ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Silové a tepelné účinky ve strukturách s masivními vodiči

vedoucí práce: **Ing. Lenka Šroubová, Ph.D.**
autor: **Michaela Plachá**

2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2012/2013**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Michaela PLACHÁ**
Osobní číslo:	**E11N0034P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Název tématu:	**Silové a tepelné účinky ve strukturách s masivními vodiči**
Zadávající katedra:	**Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

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. Výpočty proveďte pro různá uspořádání a různé tvary vodičů.
5. Zhodnoťte 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**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

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

L.S.

Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na silové a tepelné účinky ve strukturách s masivními vodiči. Popisuje použití přípojnic, jejich vlastnosti a materiály. V další části práce je sestaven matematický model popisující řešení v magnetickém a teplotním poli. Ten vychází ze základních vztahů elektromagnetického pole. Problematika je řešena pomocí programu Agros2D. V práci je naznačen postup vytvoření jednotlivých modelů pro výpočet v magnetickém a teplotním poli. V závěru jsou vyhodnoceny zjištěné informace týkající se dané problematiky.

Klíčová slova

Přípojnice, elektromagnetické pole, Maxwellovy rovnice, magnetické pole, teplotní pole, Agros2D, Lorentzovy síly, tepelné ztráty

Abstract

The presented diploma work is focused on force and heat effects in structures with massive conductors. It describes using of busbars, their properties and suitable materials for their manufacturing. In the next part of the work the mathematical model is designed describing the solutions in magnetic and temperature fields. It is based on fundamental relations of the electromagnetic field. The issue is solved using the programme Agros2D. The work indicates the procedure of creating different models for calculating in magnetic and temperature fields. The closing part of the work evaluates the discovered information regarding the issue.

Key words

Busbars, electromagnetic field, Maxwell's equations, magnetic field, heat field, Agros2, Lorentz force, heat losses

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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.

V Plzni dne 26.6.2013 Jméno příjmení

……..

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucí diplomové práce Ing. Lence Šroubové, Ph.D. z Katedry teoretické elektrotechniky za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH **8**

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ **9**

SEZNAM SYMBOLŮ **10**

ÚVOD **11**

1 PŘÍPOJNICE **12**

1.1 VLASTNOSTI A MATERIÁLY PŘÍPOJNIC 12
1.2 EKONOMICKÉ HLEDISKO 15

2 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE **16**

2.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY 16
2.2 POPIS ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE 17
2.3 SILOVÉ ÚČINKY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE 18
2.4 TEPELNÉ ÚČINKY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE 19

3 MATEMATICKÝ POPIS **22**

3.1 MODEL MAGNETICKÉHO POLE 22
3.2 MODEL TEPLOTNÍHO POLE 23

4 DEFINOVÁNÍ ŘEŠENÝCH USPOŘÁDÁNÍ **25**

4.1 PRŮŘEZY PŘÍPOJNIC 25
4.2 ŘEŠENÉ USPOŘÁDÁNÍ 26

5 DEFINICE PROBLÉMU **28**

5.1 POPIS PROGRAMU AGROS2D 28
5.2 MAGNETICKÉ POLE 29
5.3 TEPLOTNÍ POLE 32

6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ **34**

6.1 MAGNETICKÁ INDUKCE V OKOLÍ SYSTÉMU PŘÍPOJNIC 34
6.2 SÍLY V PŘÍPOJNICÍCH 36
6.3 TEPELNÉ ÚČINKY 38
6.3.1 Řešení tepelných ztrát v magnetickém poli *39*
6.3.2 Řešení tepelných účinků v teplotním poli *41*

ZÁVĚR **43**

POUŽITÁ LITERATURA **45**

PŘÍLOHY **1**

Seznam použitých obrázků

Obr. 1.1: Průřez pasu z cuponalu [5] ……. 15
Obr. 2.1: Ilustrace vzniku skin efektu, převzato z [20] ……. 21
Obr. 4.1: Plochá přípojnice [12] …… 25
Obr. 4.2: Dutá přípojnice [12] ……... 26
Obr. 4.3a: Uspořádání A …… 26
Obr. 4.3b: Uspořádání B …… 26
Obr. 4.3c: Uspořádání C …… 26
Obr. 4.3d: Uspořádání D ……... 26
Obr. 4.3e: Uspořádání E ……... 27
Obr. 4.3f: Uspořádání F …… 27
Obr. 5.1: Model pro rozložení magnetického pole …… 29
Obr. 5.2: Závislost relativní chyby na počtu stupňů volnosti v jednotlivých adaptivních metodách …… 31
Obr. 5.3: Rozložení výpočtové sítě ……... 31
Obr. 6.1: Rozložení magnetické indukce v okolí systému přípojnic …… 34
Obr. 6.2: Rozložení magnetické indukce v okolí přípojnic v uspořádání A až D …… 35
Obr. 6.3: Rozložení magnetické indukce v okolí přípojnic v uspořádání E a F …… 36
Obr. 6.4: Rozložení síly ve střední přípojnici v uspořádání F ……... 37
Obr. 6.5: Závislost síly na vzdálenosti v uspořádání C ……. 37
Obr. 6.6: Závislost síly na vzdálenosti v uspořádání F ……. 38
Obr. 6.7: Rozložení ztrát v přípojnici …… 39
Obr. 6.8: Závislost tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic v uspořádání A …… 39
Obr. 6.9: Závislost tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic v uspořádání F …… 40
Obr. 6.10: Rozložení tepla v okolí systému přípojnic ……... 41

Seznam symbolů

γ	Měrná elektrická vodivost	[S/m]
ρ	Měrný elektrický odpor	[Ωm]
ε	Permitivita	[F/m]
μ	Permeabilita	[H/m]
ψ	Elektrický indukční tok	[C]
ϕ	Magnetické indukční tok	[Wb]
δ	Hloubka vniku	[m]
λ	Tepelná vodivost	[W/m^{2}K]
ω	Úhlová frekvence	[1/s]
$\mathbf{A}$	Magnetický vektorový potenciál	[Wb/m]
$\mathbf{B}$	Magnetická indukce	[T]
$\mathbf{B_r}$	Remanentní indukce	[T]
c_p	Tepelná kapacita	[J/kgK]
$\mathbf{D}$	Elektrická indukce	[C/m^2]
$\mathbf{E}$	Intenzita pole	[V/m]
$\mathbf{E_o}$	Obecná intenzita elektrického pole	[V/m]
$\mathbf{F}$	Síla	[N]
f	Frekvence	[Hz]
$\mathbf{F_m}$	Magnetická složka Lorentzovy síly	[N]
$\mathbf{H}$	Intenzita magnetického pole	[A/m]
I	Elektrický proud	[A]
I_w	Vířivý proud	[A]
$\mathbf{J}$	Intenzita elektrického proudu	[A/m^2]
ks	Koeficient povrchového jevu	[-]
p	Měrné ztráty	[W/m^3]
Q	Elektrický náboj	[C]
q	Tepelný tok	[W/m^2]
R	Odpor	[Ω]
T	Teplota	[°C]
$\mathbf{v}$	Rychlost	[m/s]
W	Energie	[J]
ΔP	Tepelné ztráty	[W]

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na řešení silových a tepelných účinků ve strukturách s masivními vodiči. Tyto účinky budou zkoumány v přípojnicích pro vysokonapěťové účely v rozvodnách. Výpočty budou provedeny na základě numerických metod ve výpočetním programu. Práce je rozdělena do šesti hlavních částí.

První část bude zaměřena na vlastnosti vodičů a materiálů vhodné pro přípojnice. Stručně zde definuji obecné vlastnosti mědi a hliníku. Další část diplomové práce bude zaměřena na popis elektromagnetického pole základními vztahy. Také zde bude nastíněn přístup řešení sil a tepelných ztrát ve vodičích klasickou metodou. Na základě vztahů uvedených v této kapitole sestavím ve třetí části práce matematický popis pro pole řešená numerickými metodami. Pomocí parciálních diferenciálních rovnic bude popsáno řešení magnetického a teplotního pole. Ve čtvrté kapitole diplomové práce zvolím typy přípojnic, ve kterých budu provádět výpočet. Také stanovím uspořádání jednotlivých fází systému. Řešení problému bude provedeno pomocí výpočetního programu Agros2D. Jeho popis bude představen v úvodu páté kapitoly. Dále se zde budu věnovat popisu nastavení jednotlivých polí, které budu využívat pro výpočty. Úlohy budou simulovány v magnetickém a teplotním poli. V poslední kapitole zhodnotím získané výsledky a porovnámt jednotlivé typy vodičů a jejich uspořádání.

1 Přípojnice

Obecně lze přípojnice popsat jako vodiče zajišťující výkonové propojení mezi odběrným místem a výstupními stanicemi. Hlavní využití přípojnic je ve vysokonapěťových systémech rozvoden. Musí splňovat určité požadavky, ty jsou uvedeny v další části této kapitoly.[1]

1.1 Vlastnosti a materiály přípojnic

Mezi materiálové požadavky na vodiče patří zejména dobré elektrické, mechanické a chemické vlastnosti. Obecně požadujeme co nejvyšší elektrickou vodivost. Další porovnávané parametry jsou minimální elektrický odpor, dobré mechanické vlastnosti a odolnost vůči korozi.

Elektrická vodivost, značíme ji γ [Sm^{-1}] , u těchto materiálů je zapříčiněna volnými elektrony. Struktura pevných vodičů má polykrystalovou povahu s výskytem malého počtu valenčních elektronů. Krystalovou mřížku tvoří soubor kladných iontů, proto charakter celé struktury lze považovat za kladný. Vazby mezi jádry atomů a valenčními elektrony jsou velice slabé, a proto zde dochází k volnému neuspořádanému pohybu volných elektronů. Po připojení napěťového zdroje na konce materiálu dojde k uspořádání částic ve směru intenzity elektrického pole **E**. [3]

V reálné praxi však určujeme měrný odpor ρ, je určen vztahem $\rho = \frac{1}{\gamma}$ [Ωm]. Tento parametr je měřitelný (jedná se o odpor naměřený mezi protilehlými hranami krychle o délce strany 1m). Požadavkem je co nejmenší rezistivita, jejíž hodnota se u kovů pohybuje okolo 10^{-8} až 10^{-5} Ωm. [2]

Schopnost materiálu vést teplo se nazývá tepelná vodivost. Ta je určována součinitelem tepelné vodivosti λ. [8]

U vodičů se sledují určité mechanické vlastnosti. Zejména je požadována co největší pevnost v tahu. Tato veličina je měřena při tahových zkouškách a určuje, jakou sílu je možné vyvinout, aby nedošlo k mechanickému poškození. Modul pružnosti neboli míra tuhosti

materiálu je míra odporu vůči deformacím. Dalším parametrem je mez průtažnosti, která udává hodnotu napětí, při kterém nastane trvalá deformace materiálu. Protože je u většiny materiálů obtížné zjistit skutečnou hranici deformace, je zavedena smluvní mez průtažnosti $Rp_{0,2}$, při které dosáhne pružná deformace 0,2 %. Pojmem únava se rozumí změny či porušení vlastností, které jsou způsobeny cyklickým namáháním. Smluvně se udává, že materiál by měl být schopen vydržet 10^7 cyklů. [3] [4]

Velmi důležitá je i odolnost proti korozi. Koroze je velký problém pro většinu kovů. Působením vlhkosti se mění struktura materiálů a může být způsobena jejich degradace. Proto se přistupuje k úpravám povrchu materiálů, aby se zamezilo jejich poškození. [2] [4]

V následující tabulce jsou uvedeny některé důležité parametry u nejpoužívanějších materiálů pro přípojnice.

Tab.1 Hodnoty parametrů vodičů [3] [4]

		Měď	**Hliník**	**Cuponal**
Rezistivita	[mΩ/cm]	$1{,}72\text{x}10^{-8}$	$2{,}83\text{x}10^{-8}$	$2{,}65\text{x}10^{-8}$
Elektrická vodivost	[S/m]	$58\text{x}10^{6}$	$35{,}4\text{x}10^{6}$	$37{,}7\text{x}10^{6}$
	%IACS	100	61	65
Hustota při 20°C	[kg/m^3]	$8{,}89\text{x}10^{3}$	$2{,}7\text{x}10^{3}$	$3{,}63\text{x}10^{3}$
Koeficient roztažnosti	[1/°C]	$17\text{x}10^{-6}$	$23\text{x}10^{-6}$	$21{,}9\text{x}10^{-6}$
Minimální pevnost v tahu	[MN/m^2]	200-300	50-100	60
Mez průtažnosti 0,2%	[MN/m^2]	50-55	20-30	-
Modul pružnosti	[MN/m^2]	$95\text{x}10^{3}$	$69\text{x}10^{3}$	$85\text{x}10^{3}$
Teplotní součinitel odporu	[1/°C]	$3{,}93\text{x}10^{-3}$	$4{,}03\text{x}10^{-3}$	$4{,}01\text{x}10^{-3}$
Měrná tepelná kapacita	[J/kg°C]	393,5	921,1	711,7
Tepelná vodivost při 20°C	[W/m°C]	385	237	238
Bod tání	[°C]	1083	658	658

Materiály vhodné pro výrobu přípojnic jsou zejména měď, hliník a pásky cuponalu. Volba materiálu vždy závisí na daném použití. Je velice důležité zvážit i další aspekty, jako jsou vlastnosti daných materiálů, ekonomická výhodnost a technické parametry. Z hlediska požadovaných materiálových vlastností je téměř ve všem lepší měď. Výhodou hliníku je jeho nižší hustota. To souvisí s nižší hmotností.

