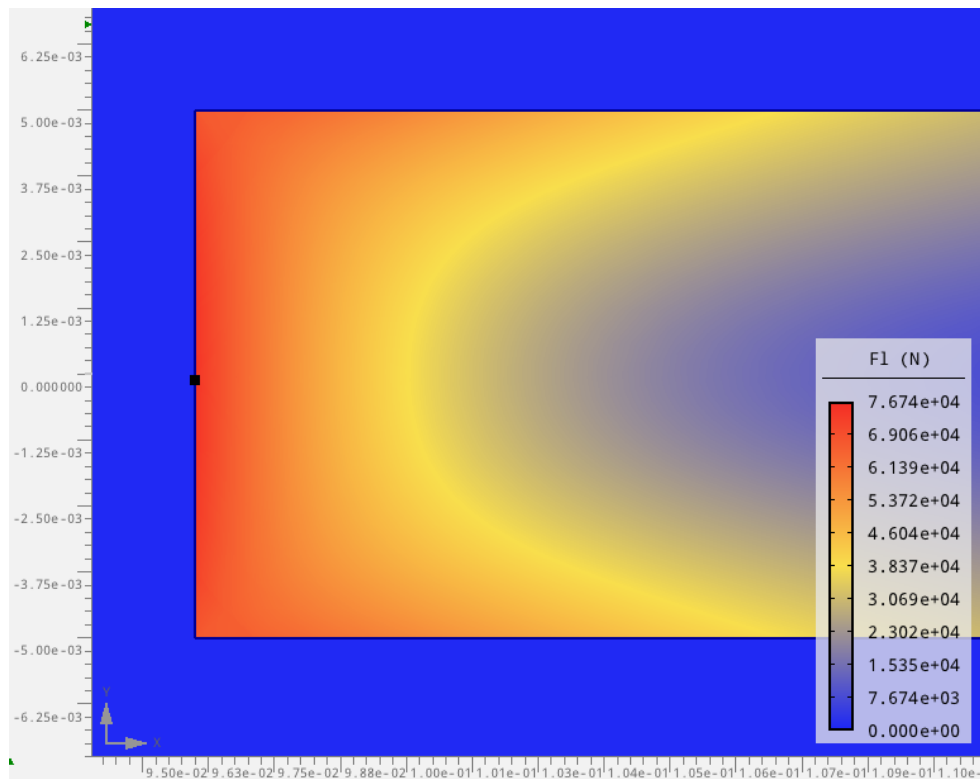
6.3 Velikost působení Lorentzových sil

Vodiče pro elektrický rozvod musí být schopny odolávat mechanickému namáhání, které může nastat při montáži nebo během provozu. U vodičů pro vnitřní rozvod dochází k největšímu mechanickému namáhání při montáži a vlivem zkratových proudů. Průřezy vodičů musí být navrženy tak, aby z hlediska mechanické pevnosti snesly nejvyšší namáhání, které může v provozu nastat. Při analyzování Lorentzových sil, které na vodiče působí při běžném provozu, můžeme odhadnout jejich chování při mnohonásobně vyšším zkratovém proudu.

Lorentzova síla byla pro každou fázi odečítána ve směru x a y, z čehož se pak vypočítal výsledný vektor síly F_L , která na daný vodič působí. Příspěvek Lorentzovy síly ve směru osy y byl u systémů uspořádaných vedle sebe téměř nulový, naopak ve směru osy x zde bylo u plochých přípojníc dosaženo nejvyšší hodnoty. Systémy uspořádané do rovnostranného trojúhelníka pak dosahovaly stejných hodnot v obou směrech. Na obrázku 6.4 je možné pozorovat velikosti vektorů Lorentzových sil F_L působící na levé vodiče u jednotlivých variant při zatěžovacím proudu $I = 2000$ A. Zde je nutné podotknout, že tyto vektory respektují součet všech dílčích sil, které v dané přípojnici působí, což může představu o mechanickém namáhání přípojnice velmi zkreslit. Na obrázku 6.5 je patrné, že velikosti sil působící na okraji ploché přípojnice dosahují až deseti tisíckrát vyšších hodnot.



Obr. 6.4: Velikost Lorentzových sil působící na levé vodiče při $I = 2000$ A



Obr. 6.5: Lorentzovy síly působící na okraji ploché přípojnice. Varianta D [22]

6.4 Porovnání zvolených materiálů

Pokud porovnáme výsledky získané u modelů využívající měděné přípojnice proti modelům využívající přípojnice vyrobené ze slitiny hliníku, opět potvrdíme platnost výše uvedeného vztahu (6.1). Ve všech přípojnicových systémech vyrobených ze slitiny hliníku vznikají přibližně o 32 % vyšší Jouleovy ztráty, což úzce souvisí i s jejich teplotou. Následující tabulka vyjadřuje průměrný rozdíl teplot mezi systémem využívající měděné přípojnice a systémem využívající přípojnice vyrobené ze slitiny hliníku.

Tab. 6.1: Průměrný rozdíl teplot mezi Cu a EAl přípojnicemi

	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	6,90 %	9,90 %	12,69 %	15,44 %	17,84 %	19,87 %	21,67 %
B	6,53 %	8,88 %	11,63 %	13,72 %	15,95 %	17,70 %	19,28 %
C	6,53 %	9,05 %	11,50 %	13,38 %	15,76 %	17,53 %	19,22 %
D	6,51 %	9,02 %	11,84 %	14,12 %	16,25 %	18,18 %	19,76 %
E	6,77 %	9,17 %	12,25 %	14,65 %	16,79 %	18,86 %	20,54 %
F	6,73 %	9,58 %	12,99 %	15,46 %	17,81 %	20,04 %	21,57 %
G	6,53 %	9,21 %	11,91 %	14,34 %	16,38 %	18,36 %	20,02 %

Z hlediska Lorentzových ztrát se pak hodnoty v závislosti na použitém materiálu téměř neliší a jejich maximální hodnoty dosahují stejných výsledků.

Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zjištění silových a tepelných účinků v systémech s masivními vodiči, z nichž se práce zaměřuje výhradně na přípojnícové systémy tvořené profilovými vodiči. Tento druh rozvodu elektrické energie se v poslední době těší čím dál většího rozmachu a je kromě vnitřních provedení využíván i u moderních venkovních rozvodů velmi vysokých napětí. V úvodu diplomové práce jsou stručně vysvětleny některé základní pojmy z oblasti rozvodných zařízení. Po uvedení základních druhů profilových vodičů a materiálů využívaných při jejich výrobě, byla připomenuta základní teorie z oblasti elektromagnetického a teplotního pole.

Jelikož by byl výpočet požadovaných veličin u jednotlivých modelů velmi složitý, byla k jeho řešení využita aplikace Agros2D. Tato aplikace umožňuje vyřešení rozložení elektromagnetického a teplotního pole pomocí parciálních diferenciálních rovnic, k čemuž využívá metodu konečných prvků s vyšším řádem přesnosti. Na základě elementárních vztahů popsaných v úvodní části práce byly postupně odvozeny matematické modely elektromagnetického a teplotního pole. K vytvoření modelů bylo zvoleno sedm variant geometrického uspořádání jednotlivých fází přípojnícového systému, přičemž každá varianta byla simulována pro dva druhy materiálu profilových vodičů. Pro vytvoření identických podmínek byl u všech přípojníc stanoven stejný obsah průřezu $S = 720 \text{ mm}^2$ a jejich vzájemný odstup 60 mm.