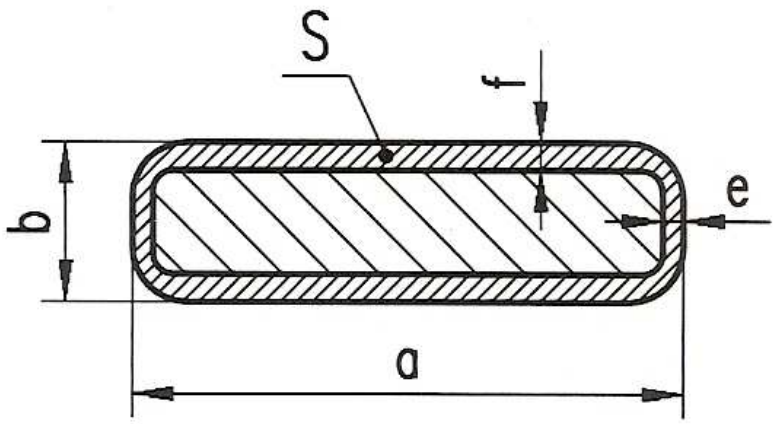
Měď vyniká zejména výbornými elektrickými vlastnostmi. Lepší elektrické vlastnosti vykazuje jen stříbro. Významná je hlavně vysoká elektrická a tepelná vodivost. S elektrickou

vodivostí úzce souvisí i velikost rezistivity. Hodnota rezistivity mědi patří k nejnižším u všech kovů, což je žádané. Dalším významným parametrem je odolnost proti korozi. Na vzduchu se měď pokrývá ochranou korozivní vrstvou měděnky. Je to směs uhličitanu mědnatého a hydroxydu mědnatého. Vzniká působením kyslíku, oxidu uhličitého a vody na měděné předměty. [2] [4] [7]

Elektrické vlastnosti hliníku jsou o něco horší než u mědi (udává se asi o 40% horší elektrická vodivost). Přesto je to velmi dobrý vodič, který je pro mnohé aplikace výhodnější. Na vzduchu je velmi odolný, protože se pokrývá vrstvou oxidu hlinitého Al_2O_3, která povrch chrání před nepříznivými vlivy okolí. Je poměrně dobře tažný a při snižování teploty nekřehne. Je však málo pevný. Hliník je oproti mědi lehčí a je možné nosné prvky zařízení dimenzovat na nižší hmotnost. Aby se docílilo stejných elektrických vlastnosti jako u mědi, je nutné zvětšit průřez vodiče. Použití hliníkových vodičů je tedy více náročnější na prostor. [4] [12] [13]

Cuponal je bimetalový materiál, který slučuje vlastnosti těch prvků, ze kterých je vytvořen, tedy mědi a hliníku. Je vyroben hydrostatickým procesem, kdy je na hliníkové jádro nanesena pod vysokým tlakem vnější měděná vrstva. Při průchodu střídavého proudu dochází ke skin efektu. Jeho projevem je nerovnoměrné rozložení proudové hustoty v průřezu vodiče. Ta je vytlačována ze středu k povrchu vodiče. U cuponalu se využívá toho, že v místě s větší proudovou hustotou (vlivem skinefektu) je použit materiál s vyšší elektrickou vodivostí. Cuponal má oproti mědi a hliníku další výhody. Je levnější než měď. Disponuje lepšími elektrickými vlastnostmi než hliník. Oproti mědi je úspora i v hmotnosti, protože část je tvořena lehčím hliníkem.

Na obrázku 1.1 je znázorněn průřez pasoviny z cuponalu. Celkovou šířku a tloušťku pasu označují písmena *a* a *b*. Parametry *e* a *f* určují tloušťku měděné vrstvy, která je nanesena na hliníkovém jádře. Celkový průřez měděné vrstvy *S* je u cuponalu přibližně 15% z celkového průřezu, ve speciálních aplikací se uvádí i hodnota 20%. [5]



Obr. č. 1.1: Průřez pasu z cuponalu [5]

1.2 Ekonomické hledisko

Nejčastějšími materiály pro výrobu přípojnic jsou měď a hliník. Obě tyto suroviny našly své uplatnění v široké sféře různých průmyslových odvětvích, např. v energetice, stavebnictví či automobilovém průmyslu. Z toho vyplývá, že obě tyto komodity jsou velmi závislé na stabilitě světové ekonomiky a jejich cena se neustále mění. Stále je však cena hliníku přibližně o 70% nižší než cena mědi. V energetickém průmyslu mohou být upřednostňovány hliníkové vodiče právě kvůli nižší ceně, např. AlFe lana. Stále jsou však aplikace, kde je výhodnější použití měděných vodičů z důvodu jejich lepších vlastností. [16]

Ceny přípojnic se liší podle výrobců. Dle zjištěných informací lze říci, že ceny hliníkových přípojnic se pohybují v rozmezí 2800 - 3600 USD/t a ceny měděných přípojnic v rozmezí 7000 - 13000 USD/t. To je zřejmé i z cen obou komodit na světovém trhu. V následující tabulce jsou uvedeny orientační hmotnosti přípojnic, které jsou dále používané při výpočtech. Z této hodnoty je možné přibližně stanovit cenu přípojnic z různých materiálů, které jsou běžně v praxi používány. Hmotnost je přepočítaná na standardizovanou délku 4 metrů, tento parametr je běžně uváděný výrobci. V následující tabulce je patrná právě výrazně nižší hmotnost hliníkových přípojnic. [17] [18] [19] [20]

Tab.2 Hmotnost přípojnic [9] [19]

Plochý vodič	**Šířka [mm]**	**Tloušťka [mm]**	**Hmotnost [kg]**
hliník	80	10	8,64
měď	50	10	17,78
Dutý vodič	**Průměr [mm]**	**Tloušťka stěny [mm]**	**Hmotnost [kg]**
hliník	50	6	17,91
měď	30	7	24,58

2 Elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole je fyzikální pole, které vzniká v prostoru a může se s časem měnit. Je nositelem náboje a fyzikálních veličin, jako jsou hmotnost a hybnost. Vykazuje vzájemnou interakci elektrického a magnetického pole.

2.1 Základní vztahy

Elektromagnetické pole charakterizují zejména intenzita pole **E** a magnetická indukce **B**. Další veličiny, které se zavádí pro popis elektromagnetického pole, jsou elektrická indukce **D**, intenzita magnetického pole **H** a hustota elektrického proudu **J**. Tyto veličiny mají vektorový charakter. Jejich vztahy lze vyjádřit pomocí materiálových konstant ε, μ, a γ. Materiálové konstanty charakterizují elektrické a magnetické vlastnosti materiálu.

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \tag{2.1}$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu}\mathbf{B} \tag{2.2}$$

$$\mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E} \tag{2.3}$$

Permitivita ε charakterizuje izolační vlastnosti dielektrika. Udává vztah mezi vektory elektrické intenzity a elektrické indukce. Je dána vztahem $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, kde $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ F/m je permitivita vakua. ε_r je relativní permitivita, tato konstanta vyjadřuje, jak se elektrická síla změní, je-li těleso s elektrickým nábojem umístěno v látkovém prostředí (místo ve vakuu).

Permeabilitou μ jsou charakterizována magnetika. Tato veličina udává míru magnetizace v důsledku působení magnetického pole. Je dána vztahem $\mu = \mu_r \mu_0$, kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m je permeabilita vakua. μ_r je relativní permeabilita, podle této konstanty se rozdělují materiály na diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické.

Diamagnetické látky mají hodnotu μ_r o něco málo menší než 1. Dochází v nich k zanedbatelnému zeslabení magnetické indukce. Bez působení vnějšího pole mají částice nulový magnetický moment. Do této skupiny látek patří například měď, zlato, stříbro.

Paramagnetické látky vykazují hodnotu μ_r o něco málo větší než 1. Magnetická indukce je v nich nepatrně zesílena. Částice mají určitý magnetický moment i bez působení vnějšího pole. Mezi paramagnetika jsou zařazeny například hliník, platina, cín.

U feromagnetických látek se hodnota μ_r pohybuje řádově okolo 10^1 – 10^5 H/m. Ve feromagnetických látkách se vyskytují mikroskopické oblasti (domény). V nich jsou magnetické momenty částic orientované souhlasně. Vnitřní magnetické momenty feromagnetických látek se vzájemně ovlivňují. Do skupiny feromagnetik patří například železo, kobalt, nikl.

Měrná elektrická vodivost γ (nebo také konduktivita) popisuje schopnost materiálu vést elektrický proud. Hodnoty vodivosti se u kovových vodičů pohybují v řádech 10^6 – 10^8 S/m, u polovodičů 10^{-8} – 10^6 S/m a u izolantů 10^{-19} – 10^{-8} S/m. [5] [11]

2.2 Popis elektromagnetického pole

Popis pole je možný pomocí Maxwellových rovnic. V integrálním tvaru rovnic je elektromagnetické pole popisováno v určité oblasti a diferenciálním tvarem rovnic je popis pole proveden v určitém bodě oblasti. Často je společně s Maxwellovými rovnicemi uváděna rovnice popisující zákon kontinuity. [11] [15]

Tab. 2.1 Maxwellovy rovnice, převzato z [8]

	Integrální tvar	**Diferenciální tvar**
1. MR - Ampérův zákon (Zákon celkového proudu)	$\oint_c \mathbf{H}d\mathbf{l} = I + \frac{\partial \psi}{\partial t}$	$rot\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
2. MR - Faradayův indukční zákon	$\oint_c \mathbf{E}d\mathbf{l} = -\frac{\partial \phi}{\partial t}$	$rot\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
3. MR - Gausův zákon elektrostatiky	$\oint_S \mathbf{D}d\mathbf{S} = Q$	$div\mathbf{D} = \rho$
4. MR - Zákon kontinuity indukčního toku	$\oint_S \mathbf{B}d\mathbf{S} = 0$	$div\mathbf{B} = 0$

Zákon kontinuity	$\oint_S \mathbf{J} d\mathbf{S} = -\frac{dQ}{dt}$	$div\mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$

Pro popis elektromagnetického pole je důležité definovat vztah pro vektorový magnetický potenciál. Definice vektorového magnetického potenciálu vychází ze čtvrté Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru (viz tab. 2.1) a tvaru vektorového magnetického potenciálu **A**, který je určen vztahem [11]

$$div\ rot\mathbf{A} = 0\,. \tag{2.14}$$

Na základě těchto skutečností musí platit

$$\mathbf{B} = rot\mathbf{A}\,. \tag{2.15}$$

Je možné omezit obor funkcí a upravit vztah (2.15) na tvar

$$rot\mathbf{A} = 0. \tag{2.15}$$

2.3 Silové účinky elektromagnetického pole

Při klasické metodě výpočtu silových účinků na vodiče analytickou metodou se vychází ze zákona elektromagnetického pole. V okolí každého vodiče protékaného proudem se vytvoří magnetické pole. Dojde k silovému působení, které zapříčiní mechanické namáhání. Nachází-li se ve vzájemné blízkosti více vodičů, dochází k působení jejich magnetických polí navzájem na sebe. Pomocí magnetické složky Lorentzovy síly je možné definovat magnetickou indukci

$$\mathbf{F}_m = Q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \tag{2.14}$$

je určena jako síla působící na jednotkový náboj Q pohybující se rychlostí ***v***.

Místo jednotkového náboje Q lze uvažovat proud protékající vodičem. U vodičů nezanedbatelného průřezu síla působí na vodivou prostorovou oblast s objemem V a s proudovou hustotou **J**.

$$\mathbf{F_m} = \int_V (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV\,. \tag{2.15}$$

Tento vztah je obecný a je možné ho použít pro různé průřezy vodičů.

Speciální případ je pro velmi tenký vodič délky l, kdy je možné použít vztah

$$\mathbf{F_m} = \int_l I(d\mathbf{l} \times \mathbf{B}). \tag{2.16}$$

Při převodu mezi těmito dvěma vztahy platí záměna **J**dV za Id**l**, element objemu dV lze vyjádřit jako Sdl.

Zjednodušeně lze sílu mezi dvěma tenkými vodiči protékající stejně velkým proudem vyjádřit vztahem

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot I \cdot l\,. \tag{2.17}$$

Z předchozích vztahů vyplývá, že $\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H}$. Protože se jedná o vodiče, je možno vnímat relativní permeabilitu μ_r rovnou 1. Magnetickou indukci lze vyjádřit vztahem

$$\mathbf{H} = \frac{I}{2\pi d}, \tag{2.18}$$

kde d je vzdálenost vodičů.

Proto následně můžeme rovnici vzájemného silového působení upravit na tvar

$$\mathbf{F} = B \cdot I \cdot l = \mu_0 \cdot \frac{I^2}{2\pi d} \cdot l\,. \tag{2.19}$$

Analogicky lze rovnici upravit i pro více vodičů protékajících elektrickým proudem. [8]

Síla je úměrná kvadrátu proudu. Při poruchových stavech systému dochází k několikanásobnému nárůstu proudu oproti normálnímu provozu. Proto při průchodu poruchového proudu (zkratový proud či nadproud) může dojít k mechanickému poškození zařízení. Je nutné dbát na bezpečnost a dimenzovat zařízení na krátkodobý zkratový proud. [10] [11]

2.4 Tepelné účinky elektromagnetického pole

Při průchodu proudu vodičem vznikají tepelné ztráty. Ty souvisí s úbytkem napětí a velikostí odporu vodiče. Tepelné ztráty mohou ovlivňovat správnou funkci strojů a přístrojů. V energetickém průmyslu se vedení navrhuje s ohledem na hospodárnost zatěžování, aby tepelné ztráty nepřekročily únosnou mez nebo vodič nebyl poddimenzován.

Výpočet tepelných ztrát je odlišný pro stejnosměrné pole, kde není vliv povrchového jevu. Rozložení proudové hustoty je v celém vodiči stejné, protože proudová hustota je ve stejnosměrném poli konstantní. Velikost ztrát je úměrná úbytku napětí, které je znázorněno rovnicí

$$\Delta U = R \cdot I \,, \tag{2.20}$$

kde I je proud procházející vodičem a R odpor vodiče. Ten je vyjádřený vztahem

$$R = k_s \cdot \rho \cdot \frac{l}{S} \,. \tag{2.21}$$

Koeficient k_s zde reprezentuje povrchový jev, ve stejnosměrném poli nabývá hodnotu 1.

U střídavých úloh je nutné brát v úvahu povrchový jev, tedy nerovnoměrné rozložení proudové hustoty vodiče. Koeficient charakterizující povrchový jev musí být $k_s > 1$.

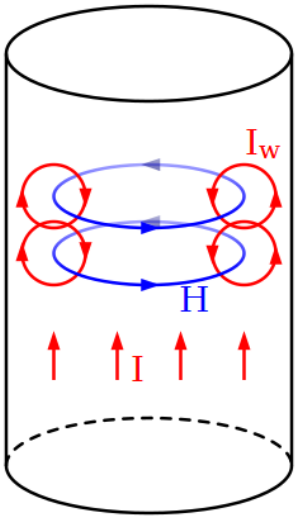
Tento vztah je platný jen pro vodiče konstantního průřezu. Pro případy, kde průřez není konstantní, je vhodné použít následující vzorec

$$R = k_s \cdot \rho \cdot \frac{dl}{S} \,. \tag{2.22}$$

Vztah pro výpočet tepelných ztrát ve stejnosměrném poli je vyjádřen jako

$$\Delta P = U \cdot I = R \cdot I^2 \,. \tag{2.23}$$

Jak již bylo uvedeno výše, se ztrátami při průchodu časově proměnného proudu dochází k projevům povrchového jevu. Proud procházející vodičem vytváří kolem sebe magnetické indukční čáry. Dochází k indukci napětí, jež zapříčiňuje vznik vířivých proudů I_w. Z ilustrace popisující tento děj, viz obr. (2.1), je patrné, že v blízkosti povrchu mají vířivé proudy I_w stejný směr jako proud procházející vodičem, zde se tedy sčítají. Ve středu vodiče je situace opačná. Siločára vířivých proudů I_w má opačný směr než proud I. Složky jednotlivých proudů se odečítají.



Obr. 2.1: Ilustrace vzniku skin efektu, převzato z [20]

Se skin efektem souvisí i hloubka vniku. Tento parametr ukazuje souvislost s klesající proudovou hustotou směrem ke středu vodiče. Hloubka vniku udává, kam prostoupí indukce. Výpočet je prováděn pomocí následujícího vztahu

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}}, \tag{2.24}$$

kde δ je hloubka vniku, ρ je rezistivita použitého materiálu, ω je úhlová frekvence procházejícího proudu a μ magnetická permealita.

Na základě znalosti vztahu mezi vodivostí a rezistivitou materiálu je možné vztah (2.24) upravit

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}}, \tag{2.25}$$

kde γ je vodivost materiálu. [10] [11]

3 Matematický popis

Pro řešení rozložení elektromagnetického pole je nutné vyřešit matematický model rozložení magnetického a teplotního pole. Obě pole nelze řešit jako sdruženou úlohu. Matematický model je sestaven pro každé pole zvlášť. Je tvořen soustavou parciálních diferenciálních rovnic popisující jednotlivá pole. Pro řešení těchto polí se využívají numerické metody, například metoda konečných prvků.

3.1 Model magnetického pole

Matematický popis magnetického pole vychází z první Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru. Při nízké frekvenci je možné zanedbat posuvný proud, protože dochází k minimálním změnám elektrického pole. Rovnici lze tady vyjádřit vztahem

$$rot\mathbf{H} = \mathbf{J}\,. \tag{3.1}$$

Z materiálového vztahu (2.2) mezi intenzitou magnetického pole **H** a magnetické indukce **B** a rovnice vektorového magnetického potenciálu (2.15) a jejich dosazením do předchozí rovnice, získáme

$$rot\frac{1}{\mu}\left(rot\mathbf{A} - \mathbf{B_r}\right) = \mathbf{J}\,. \tag{3.2}$$

B_r je remanentní indukce a respektuje magnetické pole permanentních magnetů.

Pomocí zobecněné intenzity elektrického pole $\mathbf{E_o}$ vyjádříme proudovou hustotu. Zobecněná intenzita elektrického pole vyplývá z Lorentzova zákona. První část představuje intenzitu vnějšího elektrického pole a druhá část rovnice popisuje intenzitu elektrického pole, která vzniká pohybem prostředí a vnějšího magnetického pole

$$\mathbf{E_o} = \mathbf{E} + \left(v \times \mathbf{B}\right). \tag{3.3}$$

Vztah pro intenzitu **E** dosadíme do druhé Maxwellovy rovnice (tab. 2.1) a dostaneme vztah

$$rot\left(\mathbf{E_o} - v \times \mathbf{B}\right) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\,. \tag{3.4}$$

Použitím již známých vztahů (2.15) je možné rovnici upravit do tvaru

$$rot\left(\mathbf{E_o} - v \times rot\mathbf{A}\right) = -rot\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \tag{3.5}$$

Po odstranění operátoru rotace a dosazením do vztahu pro celkovou proudovou hustotu vířivých proudů, získáme tento tvar rovnice

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E_o} = \gamma\left(v \times rot\mathbf{A}\right) - \gamma\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma grad\varphi + \mathbf{J_{ext}}, \tag{3.6}$$

kde první člen rovnice stanovuje pohybovou složku, druhý člen reflektuje transformační složku, další členy rovnice vyjadřují vnější složky elektrického pole (proudová hustota vytvořená od vnějšího zdroje a proudová hustota způsobená jiným způsobem).

Tento vztah pro proudovou hustotu vířivých proudů **J** nyní můžeme dosadit do výchozí rovnice (3.2). Výsledná parciální diferenciální rovnice popisuje rozložení magnetického pole ve tvaru

$$rot\frac{1}{\mu}\left(rot\mathbf{A} - \mathbf{B_r}\right) + \gamma\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma\left(v \times rot\mathbf{A}\right) = \mathbf{J_{ext}} - \gamma grad\varphi. \tag{3.7}$$

Harmonické magnetické pole popisuje tato parciální diferenciální rovnice

$$rot\frac{1}{\mu}\left(rot\mathbf{A} - \mathbf{B_r}\right) - \gamma\left(v \times rot\mathbf{A}\right) + j\omega\gamma\mathbf{A} = \mathbf{J_{ext}}, \tag{3.8}$$

kde transformační složka rovnice $\mathbf{J_{trans}} = j\omega\gamma\mathbf{A}$ je hustota vířivých proudů a $\omega = 2\pi f$ je frekvence. [8] [11] [21]

3.2 Model teplotního pole

Pro popis teplotního pole vycházíme ze schopnosti materiálu přenášet teplo. Teplotní vodivost λ je definována jako množství tepla přeneseného za jednotku času přes stěnu jednotkové tloušťky ve směru normály vyvolané jednotkovým teplotním gradientem ΔT.

Vztah popisující hustotu tepelného toku v homogenním tělese v ustáleném stavu je možné vyjádřit

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot gradT, \tag{3.9}$$

kde q představuje hustotu konduktivního tepelného toku, λ tepelnou vodivost a T termodynamickou teplotu.

Předchozí rovnici je možné upravit na základě Gauss-Ostrogradského věty. Ta popisuje tepelný tok přes uzavřenou plochu S a následnou úpravou rovnice také přes objem V.

$$\oint_S \mathbf{q} d\mathbf{S} = \int_V div\mathbf{q} dV = \int_V div\lambda grad T dV, \tag{3.10}$$

Tepelný tok musí respektovat vnitřní změny energie v objemu V tělesa. Proto je nutné tuto změnu vyjádřit vztahem

$$\frac{dW}{dt} = \int_V \rho \cdot c_p \frac{dT}{dt} dV\,, \tag{3.11}$$

kde parametr W reprezentuje akumulovanou energii, ρ měrnou hmotnost materiálu a c_p tepelnou kapacitu.

Konečný vztah pro rovnici popisující teplotní pole lze po zjednodušení vyjádřit jako

$$-div\lambda grad T - \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = p\ , \tag{3.12}$$

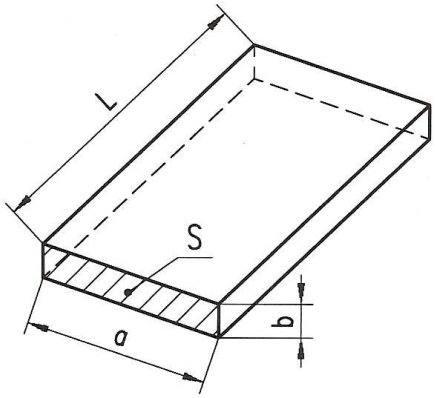
kde p jsou tepelné ztráty vznikající v tělese. [8] [21]

4 Definování řešených uspořádání

Tato práce se zabývá silovými a tepelnými účinky v přípojnicích. Pro výpočty jsou zvoleny měděné a hliníkové vodiče, jež jsou nejčastěji používané materiály pro tyto účely. Kapitola je věnována popisem typů přípojnic a zvolených uspořádání.

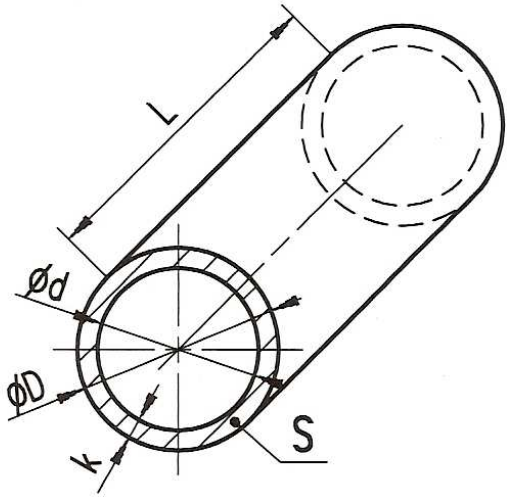
4.1 Průřezy přípojnic

V technické praxi jsou nejčastěji používány dva typy průřezů. Prvním z nich jsou ploché přípojnice. Jejich profil má obdélníkový průřez, jehož parametry jsou závislé na požadavcích pro použití. Z důvodu omezení skin efektu se volí malá tloušťka vodiče v poměru k šířce. Z výpočtů hmotnosti v kapitole 1.2 také jasně vyplývá, že ploché přípojnice jsou lehčí oproti dutým přípojnicím. Při instalaci tohoto typu přípojnic je snadnější možnost napojování jednotlivých přípojnic na sebe. Z obrázku 1.2 je zřejmé, že parametr *a* a *b* značí šířku a tloušťku vodiče a *S* je jeho průřez. *L* je celková délka vodiče.



Obr. č.4.1: Plochá přípojnice [12]

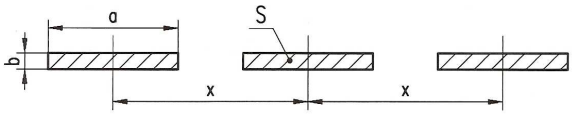
Další realizací jsou duté (trubkovité) přípojnice. Toto provedení je vhodné zejména kvůli skin efektu, který vzniká při průchodu stejnosměrného proudu. Rozložení proudové hustoty je nerovnoměrné. Je vytlačena k povrchu vodiče, proto je střed vodičů nevyužitý. Mechanické vlastnosti, jako jsou pevnost a tuhost, jsou u tohoto provedení lepší. Nevýhoda tohoto způsobu provedení přípojnice se projeví při napojování více přípojnic. Jejich propojování je obtížnější než u klasických plochých vodičů. Parametry *ød* a *øD* určují vnitřní a vnější průřez dutého vodiče. Síla stěny vodiče je značena *k* a celková délka vodiče je *L*. [12] [13]



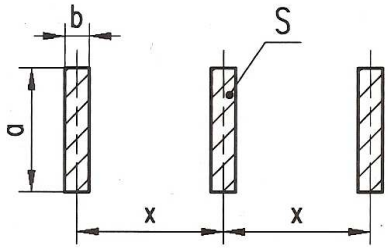
Obr. č. 4.2: Dutá přípojnice [12]

4.2 Řešené uspořádání

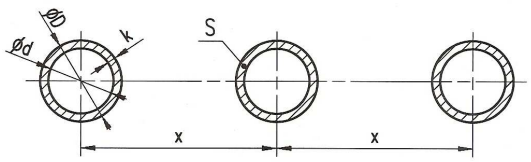
Zde jsou uvedeny zvolené tvary a uspořádání, ve kterých je dále provedeno řešení. Je snaha, aby takto zvolené rozmístění odpovídalo reálné praxi. Minimální vzdálenost mezi systémy přípojnic stanovuje norma [23]. Následující obrázky představují zvolená uspořádání vodičů, která jsou pro přehlednost označena písmeny A až F.



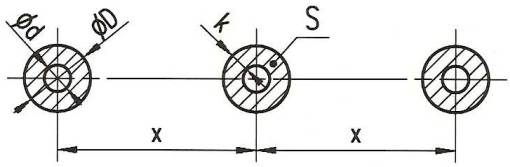
Obr. 4.3a: Uspořádání A



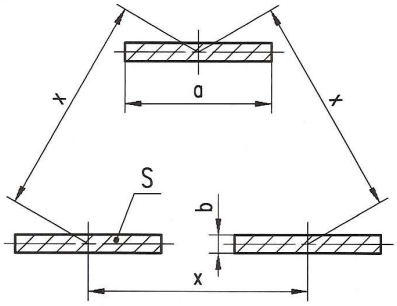
Obr. 4.3b: Uspořádání B



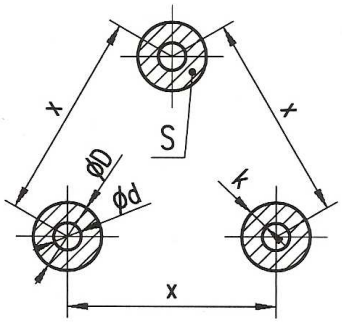
Obr. 4.3c: Uspořádání C



Obr. 4.3d: Uspořádání D



Obr. 4.3e: Uspořádání E



Obr. 4.3f: Uspořádání F

Rozměry řešených přípojnic jsou výsledkem informací získaných od výrobců a snahou zajistit obdobný průřez u vodičů stejného materiálu. Následující tabulka představuje tyto parametry.