Jako komparované veličiny byly zvoleny teplota, velikost Jouleových ztrát a velikost silového namáhání Lorentzovými silami. Pomocí těchto veličin můžeme snadno porovnat provozní vlastnosti zvolených variant přípojnícových řešení. Problém byl řešen jako ustálený děj, jelikož se jednalo o analýzu chování těchto systémů při nepřetržitém provozu. Všechny získané výsledky byly zpracovány a graficky vyjádřeny. Na jejich základě pak můžeme konstatovat, že volba uspořádání dílčích fází a typ profilového vodiče nemá na velikost jeho oteplení značný vliv. To ovšem neplatí pro volbu materiálu přípojníc, kde se rozdíly teplot jednotlivých fází liší zhruba o 20 %. Hodnoty teplot mohou být vlivem omezení aplikace Agros2D nepatrně zkresleny, protože zde nebyly uvažovány parametry prostředí v teplotním poli, a tedy zde nedochází k vzájemnému tepelnému ovlivňování fází pomocí konvekce a radiace. Tyto podmínky však byly pro všechny modely stejné a nebrání tedy v možnosti porovnávání simulovaných řešení mezi sebou. S přihlédnutím na silové působení Lorentzových sil se jako nejlepší řešení přípojnícových systémů jeví duté přípojnice z mědi uspořádané dle varianty A a jako nejhorší naopak ploché přípojnice z hliníku uspořádané dle varianty E, kde u krajních vodičů dochází k velkému mechanickému namáhání v ose x .

Použité informační zdroje

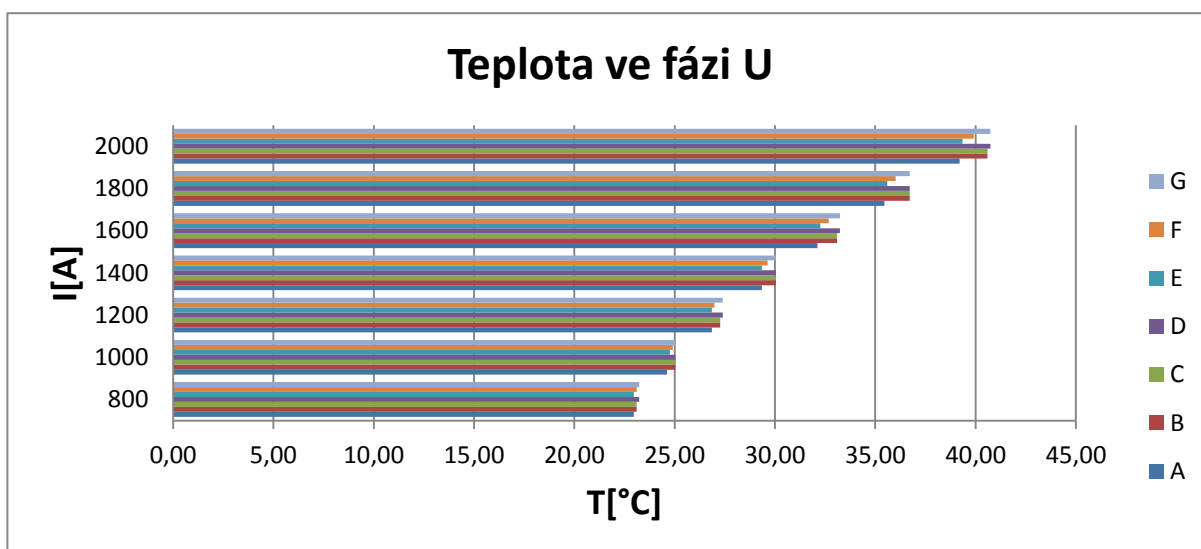
- [1] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Podpůrný text pro výuku předmětu Rozvodná zařízení. [online]. [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: http://hosting.pilsfree.net/fantom/FEL/!SZZ_2010/Rozvodna_zarizeni.pdf
- [2] FENCL, František. *Elektrický rozvod a rozvodná zařízení*. Vyd. 4. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. 198 s. ISBN 978-80-01-04351-6.
- [3] DOMES, F. *Analýza vlastností profilových vodičů pro přípojnice rozvodných zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 64 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
- [4] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002. 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [5] WÖHNER: Alles mit spannung. WÖHNER GMBH & CO. KG. *WÖHNER* [online]. 2014 [cit. 2014-02-21] Dostupné z: http://pim.woehner.de/online/cms/EN/US/catalog/product_range
- [6] GHV trading: Komponenty pro rozvaděče. GHV TRADING, spol. s r.o. *Přípojnicové systémy WÖHNER* [online]. 2014 [cit. 2014-02-21]. Dostupné z: http://www.ghvtrading.cz/komponenty-pro-rozvadece/pripojnicovy_system/
- [7] Profi elektrika. ELEKTRIKA.CZ. *RITTAL: Přípojnicové systémy a nosná ramena* [online]. 2014 [cit. 2014-02-21]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/rittal-pripojnicove-systemy-a-nosna-ramena>
- [8] ŠKOCH, Pavel. Silnoproudé rozvody – kvalitně a rychle s firmou Rittal. *ELEKTRO: časopis pro elektrotechniku* [online]. 2011, roč. 2011, č. 3 [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/silnoproude-rozvody-%E2%80%93-kvalitne-a-rychle-s-firmou-rittal-43113.html>
- [9] RITTAL CZECH. Systémy rozvodu proudu: Přípojnicové systémy [online]. [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: http://www.rittal.cz/pdf/catalogues/systemy_rozvodu_proudu.pdf
- [10] SIEMENS. SIEMENS. *Přípojnicové systémy SIVACON 8PS* [online]. 2014 [cit. 2014-02-26]. Dostupné z: <http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?vw=0&ctxnh=210cd8c0e6&ctxp=home>
- [11] EGE TRADING. *Přípojnice pro vysokonapěťové stanice*. České Budějovice, 2014. Dostupné z: http://www.ege.cz/storage/1_1322_Pripojnice_pro_vysokonapetove_stanice_finalA4.pdf
- [12] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika I: Určeno pro stud. fak. elektrotechn.* 2. vyd. Praha: ČVUT, 1985. 152 s.

- [13] SAZIMA, Miroslav a kol. *Sdílení tepla*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1993. 716 s. Česká matice technická; roč. 92 (1992), č. 454. Technický průvodce; sv. 78. ISBN 80-03-00675-9.
- [14] KARBAN, Pavel. Agros2D – aplikace pro řešení fyzikálních polí. In: *AbcLinuxu* [online]. 2010 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z:<http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>
- [15] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. 538 s. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [16] Karban, P., Mach, F., Kůs, P., Pánek, D., Doležel, I.: Numerical solution of coupled problems using code Agros2D, *Computing*, 2013, Volume 95, Issue 1 Supplement, pp 381-408, DOI 10.1007/s00607-013-0294-4
- [17] MACH, František. Rotační ohřev nemagnetických válců ve stacionárním magnetickém poli [online]. 2011 [cit. 2014-02-25]. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Pavel Karban. Dostupné z: <<http://theses.cz/id/vfzavq/>>
- [18] BENEŠOVÁ, Zdeňka a MAYER, Daniel. *Základní příklady z teorie elektromag. pole*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. 167 s. ISBN 978-80-7043-
- [19] Kurzy.cz. KURZY.CZ, spol. s r.o. *Kurzy.cz: Měď - aktuální a historické ceny mědi* [online]. 2014 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.kurzy.cz/komodity/index.asp?A=5&idk=28&curr=CZK&on=0&unit=1%20kg&lg=1>
- [20] PRIMÁK. Kitco.cz: Kolik stojí dnes hliník. *Kitco.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.kitco.cz/al-hlinik-grafy-svetova-cena-hliniku-vyvoj-ceny-historie-kolik-stoji-dnes-hlinik/>
- [21] FUSEK, Martin a Radim HALAMA. MKP a MHP - interaktivní studijní materiál [online]. [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mkpmahp_obr.pdf. Studijní materiál. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Západočeská
- [22] Karban, P. a kolektiv. Multiplatform C++ application for the solution of PDEs. (© 2014) [on line]. [cit. 2014-05-07] Dostupné z:<http://agros2d.org>.