Tab. 4.1 Rozměry řešených vodičů podle uspořádání

Uspořádání	**Typ vodiče**	**Materiál**	**Šířka / průměr [mm]**	**Tloušťka / tloušťka stěny [mm]**	**Průřez [mm^2]**
A	plochý vodič	hliník	80	10	800
B	plochý vodič	měď	50	10	500
C	dutý vodič	hliník	50	6	829
D	dutý vodič	měď	30	7	506
E	plochý vodič	hliník	80	5	800
F	dutý vodič	měď	30	7	506

5 Definice problému

Problém je řešen v programu Agros2D. Řešení problému v sobě zahrnuje vytvoření magnetického a teplotního pole. V magnetickém poli jsou zjištěny určité skutečnosti, které jsou vyhodnocovány či následně využity jako vstupní parametry pro řešení teplotního pole. Popis programu a polí v něm řešených je představen v této kapitole.

5.1 Popis programu Agros2D

Analytické výpočty jsou poměrně náročné a je možné je provést jen u některých rozložení a tvarů vodičů. Proto se přistupuje k výpočtům pomocí numerických metod. Agros2D je výpočetní software, který slouží pro řešení fyzikálních polí ve 2D kartézském a osově-symetrickém uspořádání. Jeho obrovskou výhodou je možnost simulace dějů, které je v praxi velmi obtížné řešit analytickou cestou. Program nabízí stacionární a harmonickou analýzu a řešení přechodových dějů. Aplikace se zabývá řešením těchto fyzikálních polí: elektrostatické, proudové, magnetické, teplotní, termoelastické, akustické. Aplikace je utvořena ze tří hlavních částí: preprocesor, procesor a postprocesor a jejím základem je knihovna Hermes2D.

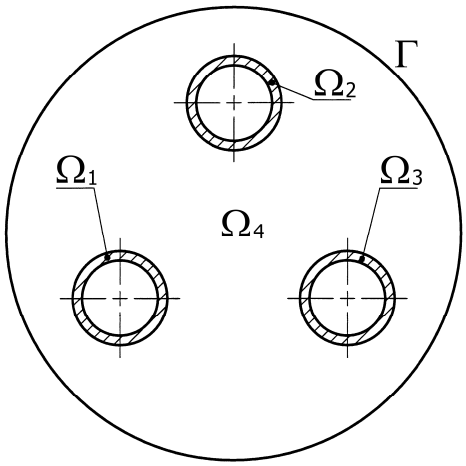
Preprocesor je místo, kde je uživatelem definován problém. Je zde vytvořen geometrický model problému, jsou stanoveny materiálové hodnoty různých veličin a určeny okrajové podmínky. V editoru pro tvorbu geometrie je vytvořen model. Je možné také modely importovat (popř. exportovat) z jiných CAD systémů (DXF). Dále je model protkán diskretizační sítí (program umožňuje import či export diskretizační sítě společně s modelem z jiného výpočetního FEM systému). Poté se zde nastavují různé materiálové hodnoty parametrů potřebných pro výpočet. Jednotlivým oblastem modelu jsou přiřazeny materiály a hranicím okrajové podmínky.

Procesor je výpočetní část založená na metodě konečných prvků neboli FEM (Finite Element Method). Tato numerická metoda slouží k řešení složitých fyzikálních problémů. Její základní myšlenkou je hledání minima potenciální energie řešeného problému. Řešená oblast je rozdělena na konečný počet dílčích podoblastí. Jejich tvar je nejčastěji trojúhelníkový nebo obdélníkový. Poté se určí elementy, většinou vrcholy daných podoblastí. K výpočtům dochází ve význačných bodech sítě. Na nich se hledá řešení, které je aproximací reálného výsledku. Výsledkem je tedy součet příspěvků jednotlivých elementů a blíží se řešení dané rovnice.

Postprocesor je část programu sloužící pro vyhodnocování obdrženého řešení. Využívá různých možností, jako jsou barevné mapy, kontury, vektorová pole, grafy veličin, lokální a integrální veličiny (plošné a objemové). [8] [9]

5.2 Magnetické pole

Pro názornost obrázek 5.1 ilustruje model pro řešení magnetického pole. Úloha je řešena jako 2D problém v kartézských souřadnicích. V preprocesoru je vytvořen model.



Obr. 5.1 Model pro rozložení magnetického pole

Ten je složen z několika oblastí Ω. Oblasti vodičů jsou označeny jako Ω_1, Ω_2, Ω_3 a lze je definovat vztahem

$$rot\frac{1}{\mu}(rot\mathbf{A}) + j\omega\gamma\mathbf{A} = \mathbf{J}\,. \tag{5.1}$$

Ω_4 je oblast vzduchu je definována vztahem

$$rot\frac{1}{\mu}(rot\mathbf{A}) = 0\,. \tag{5.2}$$

Okolo je v dostatečné vzdálenosti okrajová hranice, která je označena Γ. Ohraničuje řešenou oblast. Při řešení v programu Agros2D je využita harmonická analýza. Rozložení magnetického pole pro řešení harmonické analýzy popisuje rovnice, jež byla odvozena v kapitole 3

$$rot\frac{1}{\mu}\left(rot\mathbf{A}-\mathbf{B}_{\mathbf{r}}\right)-\gamma\left(v\times rot\mathbf{A}\right)+j\omega\gamma\mathbf{A}=\mathbf{J}_{\mathbf{ext}}. \tag{5.3}$$

Okrajová oblast je zvolena v dostatečné vzdálenosti, aby nedocházelo k ovlivňování řešených výsledků. Zároveň je zbytečné volit okrajovou hranici v příliš velké vzdálenosti. Již nedochází ke zpřesňování výsledků, protože vymezená oblast už neovlivňuje řešení a zbytečně je jen navýšena náročnost výpočtu. Na vhodně zvolené okrajové hranici je možné zavést Dirichletovu okrajovou podmínku. Okrajové hranici je přiřazena hodnota vektorového magnetického potenciálu $\mathbf{A}=0$.

Materiálové parametry jednotlivých částí vytvořeného modelu vyplývají z vlastností použitých materiálů. Jedná se o vzduch, který vyplňuje oblast mezi fázovými vodiči a okrajovou hranicí. Dále jsou použity hliníkové a měděné přípojnice. V nich je pro účely této práce zvolen stejný proud 1000 A. Velikost proudové hustoty je určena vztahem $\mathbf{J}=\frac{I}{S}$. Je řešena soustava třífázového systému přípojnic, které jsou napájeny napětím o frekvenci 50 Hz. Jedná se tedy o řešení harmonické úlohy. Proudové hustoty v jednotlivých fázích jsou vůči sobě vzájemně posunuty o 120°. Hodnoty materiálových vlastností jsou uvedeny v následující tabulce.

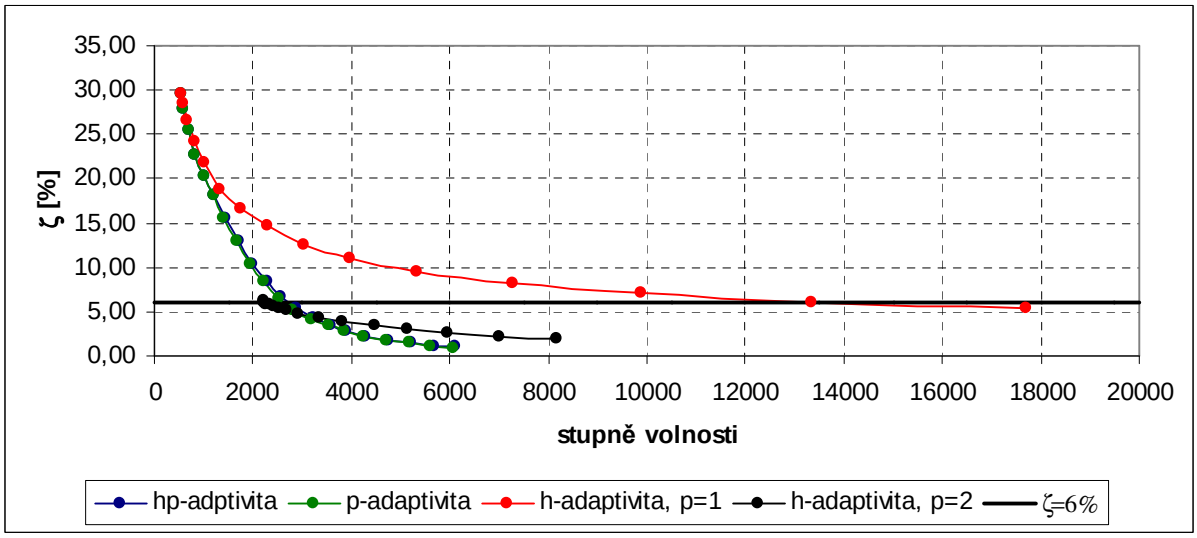
Tab. 5.1 Vlastnosti materiálů v magnetickém poli

	Měď	**Hliník**	**Vzduch**
μ_r [-]	1	1	1
γ [S/m]	$58,10^6$	$35,4.10^6$	0

Při výpočtech v programu Agros2D je možné použít jednu z některých adaptivních metod. Tyto metody jsou využity v místech, kde při výpočtech je větší relativní chyba, než uživatel stanovil. Konvergentní metoda *h*-adaptivita zjemňuje vytvořenou síť, tedy mění velikost elementů. Druhá metoda je *p*-adaptivita. Tato metoda zajišťuje použití vyššího řádu polynomu při řešení. Při *hp*-adaptivitě se využívají obě tyto metody současně.

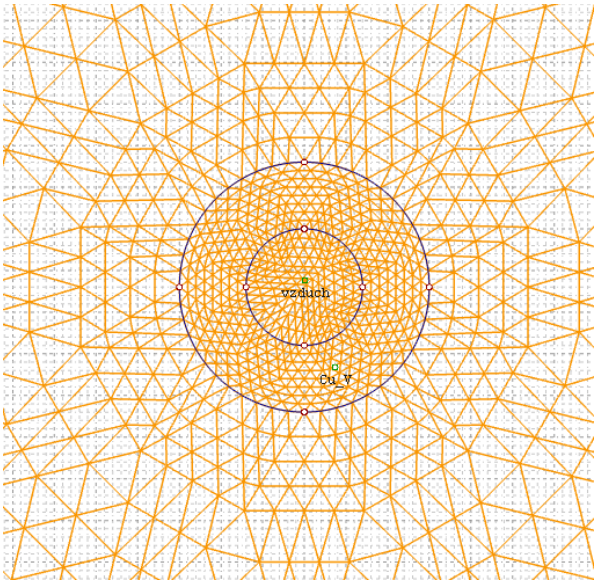
Pro názornost je zde uveden obrázek 5.2 znázorňující porovnání konvergence všech adaptivních metod, které program nabízí. Z důvodu nízké výpočetní kapacity je zvolena relativní adaptivní chyba ζ= 6 %. Průběh výpočtů pomocí hp-adaptivita a p-adaptivita se téměř neliší. Úloha je pomocí těchto adaptivních metod vyřešena s relativně nízkým stupněm volnosti. H-adaptivita s nastaveným stupněm polynomu druhého řádu dosáhne požadované

relativní chyby přibližně se stejným počtem stupňů volnosti jako hp-adaptivita a p-adaptivita. H-adaptivita s polynomem prvního řádu splnila podmínku se značně vysokým stupněm volnosti. Řešení takto nastavené úlohy je tedy poměrně výpočetně náročné.



Obr. 5.2 Závislost relativní chyby na počtu stupňů volnosti v jednotlivých adaptivních metodách

Z důvodu výpočtu více řešení a náročnosti na výpočet je zvoleno manuální nastavení parametrů pro výpočet. Je použito dvojnásobné automatické zjemnění trojúhelníkové sítě v řešeném problému. Toto nastavení udává míru jemnosti automatické výpočtové sítě. Program také umožňuje manuální nastavení hustoty sítě v jednotlivých definovaných oblastech Ω. Také můžeme nastavit zjemnění sítě k hranám jednotlivých oblastí, kde požadujeme co nejpřesnější řešení problému. Nejhustší je síť zejména uvnitř oblastí vodičů a v jejich blízkém okolí. Parciální diferenciální rovnice je aproximována polynomem 3. řádu.



Obr. 5.3: Rozložení výpočtové sítě

V magnetickém poli jsou zkoumána rozložení magnetického pole v závislosti na vzdálenosti jednotlivých fází přípojnic a uspořádání. Dalším parametrem, který je zde vyhodnocován, jsou síly, které působí v jednotlivých vodičích. Sledovány jsou i tepelné ztráty. [8] [9] [24]

5.3 Teplotní pole

Přenos tepla je možný třemi způsoby: vedením, prouděním a radiací. Přenos tepla vedením je možný u pevných látek, kde jsou částice blízko u sebe a je možný jejich kontakt. Charakteristickou vlastnosti je tepelná vodivost λ.

Prouděním neboli konvekcí rozumíme přenos tepelné energie z tuhých těles prostřednictvím kapalin nebo plynu. Konvekcí vzniká tepelný tok. Ten je možno popsat vztahem pro hustotu konvektivního tepelného toku

$$q'_{conv.} = \alpha(T - T_{ext}), \tag{4.5}$$

kde $q'_{conv.}$ je hustota tepelného toku, α je koeficient přestupu tepla, T je termodynamická teplota a T_{ext} teplota okolní proudící kapaliny.

Přenos tepla zářením se jako v předchozím případě projevuje mezi pevnými a kapalnými, respektive plynnými látkami. Přenos tepla zářením je závislý na teplotě tělesa T a na vlnové délce tepelného záření λ. V našem případě je možné tento typ přenosu zanedbat vzhledem k nízkým teplotám. Ve většině případech je jeho vliv zahrnut v přenosu tepla konvekcí.

Definiční oblast teplotního modelu je stejná jako u modelu magnetického pole. Jedná se o řešení v ustáleném stavu. Magnetické pole popisuje rovnice představená v kapitole 3

$$-div\lambda gradT - \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = p. \tag{4.6}$$

Tento vztah uvažuje přenos tepla vedením, akumulaci energie a tepelné ztráty. Při řešení teplotního pole bereme v úvahu i přenos tepla prouděním. Na hranicích oblastí Ω_1 až Ω_3 (vodiče) je definována Dirichletova okrajová podmínka pro tepelný tok, ta je vyjádřena jako

$$f = f_0 + \alpha(T - T_{ext}), \tag{4.7}$$

kde f_0 vyjadřuje tepelný tok přes obvod vodiče, α je koeficient přestupu tepla a T_{ext} je teplota

okolí. Tepelný tok f_0 je stanoven na základě hodnot tepelných ztrát získaných v magnetickém poli. Hodnota koeficientu pro přestup tepla pro vzduch je zvolena $\alpha = 5$ a teplota v okolí vodiče T_{ext} je stanovena na 40 °C. Na okrajové oblasti Γ je definována okrajová podmínka respektující teplotu okolí T=40 °C.

Z hlediska materiálových vlastností je nutné zavést hodnoty tepelné vodivosti λ a objemového tepla Q. Právě to je stanoveno na základě velikosti tepelných ztrát, které jsou získány při řešení magnetického pole. V tabulce jsou uvedeny hodnoty tepelné vodivosti všech materiálů použitých v modelu. [8] [9] [24]

Tab. 4.3 Hodnoty tepelné vodivosti materiálů pro teplotní pole

	Měď	**Hliník**	**Vzduch**
λ [W/mK]	385	237	0,026

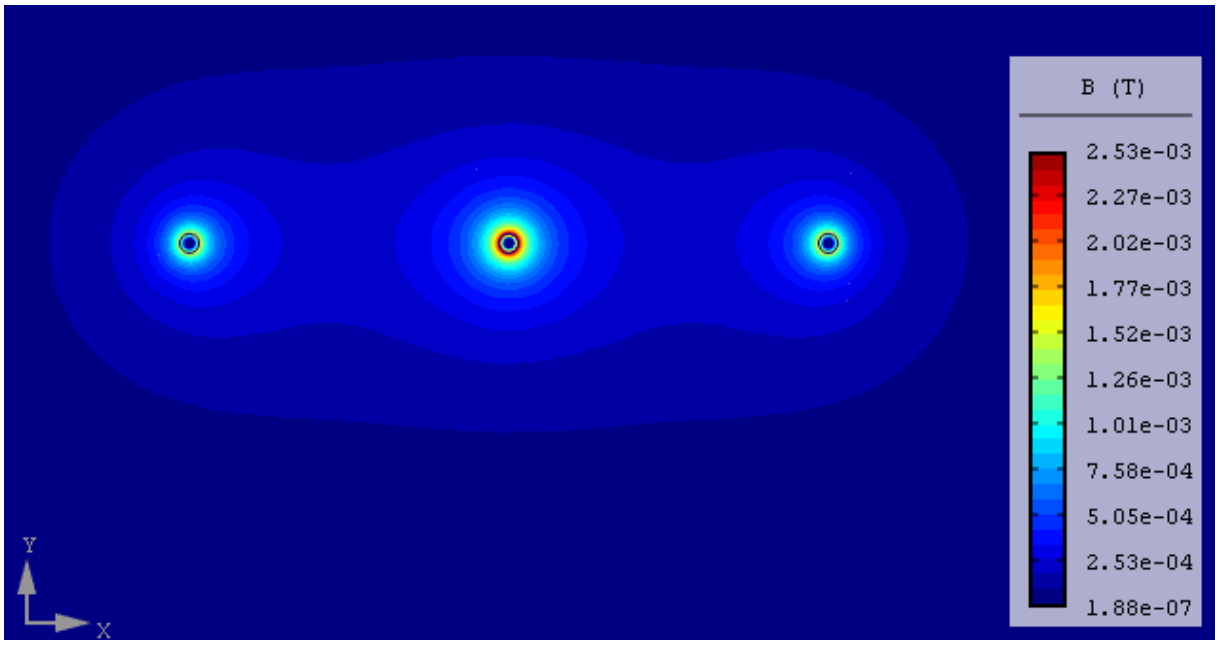
6 Zhodnocení výsledků výpočtů

Jak již bylo zmíněno výše, modely byly vytvořeny v programu Agros2D. Při výpočtech byly zkoumány určité skutečnosti a získané výsledky jsou v této kapitole zhodnoceny

6.1 Magnetická indukce v okolí systému přípojnic

Rozložení magnetického pole, v tomto případě magnetické indukce v okolí přípojnic, je zkoumáno zejména kvůli eventuálního negativnímu vlivu na lidský organismus. Přípustné hodnoty magnetické indukce stanovuje nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. [25] Tabulka hodnot je uvedena v příloze A.

Pro každé uspořádání vodičů byl vytvořen model v programu Agros2D. Jednotlivé přípojnice byly nejprve od sebe osově vzdáleny 2 metry a postupně k sobě přibližovány o 10 centimetrů. Hodnoty magnetické indukce jsou odečteny ve všech uspořádání ve třech odlišných vzdálenostech přípojnic 2, 1 a 0,5 metru. To pro porovnání velikosti magnetické indukce zcela postačuje. Pro názornost obrázek 6.1 znázorňuje rozložení magnetické indukce v okolí přípojnic v uspořádání D.

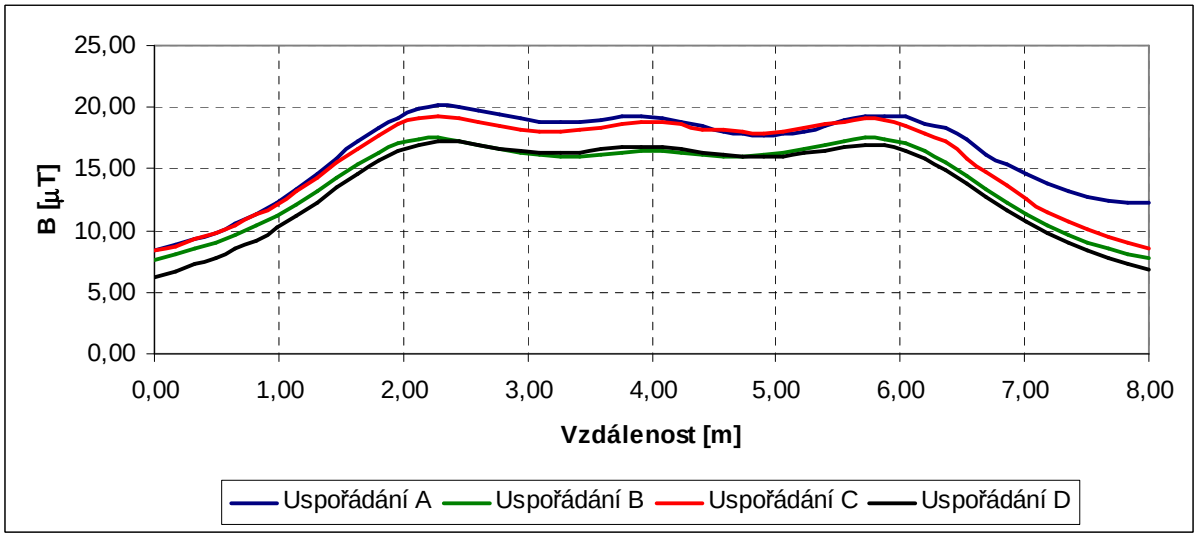


Obr. 6.1: Rozložení magnetické indukce v okolí systému přípojnic

Nejprve byla porovnána uspořádání, která odpovídají horizontálnímu umístění fázových vodičů vedle sebe. Je provedena simulace pro rozložení A až D. Hodnoty takto získané jsou vyneseny v následujícím grafu. Tento obrázek 6.2 nám ukazuje rozložení magnetické indukce

v největší zkoumané vzdálenosti a v linii 1 metr pod samotnými systémy přípojnic. V tomto případě jsou přípojnice umístěny ve 2, 4 a 6 metrech.

Z obrázku 6.2 vyplývá, že nejvyšší hodnota v těchto uspořádáních rozhodně nepřekračuje povolený limit, který je pro zaměstnance rozvodny 500μT a pro ostatní osoby 100μT. Nejvyšší hodnota vypočtená v simulaci je přibližně 20 μT. Nejvyšší hodnoty magnetické indukce jsou podle očekávání v hliníkových vodičích. Z porovnání výsledků také vyplývá, že vyšší hodnoty v rozložení vychází v plochém vodiči. Totéž je možné říci i o měděných přípojnicích, jejichž hodnota magnetické indukce je nižší v porovnání s hliníkovými. Zde je patrné, že hodnota magnetické indukce je v krajních fázích o něco málo nižší u dutých přípojnic než u plochých. Naopak u prostřední fáze je hodnota menší u ploché přípojnice.

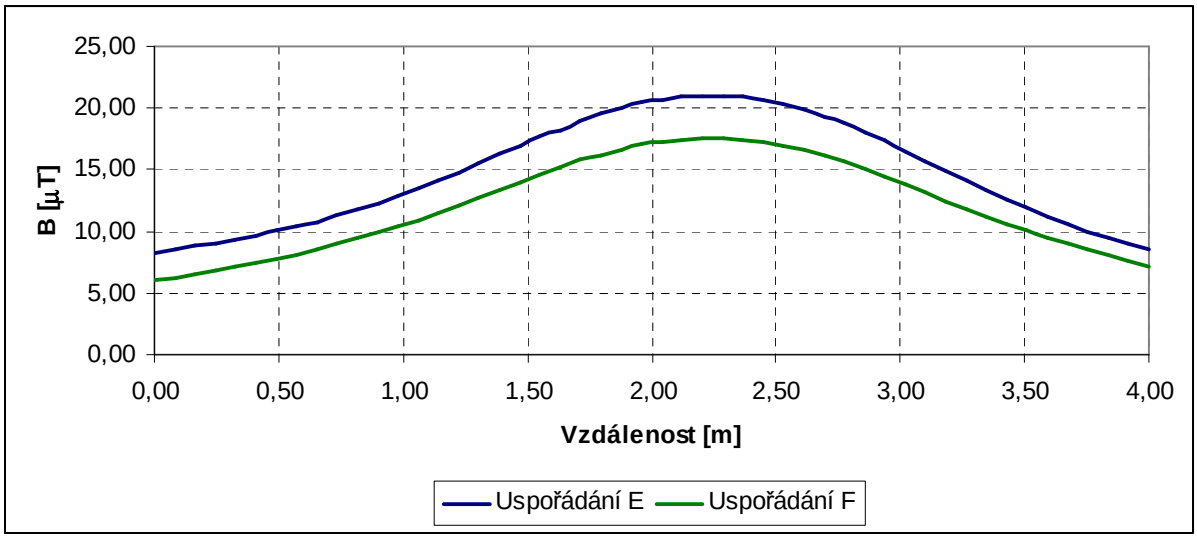


Obr. 6.2: Rozložení magnetické indukce v okolí přípojnic v uspořádání A až D

Další výsledky jsou prováděny pro uspořádání E a F. Jedná se tedy o přípojnice rozložené do trojúhelníku. V tomto případě bylo postupováno stejně. Přípojnice byly od sebe osově vzdáleny 2, 1 a 0,5 metru. Rozložení magnetické indukce je taktéž vyhodnocováno v linii 1 metr pod spodními přípojnicemi. Jednotlivé fáze jsou v tomto případě umístěny rozmezí 2 až 2,5 metru.

Z obrázku 6.3 je patrné, že nejvyšší hodnota magnetické indukce přibližně 21 μT je zjištěna v rozložení s nejmenší osovou vzdáleností (0,5 metru). Jsou zde srovnávány hodnoty magnetické indukce v okolí trojúhelníkového rozložení plochých hliníkových a dutých měděných přípojnicích. Vyšší hodnoty rozložení magnetické indukce jsou zjištěny také

v plochých hliníkových přípojnicích.