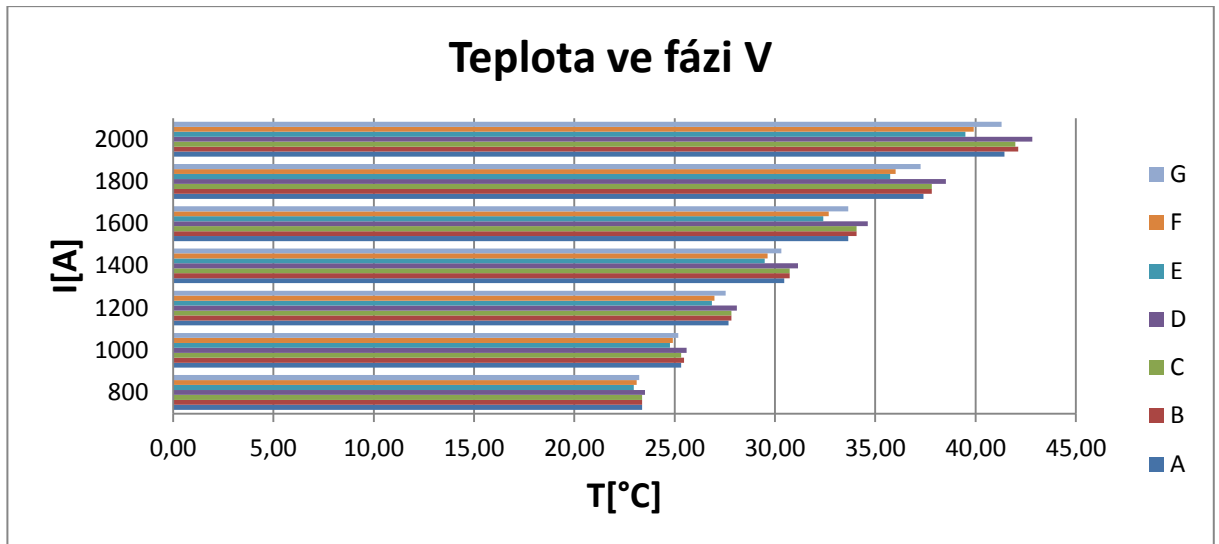
Přílohy

Příloha A: Odečtené hodnoty na základě modelování v aplikaci Agros2D u přípojníc vyrobených z mědi.

Teplota ve fázi U [°C]							
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	22,96	24,63	26,85	29,35	32,13	35,46	39,21
B	23,10	25,04	27,27	30,04	33,10	36,71	40,60
C	23,10	25,04	27,27	30,04	33,10	36,71	40,60
D	23,24	25,04	27,41	30,04	33,24	36,71	40,74
E	22,96	24,77	26,85	29,35	32,27	35,60	39,35
F	23,10	24,91	26,99	29,63	32,68	36,02	39,91
G	23,24	25,04	27,41	30,04	33,24	36,71	40,74

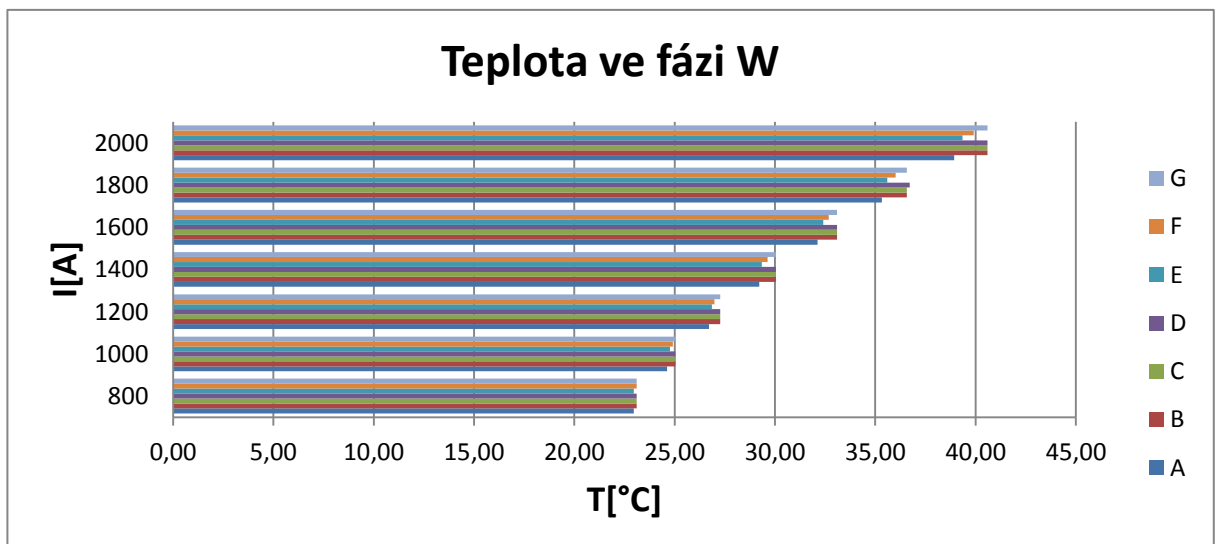


Teplota ve fázi V [°C]							
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	23,38	25,32	27,68	30,46	33,66	37,41	41,43
B	23,38	25,46	27,82	30,74	34,07	37,82	42,13
C	23,38	25,32	27,82	30,74	34,07	37,82	41,99
D	23,52	25,60	28,10	31,16	34,63	38,52	42,82
E	22,96	24,77	26,85	29,49	32,41	35,74	39,49
F	23,10	24,91	26,99	29,63	32,68	36,02	39,91
G	23,24	25,18	27,54	30,32	33,66	37,27	41,29

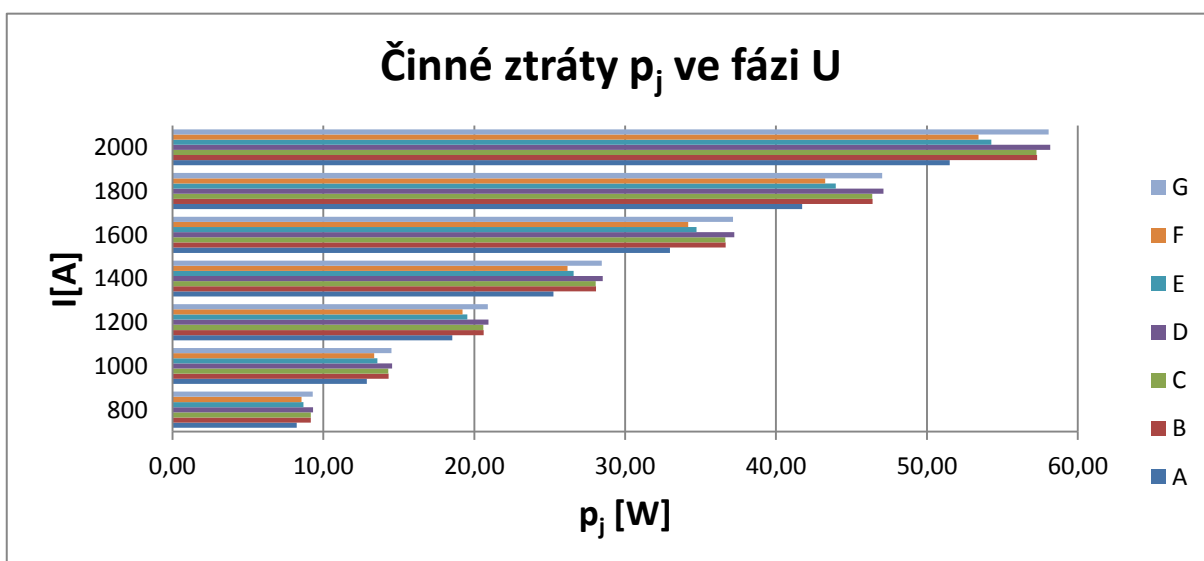


Teplota ve fázi W [°C]