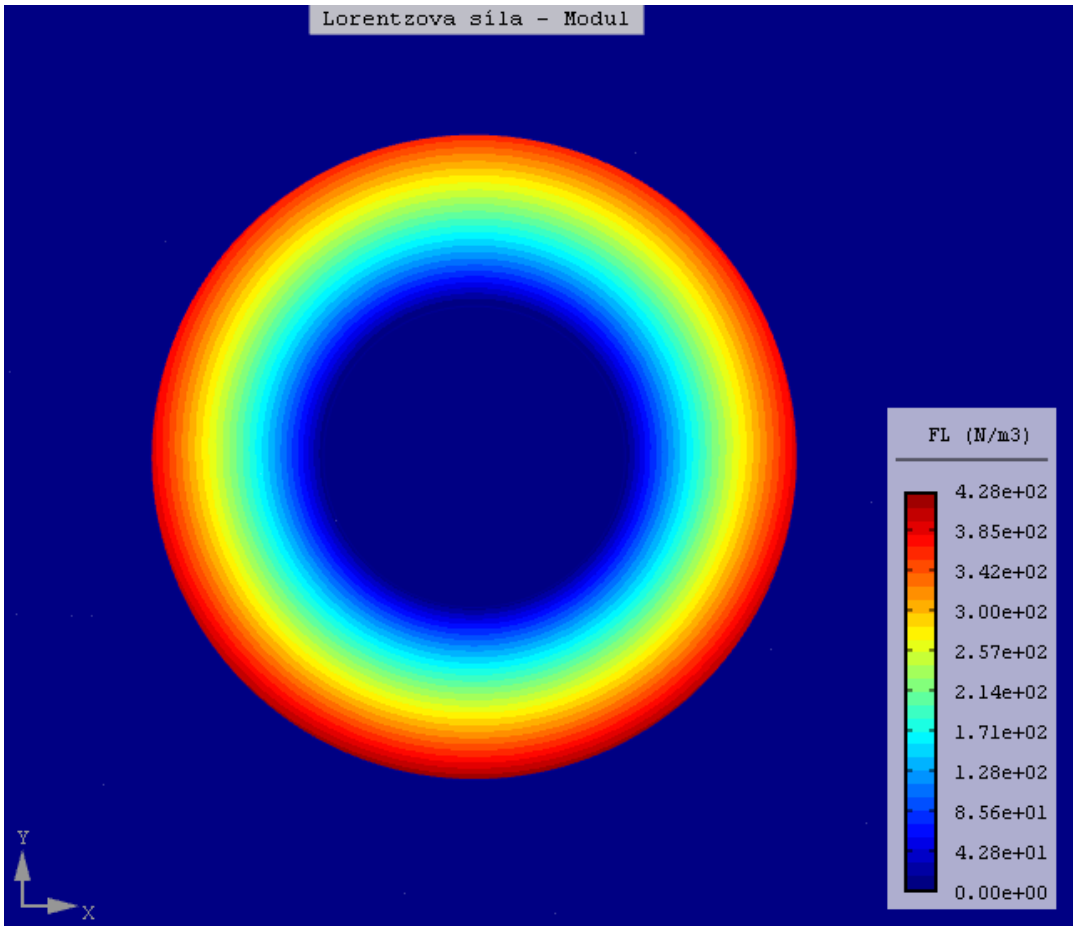


Obr. 6.3: Rozložení magnetické indukce v okolí přípojnic v uspořádání E a F

Rozložení magnetické indukce pro ostatní případy, které zde nejsou uvedeny, jsou vloženy do přílohy.

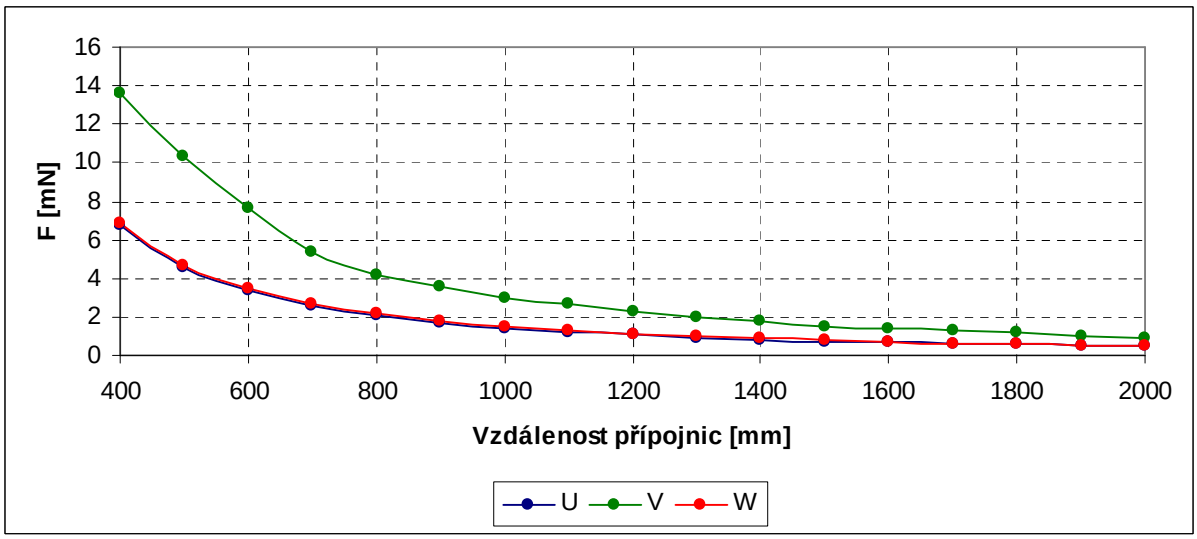
6.2 Síly v přípojnicích

V každém uspořádání A až F byly odečítány hodnoty Lorentzovy síly v jednotlivých vodičích. Nejprve byly přípojnice od sebe osově vzdáleny 2 metry a postupně k sobě přibližovány o 10 centimetrů. Podle předpokladů jsou hodnoty Lorentzovy síly v krajních vodičích téměř shodné. V prostředním vodiči je tato hodnota přibližně dvojnásobná. Obrázek 6.4 zobrazuje rozložení sil ve středním vodiči, kde jsou síly největší.



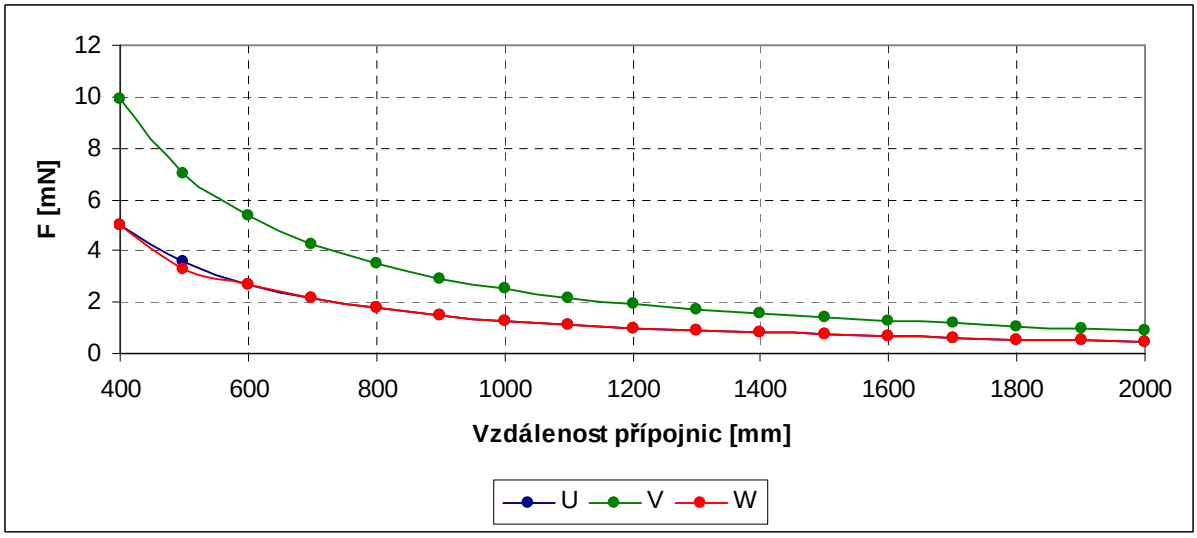
Obr.6.4: Rozložení síly ve střední přípojnici v uspořádání F

Následující graf (6.5) popisuje sílu v uspořádání C v dutých hliníkových přípojnicích. Nejvyšší hodnoty síly jsou pochopitelně v nejmenší zkoumané vzdálenosti 400 milimetrů. V krajních vodičích jsou tyto hodnoty 6,79 a 6,87 mN a v prostředním vodiči je 13,65 mN.



Obr. 6.5: Závislost síly na vzdálenosti v uspořádání C

Uspořádání F reprezentuje velikost Lorentzovy síly měděných vodičů. V tomto rozložení jsou duté měděné vodiče uspořádány do trojúhelníku. Závislost síly na vzdálenosti přípojnic v uspořádání F popisuje obrázek 6.5. Nejvyšší hodnoty síly v nejkratší osové vzdálenosti nabývají hodnot v krajních vodičích 5 a 4,99 mN a ve středním vodiči je tato hodnota 9,9 mN.



Obr. 6.6: Závislost síly na vzdálenosti v uspořádání F

Pro ilustraci jsou zde popsány jen dvě uspořádání. Grafy a tabulky zjištěných hodnot ostatních uspořádání A, B, D a E jsou uvedeny v příloze. Velikosti Lorentzovy síly jsou v porovnání materiálů téměř shodné. Ze zde uvedených hodnot je patrné, že hodnoty síly jsou o něco vyšší v hliníkových vodičích.

Velikosti sil v těchto uspořádáních jsou velice malé a při normálním bezporuchovém provozu nemohou nijak destruktivně ovlivnit jejich uchycení. Problém by nastal při zniku zkratové poruchy, kdy obrovsky vzroste proud procházející přípojnicemi. Tento stav však není zahrnut do řešení práce.

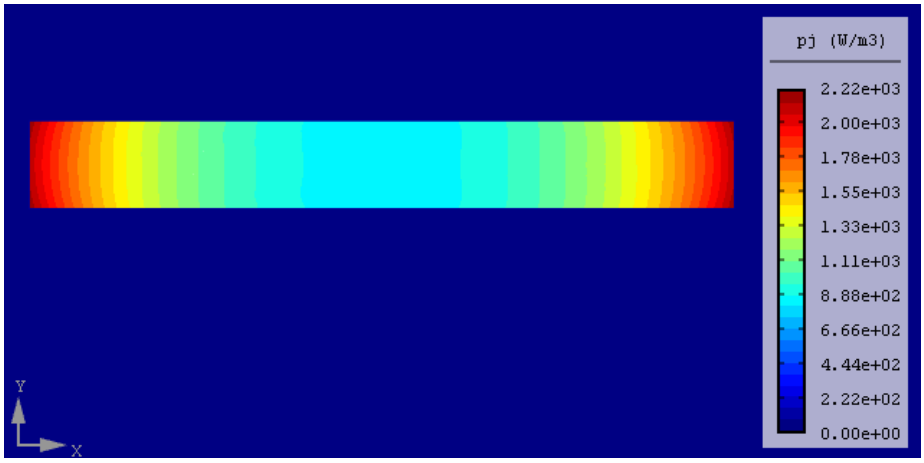
6.3 Tepelné účinky

Pro řešení tepelných účinků ve vodičích jsou vytvořeny v programu Agros2D modely v magnetickém a teplotním poli. V magnetickém poli jsou vyhodnocovány tepelné ztráty, které vznikají v každém vodiči při průchodu proudu. Tyto hodnoty jsou následně použity jako vstupní parametry pro řešení v teplotním poli.

6.3.1 Řešení tepelných ztrát v magnetickém poli

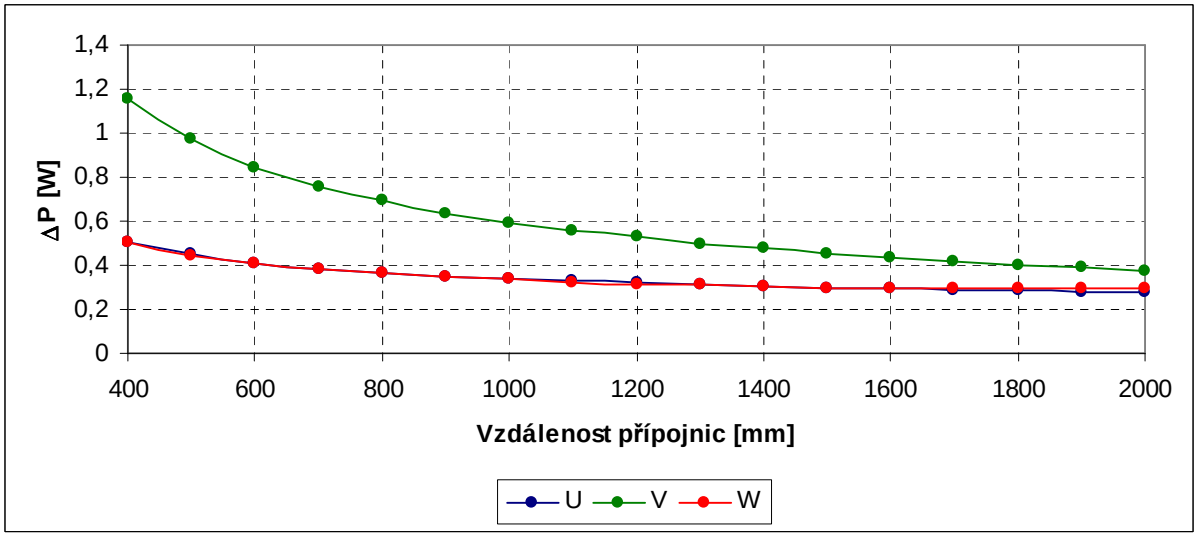
V každém uspořádání A až F jsou hodnoty ztrát odečteny v každém vodiči nejprve v osové vzdálenosti 2 metry a poté jsou vodiče k sobě přibližovány o 0,1 metru až do osové vzdálenosti 400 milimetrů.

V krajních vodičích jsou ztráty přibližně shodné a liší se jen o několik tisícin Wattů. Ve středním vodiči je tato hodnota vyšší, přibližně dvojnásobná. To vyplývá ze vzájemného ovlivňování ostatními vodiči. Nejvyšší hodnoty tepelných ztrát jsou zjištěny v hliníkových přípojnicích. Obrázek 6.7 znázorňuje ztráty v prostřední přípojnici v uspořádání A.



Obr. 6.7: Rozložení ztrát v přípojnici

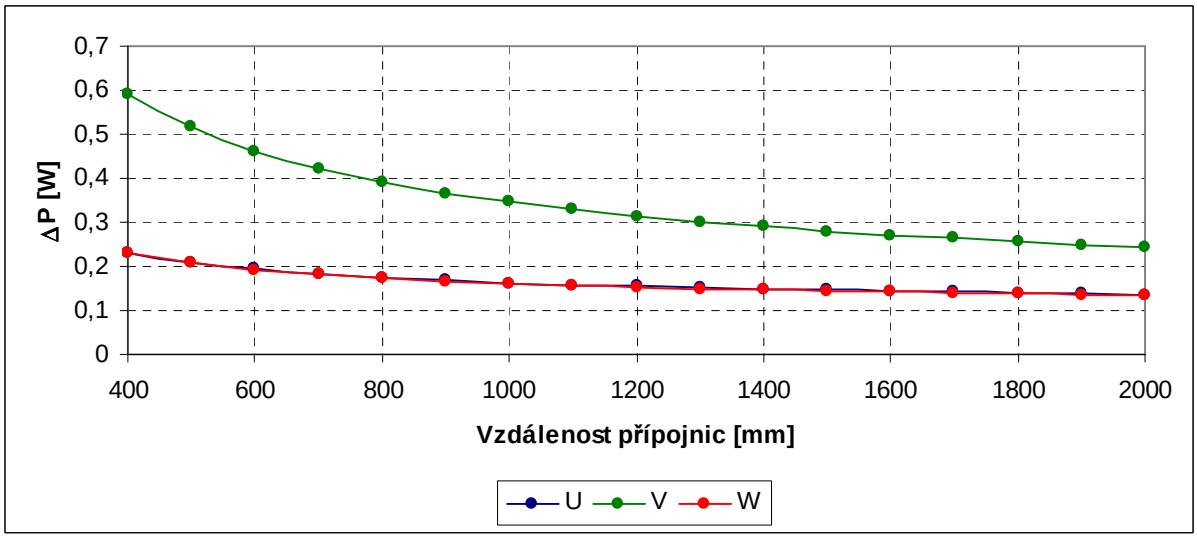
Vložený graf 6.8 zobrazuje tepelné ztráty v uspořádání A, ve kterém jsou ploché hliníkové vodiče umístěné v řadě. V prostředním vodiči ztráty z nejdelší na kratší řešené vzdálenosti vzrostly z 0,37 W na 1,16 W. V krajních vodičích je tato změna 0,28 W na 0,51 W respektive 0,29 W na 0,5 W.



Obr. 6.8: Závislost tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic v uspořádání A

V ostatních uspořádáních s hliníkovými vodiči, tedy C a E, jsou hodnoty ztrát o něco nižší než v uspořádání A. Hliníkové duté přípojnice v rozložení C jsou také umístěné v řadě. Je možné určité srovnání. Hodnoty tepelných ztrát jsou v nejkratší osové vzdálenosti v krajních vodičích 0,46 W a 0,45 W, v prostředním pak 1,06 W. V uspořádání F jsou stejné ploché přípojnice jako v A, avšak jejich uspořádání je do trojúhelníku. V tomto rozložení jsou teplené ztráty dokonce nižší než v dutých hliníkových vodičích. Hodnoty tepelných ztrát ve 400 milimetrů vzdálených přípojnicích jsou 0,34 W, 1 W a 0,38 W.

Následující obrázek 6.9 znázorňuje tepelné ztráty v uspořádání F, tedy v měděných dutých vodičích, které jsou seskupeny do trojúhelníkového rozložení. V tomto případě jsou zjištěny nejnižší ztráty ze všech zkoumaných příkladů. Hodnoty tepelných ztrát se se snižující vzdáleností zvětšují v krajních vodičích z 0,14 W na 0,23 W a 0,135 W na 0,228 W. Ve středním vodiči je posun z 0,244 W na hodnotu 0,593 W.



Obr. 6.9: Závislost tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic v uspořádání F

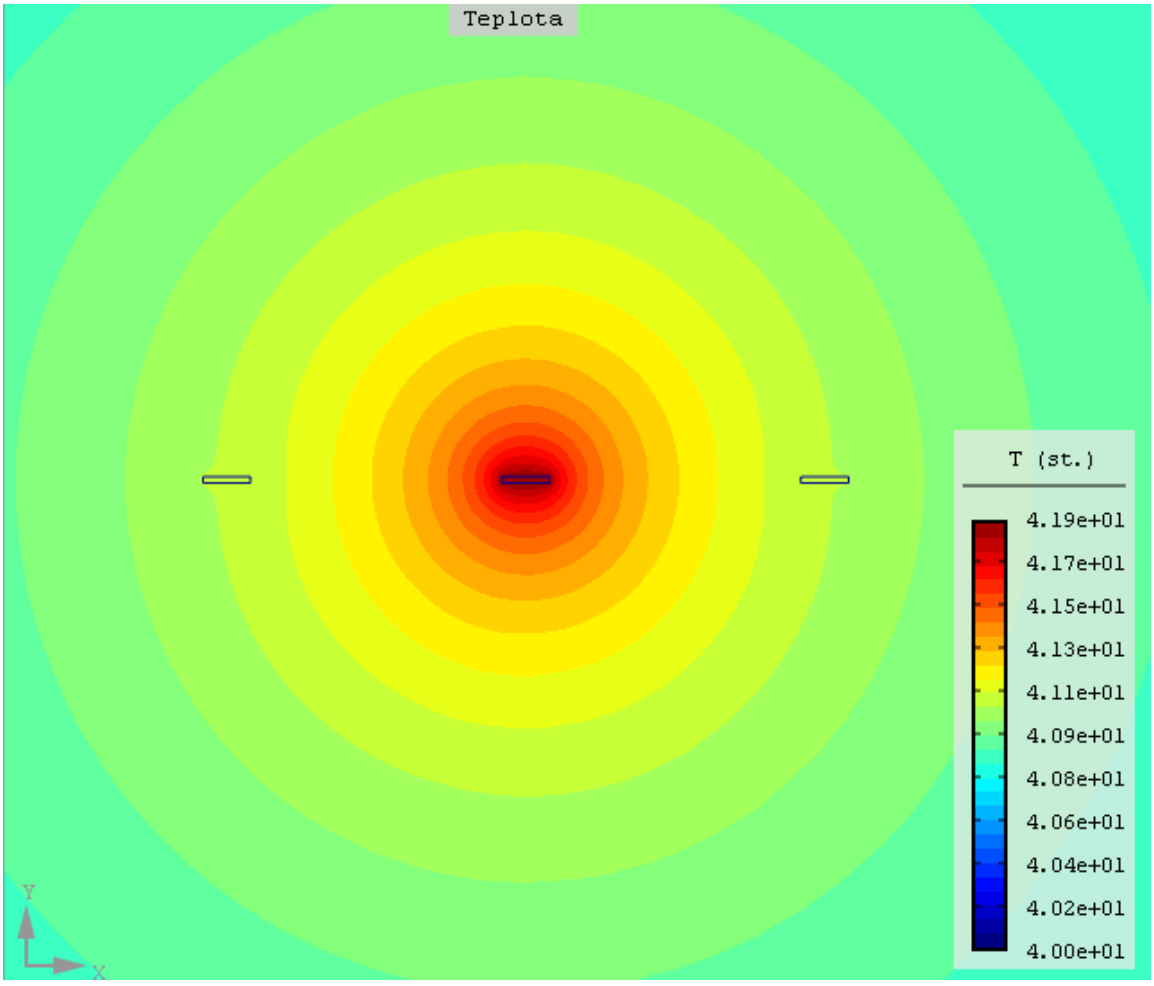
V dalších simulacích, které se týkají měděných přípojnic, tedy B a D, jsou zjištěny ztráty vyšší než ve výše uvedeném zhodnocení. V uspořádání D jsou stejné měděné přípojnice ovšem v jiném rozmístění. Ztráty ve 400 milimetrů osové vzdálenosti činí 0,29 W a 0,286 W v krajních vodičích a 0,668 W ve vodiči ve středu. Řešením situace B jsou zjištěny nejvyšší hodnoty tepelných ztrát v úlohách zabývajících se měděnými přípojnicemi. Hodnoty tepelných ztrát jsou 0,37 W, 0,81 W a 0,36 W.

Obecně lze uvést, že získané hodnoty ztrát jsou v měděných vodičích nižší než u hliníkových. Závislosti tepelných ztrát pro všechna zkoumaná uspořádání jsou vloženy v příloze i s tabulkami zjištěných hodnot.

6.3.2 Řešení tepelných účinků v teplotním poli

Hodnoty tepelných ztrát získaných z modelu magnetického pole jsou použity pro nastavení materiálových vlastností a okrajových podmínek v teplotním poli. To bylo popsáno v kapitole 5.3. V každém uspořádání A až F bylo provedeno řešení v osové vzdálenosti půl metru jednotlivých přípojnic.

Obrázek 6.10 ilustruje rozložení tepla v okolí přípojnic (uspořádání A). To je způsobeno přenosem tepla z pevného tělesa do vzduchu.



Obr. 6.10: Rozložení tepla v okolí systému přípojnic

V následující tabulce 6.1 jsou uvedeny hodnoty teplot, které byly získány v simulacích. Vyjadřují oteplení, které vzniká ve vodičích v závislosti na ztrátách v nich získaných v magnetickém poli. Jsou patrné rozdíly v krajních vodičích a ve středovém vodiči. Z hodnot v tabulce je také možné vyvodit porovnání mezi hliníkovými a měděnými přípojnicemi. Oteplení vychází větší u hliníkových přípojnic. To odpovídá i ztrátám, které jsou větší v uspořádání A, C a E. Z porovnání uspořádání A a C Je patrné, že menší oteplení vzniká v dutých hliníkových vodičích. Hodnoty oteplení v měděných vodičích uspořádání B, D a F jsou nižší než v hliníkových přípojnicích. Při porovnání uspořádání D a F, tedy dutých přípojnic, je nižší hodnota oteplení v trojúhelníkovém uspořádání.

Tab. 6.1 Hodnoty teplot ve vodičích

Uspořádání	Vzdálenost vodičů 0,5 m		
	T [°C] vodič U	T [°C] vodič V	T [°C] vodič W
A	41,08	41,91	41,07
B	40,94	41,65	40,93
C	41,09	41,67	41,08
D	40,93	41,45	40,92
E	41	41,6	40,97
F	40,77	41,33	40,75

Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo zjištění silových a tepelných účinků ve strukturách s masivními vodiči. Tyto účinky byly vyhodnocovány v přípojnicích. V úvodu diplomové práce byla provedena rešerše dostupných a nejběžněji používaných materiálů a jejich vlastností.

Na základě popisu elektromagnetického pole byly sestaveny matematické modely pro řešení magnetického a teplotního pole. Analytickou cestou by bylo řešení velice obtížné. Proto byly výsledky získány prostřednictvím programu Agros2D, který je založen na výpočtech pomocí metody konečných prvků.

Nejprve došlo k vyhodnocování získaných výsledků rozložení magnetické indukce v okolí systému přípojnic. Ta byla zkoumána 1 metr pod jednotlivými fázemi. Z výsledků vyplynulo, že nižší hodnoty byly zjištěny v měděných přípojnicích. Zde se maximální velikost magnetické indukce pohybovala přibližně okolo 17 μT. U hliníkových vodičů je tato hodnota vyšší, v nejhorším případě byla 21 μT. Z těchto uvedených výsledků vyplývá, že hodnoty magnetické indukce rozhodně nepřekračují povolené limity stanovené nařízením vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.

Na základě simulace magnetického pole byly prozkoumány velikosti sil, které působí ve vodičích. Hodnoty v normálním bezporuchovém stavu, který byl řešen, jsou velice malé. Nejvyšší hodnoty byly zjištěny v hliníkových vodičích a dosahují hodnot přibližně 14 mN. V měděných dutých přípojnicích byly zjištěny dokonce síly jen 9,9 mN.

Z řešení připravených modelů v magnetickém poli byla vyhodnocována velikost tepelných ztrát v jednotlivých vodičích. Nejvyšší hodnoty byly zjištěny u hliníkových přípojnic. Velikost ztrát v plochých hliníkových přípojnicích vyšly 0,51 W, 1,1 W a 0,5 W. Úplně nejnižší hodnoty tepelných ztrát byly zjištěny v dutých měděných přípojnicích v trojúhelníkovém uspořádání. Velikosti tepelných ztrát byly 0,23 W, 0,593 W a 0,228 W v jednotlivých fázích.

V teplotním poli bylo zjišťováno oteplení vodiče v závislosti na tepelných ztrátách zjištěných v magnetickém poli. V našich podmínkách se uvažuje teplota okolního prostředí 40 °C.

V přípojnicích bylo zjištěno oteplení nad teplotu prostředí přibližně 2 °C. V měděných přípojnicích byla tato hodnota nižší.

Z hlediska porovnání typů použitých přípojnic se jeví výhodněji duté přípojnice. Ze získaných výsledků je patrné, že lepší výsledky vyšly v modelech řešící měděné přípojnice. Měď je již svou podstatou mnohem lepší vodič. Je možné zmenšit průřez měděných přípojnic a dosáhnout tak obdobných výsledků, které byly zjištěny v hliníkových vodičích. Tím se sníží hmotnost. Z toho vyplývá, že nejlepší je využití dutých měděných přípojnic. Zohledníme-li však cenu a hmotnost měděných přípojnic, tak se jako nejoptimálnější řešení zdá použití dutých hliníkových přípojnic.