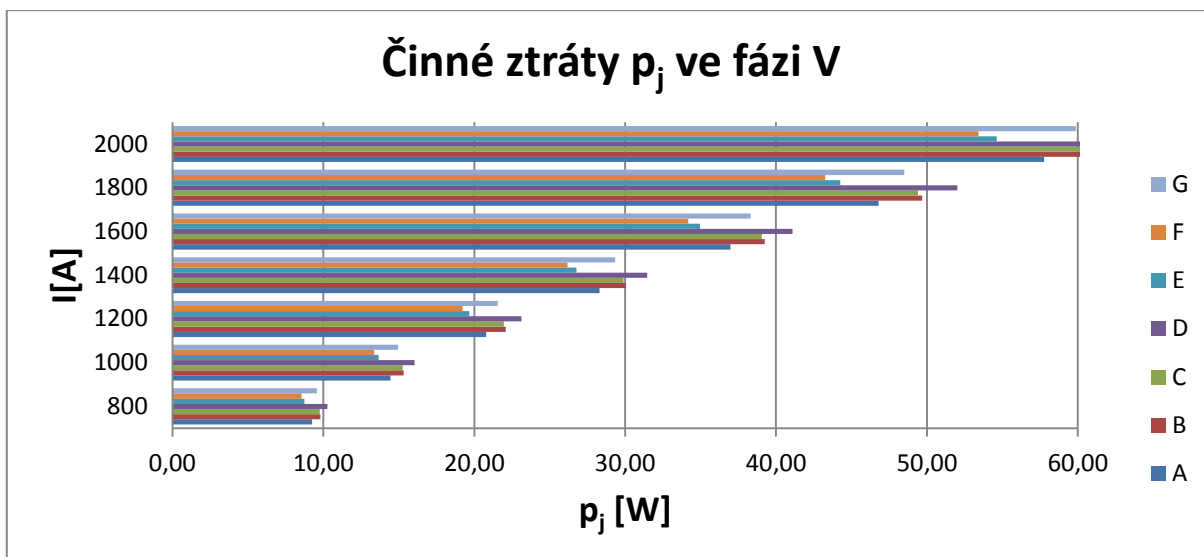
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	22,96	24,63	26,71	29,21	32,13	35,32	38,93
B	23,10	25,04	27,27	30,04	33,10	36,57	40,60
C	23,10	25,04	27,27	30,04	33,10	36,57	40,60
D	23,10	25,04	27,27	30,04	33,10	36,71	40,60
E	22,96	24,77	26,85	29,35	32,41	35,60	39,35
F	23,10	24,91	26,99	29,63	32,68	36,02	39,91
G	23,10	25,04	27,27	30,04	33,10	36,57	40,60



Činné ztráty p_j ve fázi U [W]							
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	8,24	12,88	18,55	25,25	32,98	41,73	51,52
B	9,17	14,32	20,63	28,08	36,67	46,41	57,30
C	9,16	14,31	20,61	28,06	36,64	46,38	57,26
D	9,31	14,55	20,94	28,51	37,24	47,13	58,18
E	8,68	13,57	19,54	26,59	34,74	43,96	54,28
F	8,55	13,36	19,23	26,18	34,19	43,27	53,42
G	9,29	14,52	20,90	28,45	37,16	47,03	58,06

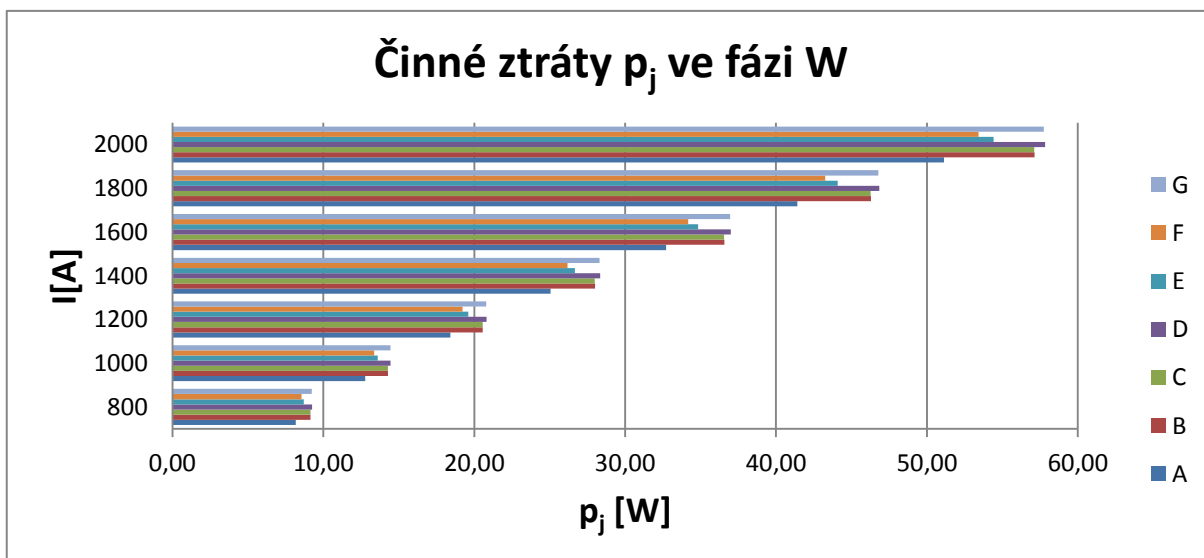


Činné ztráty p_j ve fázi V [W]							
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	9,25	14,45	20,80	28,31	36,98	46,81	57,78
B	9,81	15,33	22,08	30,05	39,25	49,68	61,33
C	9,76	15,25	21,96	29,90	39,05	49,42	61,01
D	10,28	16,05	23,12	31,47	41,10	52,02	64,22
E	8,74	13,66	19,67	26,77	34,97	44,25	54,63
F	8,55	13,36	19,23	26,18	34,19	43,27	53,42
G	9,58	14,97	21,55	29,34	38,32	48,50	59,87

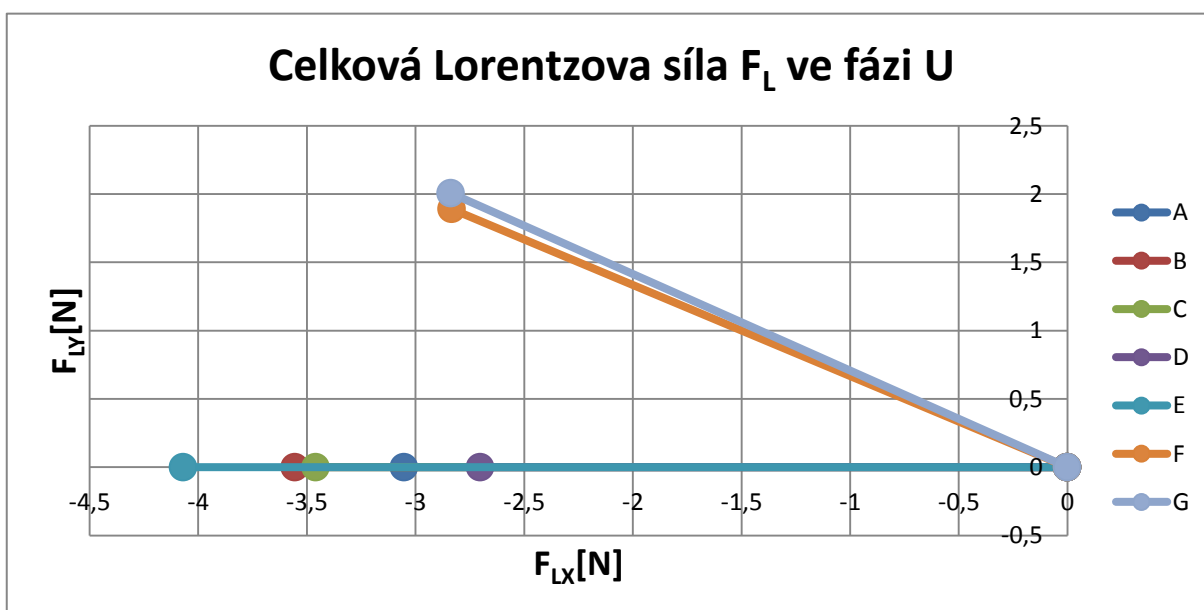


Činné ztráty p_j ve fázi W [W]

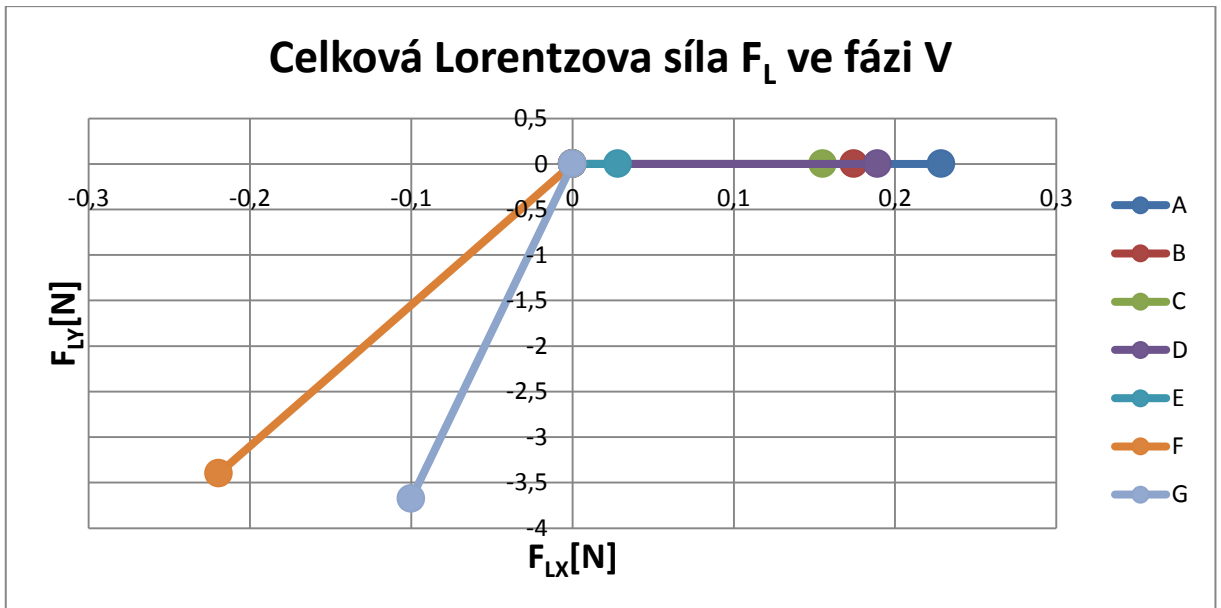
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	8,18	12,78	18,41	25,05	32,72	41,41	51,13
B	9,14	14,29	20,57	28,00	36,57	46,29	57,14
C	9,14	14,28	20,56	27,99	36,56	46,27	57,12
D	9,25	14,46	20,82	28,34	37,01	46,85	57,83
E	8,71	13,61	19,60	26,67	34,84	44,09	54,43
F	8,55	13,36	19,23	26,18	34,19	43,27	53,42
G	9,24	14,44	20,79	28,30	36,96	46,78	57,75



Celková Lorentzova síla F_L ve fázi U [N]							
	A	B	C	D	E	F	G
800	0,49	0,57	0,55	0,43	0,65	0,55	0,56
1000	0,76	0,89	0,86	0,68	1,02	0,85	0,87
1200	1,10	1,28	1,25	0,97	1,47	1,23	1,25
1400	1,50	1,74	1,70	1,32	1,99	1,67	1,70
1600	1,95	2,28	2,21	1,73	2,60	2,18	2,22
1800	2,47	2,88	2,80	2,19	3,30	2,76	2,81
2000	3,05	3,56	3,46	2,70	4,07	3,41	3,47

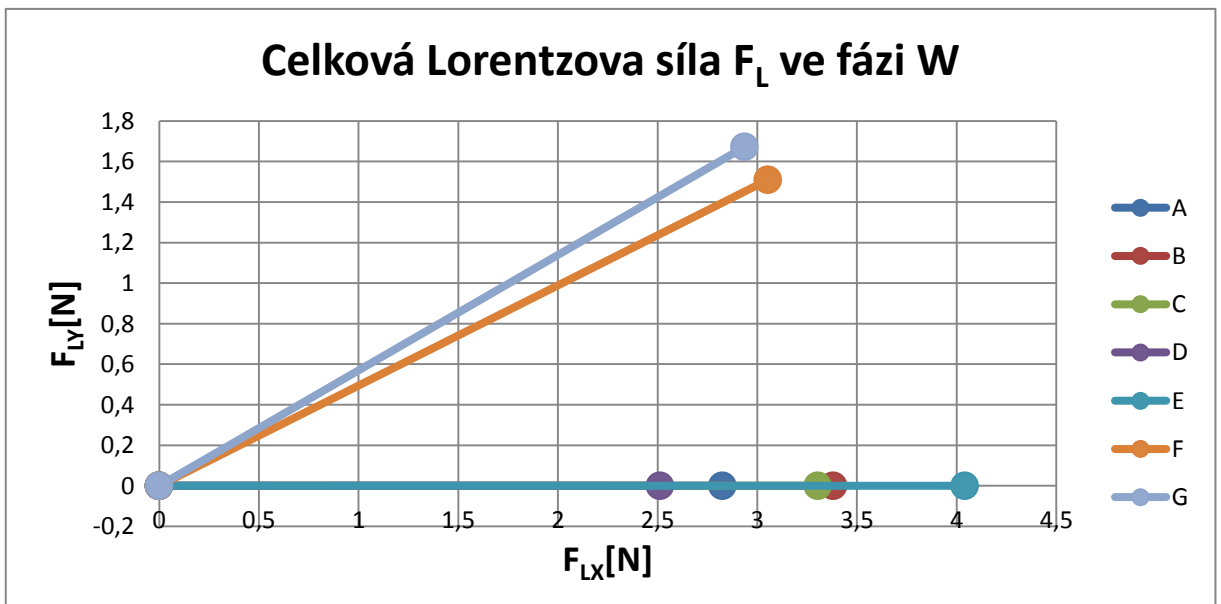


Celková Lorentzova síla F_L ve fázi V [N]							
	A	B	C	D	E	F	G
800	0,04	0,03	0,02	0,03	0,00	0,55	0,59
1000	0,06	0,04	0,04	0,05	0,01	0,85	0,92
1200	0,08	0,06	0,06	0,07	0,01	1,23	1,32
1400	0,11	0,09	0,08	0,09	0,01	1,67	1,80
1600	0,15	0,11	0,10	0,12	0,02	2,18	2,35
1800	0,19	0,14	0,13	0,15	0,02	2,76	2,98
2000	0,23	0,17	0,16	0,19	0,03	3,41	3,68



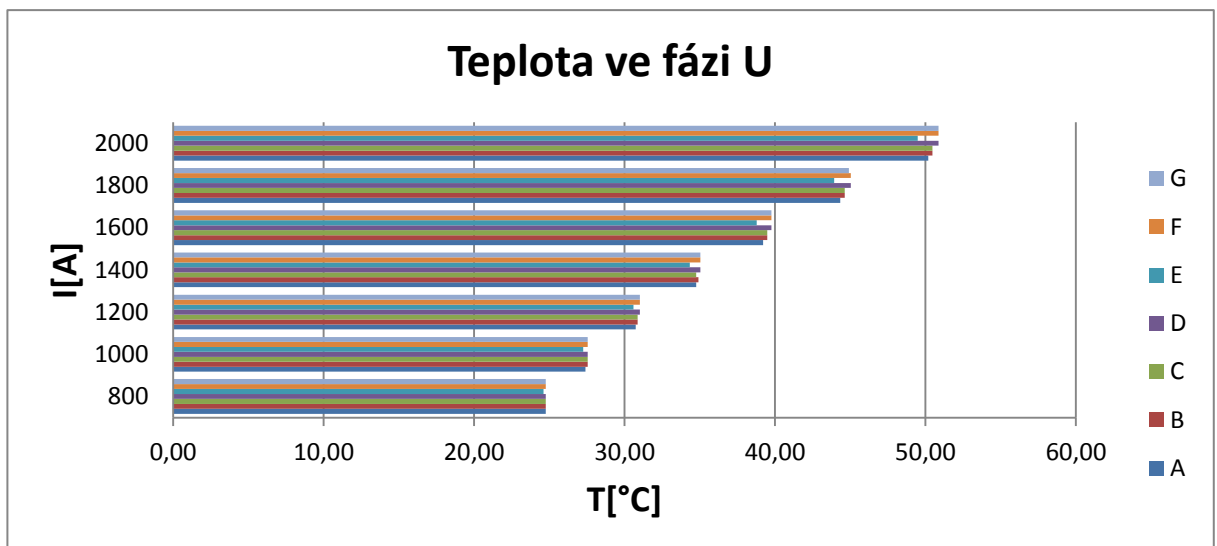
Celková Lorentzova síla F_L ve fázi W [N]

	A	B	C	D	E	F	G
800	0,45	0,54	0,53	0,40	0,65	0,55	0,54
1000	0,71	0,85	0,83	0,63	1,01	0,85	0,84
1200	1,02	1,22	1,19	0,90	1,46	1,23	1,22
1400	1,38	1,66	1,62	1,23	1,98	1,67	1,66
1600	1,81	2,16	2,11	1,61	2,59	2,18	2,16
1800	2,29	2,74	2,68	2,04	3,27	2,76	2,74
2000	2,83	3,38	3,30	2,51	4,04	3,41	3,38

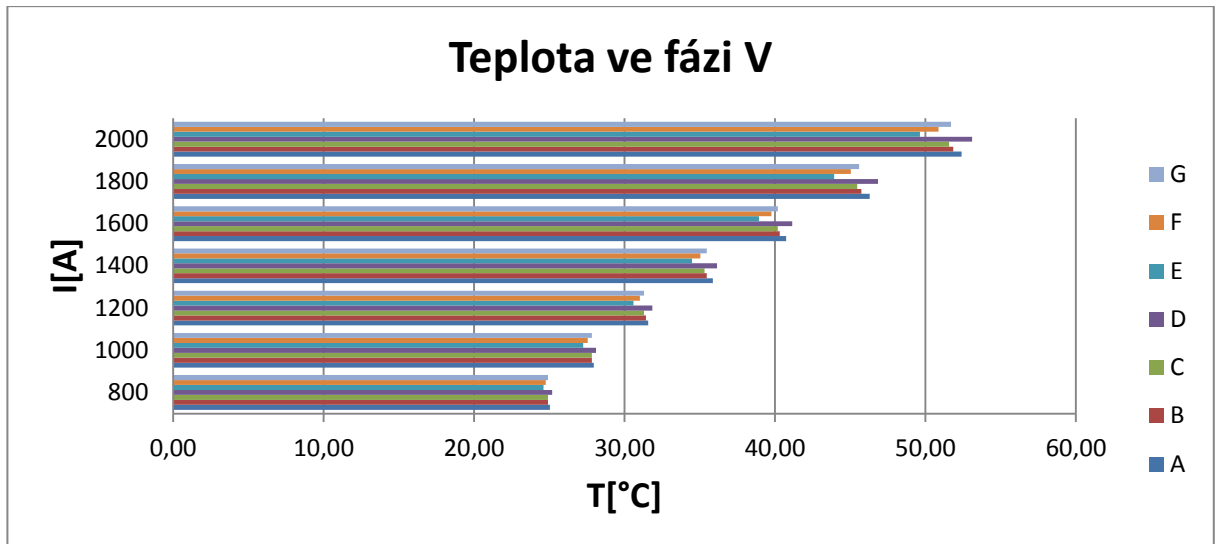


Příloha B: Odečtené hodnoty na základě modelování v aplikaci Agros2D u přípojníc vyrobených ze slitiny hliníku.

Teplota ve fázi U [°C]							
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	24,77	27,41	30,74	34,77	39,21	44,35	50,18
B	24,77	27,54	30,88	34,91	39,49	44,63	50,46
C	24,77	27,54	30,88	34,77	39,49	44,63	50,46
D	24,77	27,54	31,02	35,04	39,77	45,04	50,88
E	24,63	27,27	30,60	34,35	38,79	43,93	49,49
F	24,77	27,54	31,02	35,04	39,77	45,04	50,88
G	24,77	27,54	31,02	35,04	39,77	44,91	50,88

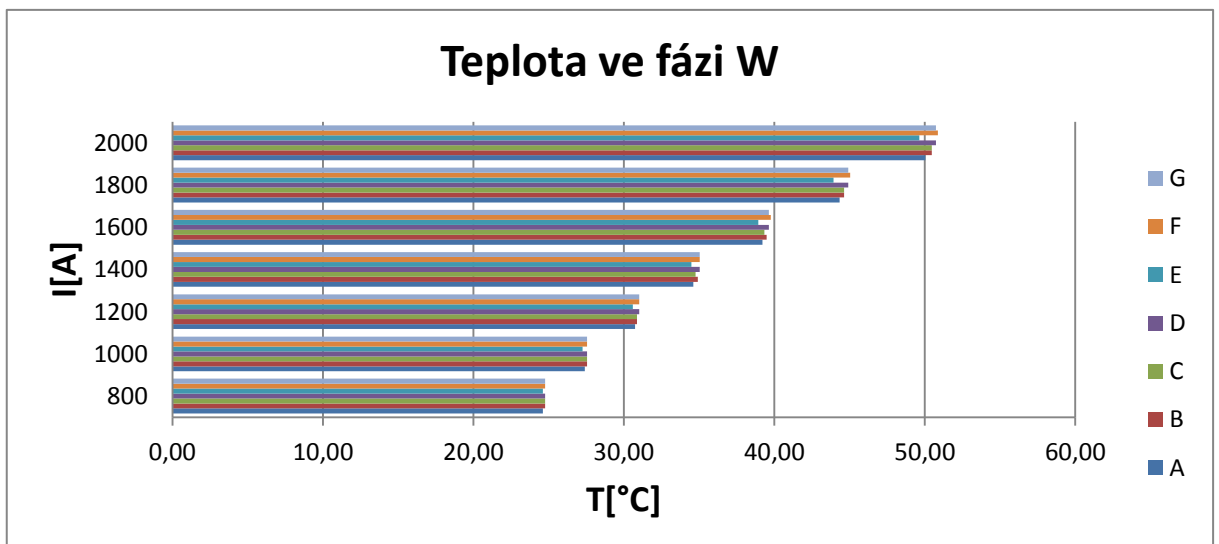


Teplota ve fázi V [°C]							
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	25,04	27,96	31,57	35,88	40,74	46,29	52,41
B	24,91	27,82	31,43	35,46	40,32	45,74	51,85
C	24,91	27,82	31,29	35,32	40,18	45,46	51,57
D	25,18	28,10	31,85	36,16	41,16	46,85	53,10
E	24,63	27,27	30,60	34,49	38,93	43,93	49,63
F	24,77	27,54	31,02	35,04	39,77	45,04	50,88
G	24,91	27,82	31,29	35,46	40,18	45,60	51,71

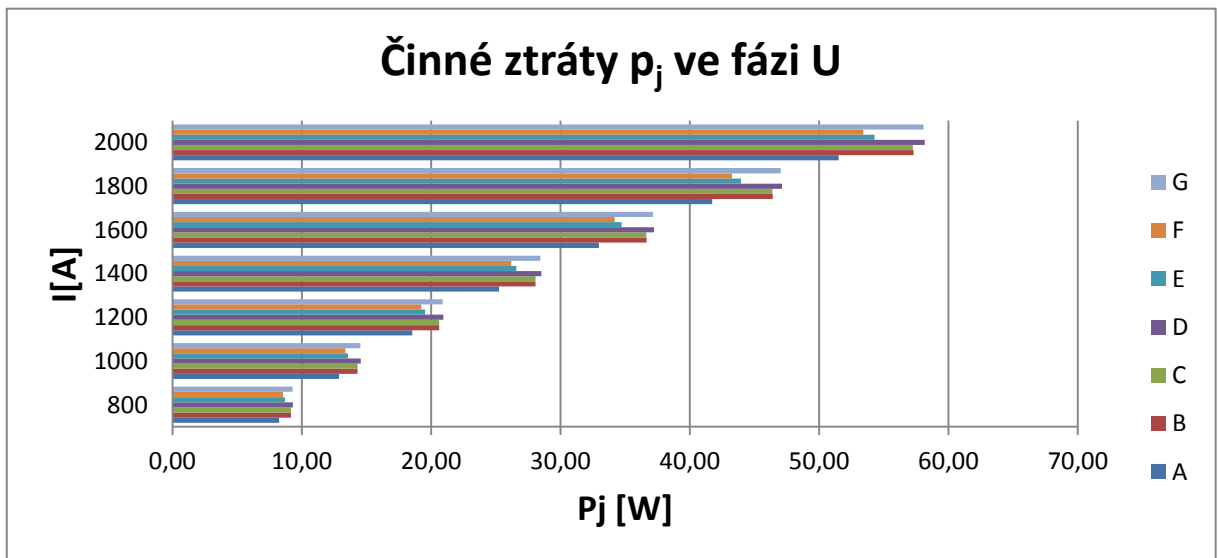


Teplota ve fázi W [°C]

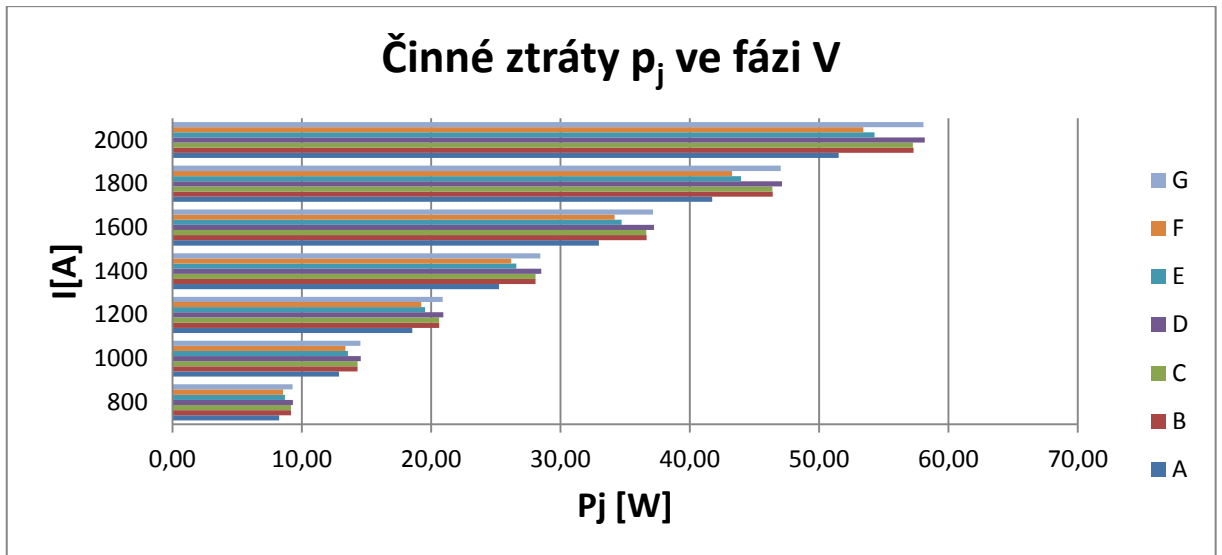
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	24,63	27,41	30,74	34,63	39,21	44,35	50,04
B	24,77	27,54	30,88	34,91	39,49	44,63	50,46
C	24,77	27,54	30,88	34,77	39,35	44,63	50,46
D	24,77	27,54	31,02	35,04	39,63	44,91	50,74
E	24,63	27,27	30,60	34,49	38,93	43,93	49,63
F	24,77	27,54	31,02	35,04	39,77	45,04	50,88
G	24,77	27,54	31,02	35,04	39,63	44,91	50,74



Činné ztráty p_j ve fázi U [W]							
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	12,96	20,25	29,16	39,69	51,83	65,60	80,99
B	13,53	21,15	30,45	41,45	54,14	68,52	84,59
C	13,50	21,09	30,37	41,34	54,00	68,34	84,37
D	13,84	21,63	31,14	42,39	55,36	70,07	86,50
E	13,25	20,70	29,81	40,57	52,99	67,06	82,80
F	13,26	20,71	29,83	40,60	53,03	67,11	82,85
G	13,83	21,62	31,13	42,37	55,34	70,04	86,46

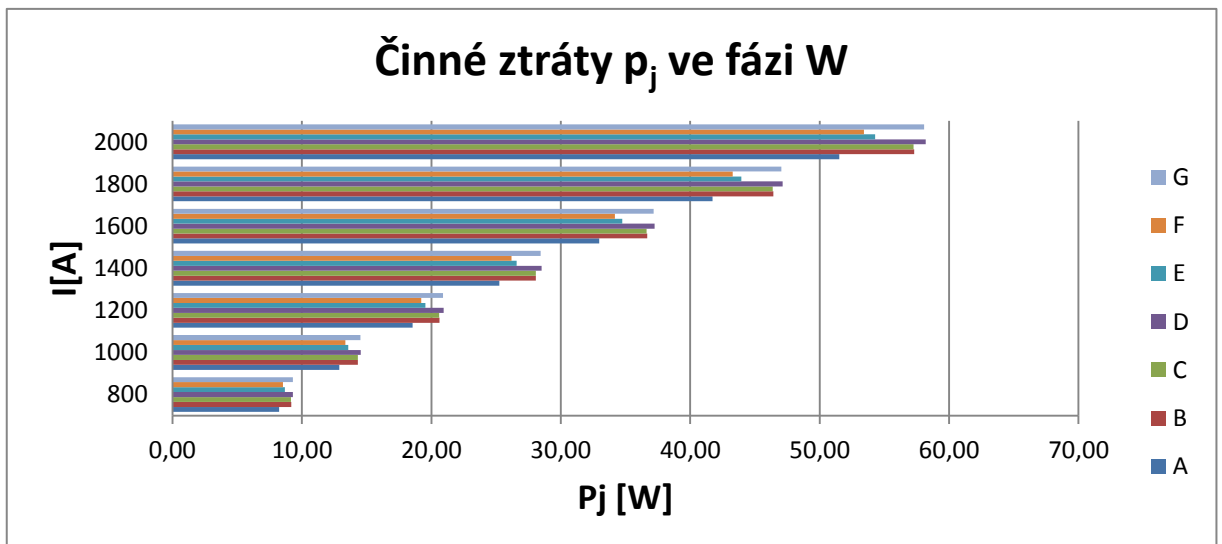


Činné ztráty p_j ve fázi V [W]							
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	13,92	21,75	31,32	42,63	55,68	70,47	87,01
B	14,12	22,06	31,77	43,24	56,47	71,47	88,24
C	13,97	21,84	31,44	42,80	55,90	70,75	87,34
D	14,84	23,19	33,39	45,45	59,36	75,12	92,75
E	13,26	20,72	29,84	40,62	53,06	67,15	82,90
F	13,26	20,71	29,83	40,60	53,03	67,11	82,86
G	14,20	22,19	31,95	43,49	56,81	71,90	88,76

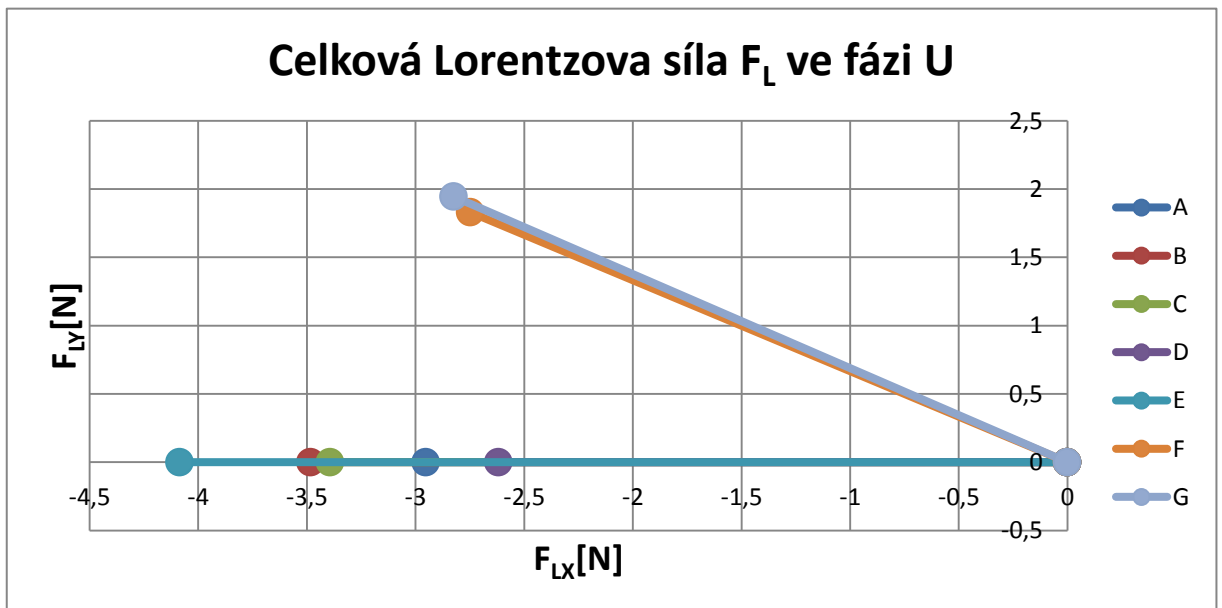


Činné ztráty p_j ve fázi W [W]

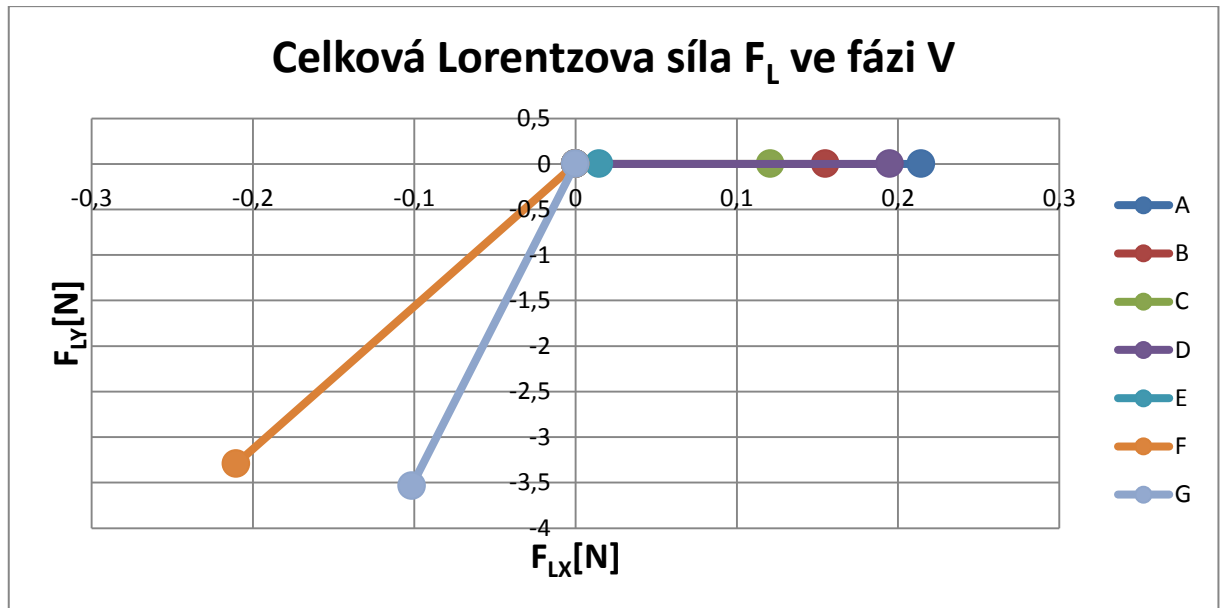
	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
A	12,90	20,16	29,02	39,51	51,60	65,31	80,62
B	13,51	21,12	30,41	41,39	54,06	68,42	84,46
C	13,49	21,07	30,34	41,30	53,95	68,28	84,29
D	13,78	21,53	31,00	42,20	55,12	69,76	86,12
E	13,26	20,73	29,84	40,62	53,06	67,15	82,90
F	13,26	20,71	29,83	40,60	53,03	67,11	82,85
G	13,79	21,55	31,03	42,23	55,16	69,82	86,19



Celková Lorentzova síla L_x ve fázi U [N]							
	A	B	C	D	E	F	G
800	0,47	0,56	0,54	0,42	0,65	0,53	0,55
1000	0,74	0,87	0,85	0,65	1,02	0,83	0,86
1200	1,06	1,25	1,22	0,94	1,47	1,19	1,23
1400	1,45	1,71	1,66	1,28	2,00	1,62	1,68
1600	1,89	2,23	2,17	1,68	2,62	2,11	2,19
1800	2,39	2,82	2,75	2,12	3,31	2,67	2,78
2000	2,95	3,48	3,39	2,62	4,09	3,30	3,43



Celková Lorentzova síla L_x ve fázi V [N]							
	A	B	C	D	E	F	G
800	0,03	0,02	0,02	0,03	0,00	0,53	0,57
1000	0,05	0,04	0,03	0,05	0,00	0,83	0,88
1200	0,08	0,06	0,04	0,07	0,01	1,19	1,27
1400	0,11	0,08	0,06	0,10	0,01	1,62	1,73
1600	0,14	0,10	0,08	0,12	0,01	2,11	2,26
1800	0,17	0,13	0,10	0,16	0,01	2,67	2,87
2000	0,21	0,15	0,12	0,19	0,01	3,30	3,54



Celková Lorentzova síla L_x ve fázi W [N]

	A	B	C	D	E	F	G
800	0,44	0,53	0,52	0,39	0,65	0,53	0,53
1000	0,68	0,83	0,82	0,61	1,02	0,83	0,83
1200	0,99	1,20	1,18	0,87	1,47	1,19	1,20
1400	1,34	1,63	1,60	1,19	2,00	1,62	1,63
1600	1,75	2,13	2,09	1,55	2,61	2,11	2,13
1800	2,22	2,70	2,65	1,96	3,30	2,67	2,70
2000	2,74	3,33	3,27	2,42	4,07	3,30	3,33