Použitá literatura

[1] Siemens Industry Automation & Drive Technology. *Siemens* [online]. [cit. 2012-11-30]. Dostupné z: <http://stest1.etnetera.cz/ad/current/index.php?ctxnh=210cd8c0e6&ctxp=home>

[2] KUČEROVÁ, E.: *Elektrotechnické materiály*, ZČU, Plzeň, 2002. ISBN 80-7082-940-0

[3] KUČEROVÁ, E.: *Přednášky z předmětu elektrotechnické materiály*. Plzeň, 2009.

[4] PÍŠEK, F., L. JENÍČEK a P. RYŠ.: *Nauka o materiálu: neželezné kovy*, ACADEMIA, Praha, 1973.

[5] Products. *Bruker EST* [online]. [cit. 2012-12-04]. Dostupné z: < http://www.bruker-est.com/he-cuponal.html>

[6] *Leonardo ENERGY* [online]. [cit. 2012-11-25]. Dostupné z: < http://www.leonardo-energy.org/copper>

[7] *Leonardo ENERGY* [online]. [cit. 2012-12-04]. Dostupné z: < http://www.leonardo-energy.org/why-copper-used-so-widely-electrical-systems>

[8] KARBAN, P.: *Přednášky za předmětu aplikace teoretické elektrotechniky*. Plzeň, 2011.

[9] *Agros2D* [online]. [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: <http://www.agros2d.org/>

[10] LEDVINOVÁ, M.: Přednášky z předmětu teoretická elektrotechnika 2. Plzeň, 2010

[11] MAYER, D.: Teorie elektromagnetického pole, ZČU, Plzeň, 2001. ISBN 80-7082-826-9

[12] *EGE, spol. s r.o.* [online]. [cit. 2012-12-09]. Dostupné z: <http://www.ege.cz/index.php?docid=66&lang=CZ >

[13] *McWade Productions* [online]. [cit. 2012-12-09]. Dostupné z: <http://www.mcwade.co.za/files/tech_report_alu_tub_busbars_for_hv_sub.pdf>

[14] Storm Copper: Components, Co. [online]. [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.stormcopper.com/>

[15] MAYER, D. , ULRYCH, B.: *Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí*. SNTL/ALFA, Praha, 1988.

[16] Patria online. [online]. [cit. 2013-06-24]. Dostupné z: http://www.patria.cz/zpravodajstvi/2273217/cena-<medi-leti-dolu-kvuli-obavam-z-budoucnosti-svetove-ekonomiky.html>

[17] Alibaba: Global trade starts here. [online]. [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.alibaba.com/product-gs/626582672/price_of_copper_bus_bar.html>

[18] Alibaba: Global trade starts here. [online]. [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.alibaba.com/product-gs/669219278/T1_price_of_copper_bus_bar.html>

[19] Alibaba: Global trade starts here. [online]. [cit. 2013-06-22]. Dostupné z: <http://www.alibaba.com/product-gs/756742704/aluminium_busbar_1350.html>

[20] Alibaba: Global trade starts here. [online]. [cit. 2013-06-22]. Dostupné z:

<http://www.alibaba.com/product -gs/731882320/ supply_high_quality_industry_use_aluminum.html>

[21] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Skin efekt [online]. c2013 [citováno 24. 04. 2013]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Skin_efekt&oldid=10185777>

[22] MACH, F.: *Rotační ohřev nemagnetických struktur válců ve stacionárním magnetickém poli.* Plzeň 2011.50 s.Diplomová práce. Západočeská univerzita Plzni, Fakulta elektrotechnická.

[23] ČSN 33 3210. Elektrotechnické předpisy. *Rozvodná zařízení.* Český normalizační institut. Praha. 1987

[24] *Numerické simulace: Metoda konečných prvků* [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/?q=node/32>

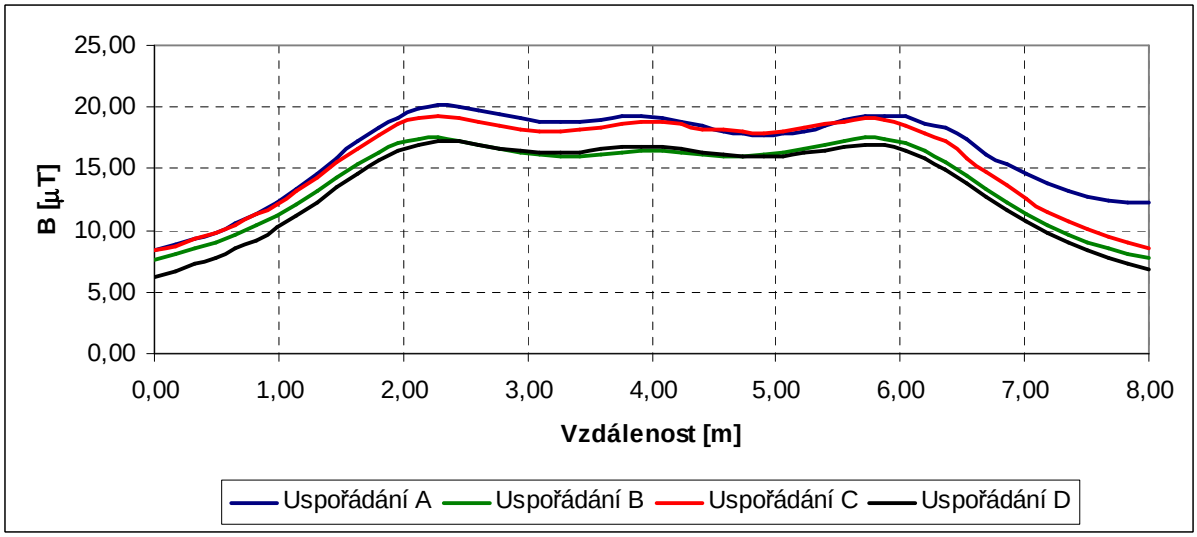
[25] *Nařízení vlády č 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením* [online]. [cit. 2013-02-22]. Dostupné z: <www.crk.cz/FILES/**1_2008**C.PDF>

Přílohy

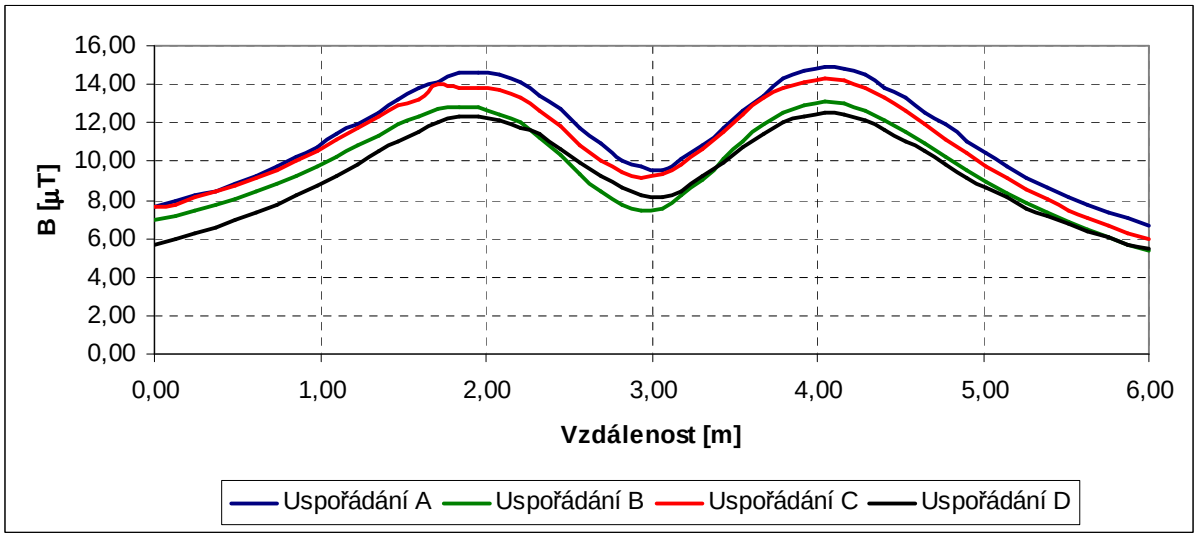
Příloha A Referenční úrovně pro magnetickou indukci stanovené nařízením vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, převzato z [25]

Referenční úrovně pro magnetickou indukci B - nepřetržitá expozice			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	B [T]	frekvence f [Hz]	B [T]
<1	0,28	<1	0,056
1 až 8	0,2 / f2	1 až 8	0,04 / f2
8 až 25	0,025 / f	8 až 25	0,005 / f
25 až 820	25.10^{-3} / f	25 až 820	0,005 / f
50	500.10^{-6}	50	100.10^{-6}
820 až 3.10^3	$30,7.10^{-6}$	800 až 3.10^3	$6,25.10^{-6}$
3.10^3 až 65.10^3	$30,7.10^{-6}$	3.10^3 až 150.10^3	$6,25.10^{-6}$
65.10^3 až 10.10^6	2 / f	150.10^3 až 10^6	0,92 / f
10^6 až 10^7	2 / f	10^6 až 10^7	0,92 / f
10^7 až 4.10^8	$0,2.10^{-6}$	10^7 až 4.10^8	$0,092.10^{-6}$
4.10^8 až 2.10^9	10^{-11}.f 0,5	4.10^8 až 2.10^9	$4,6.10^{-12}$.f 0,5
2.10^9 až 3.10^{11}	$0,45.10^{-6}$	2.10^9 až 3.10^{11}	$0,2.10^{-6}$

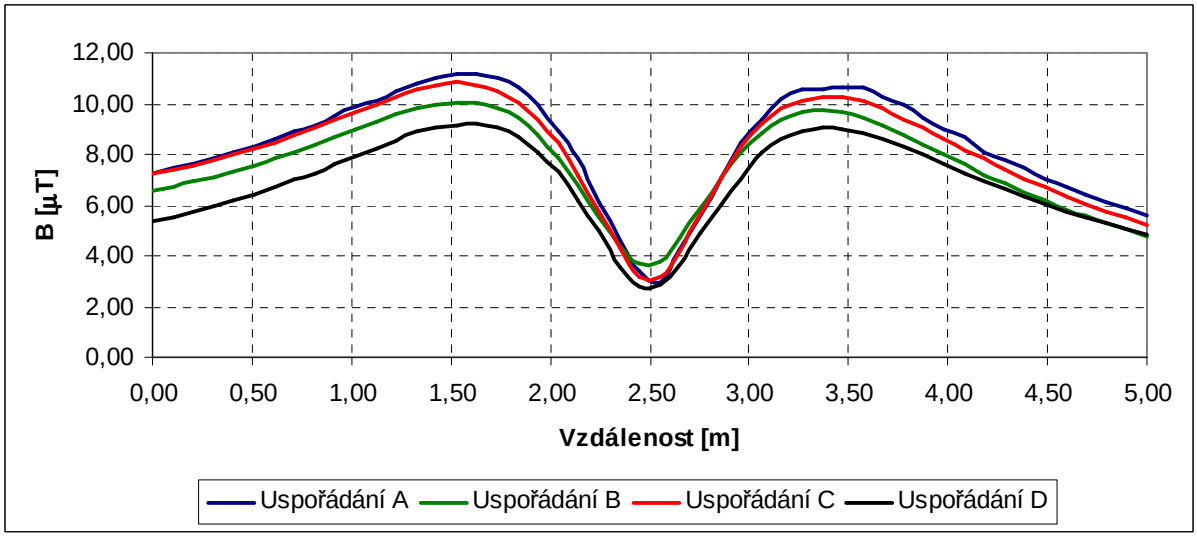
Příloha B Rozložení magnetické indukce v okolí systému přípojnic



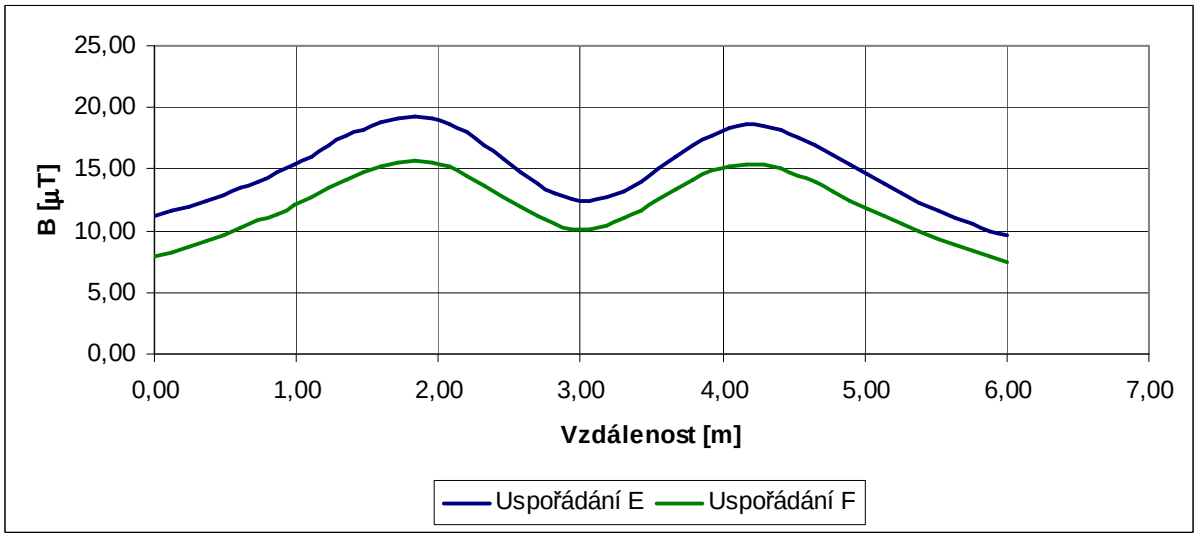
Obr. B1 Rozložení magnetické indukce v okolí systému přípojnic v osové vzdálenosti 2 metry, lineární uspořádání



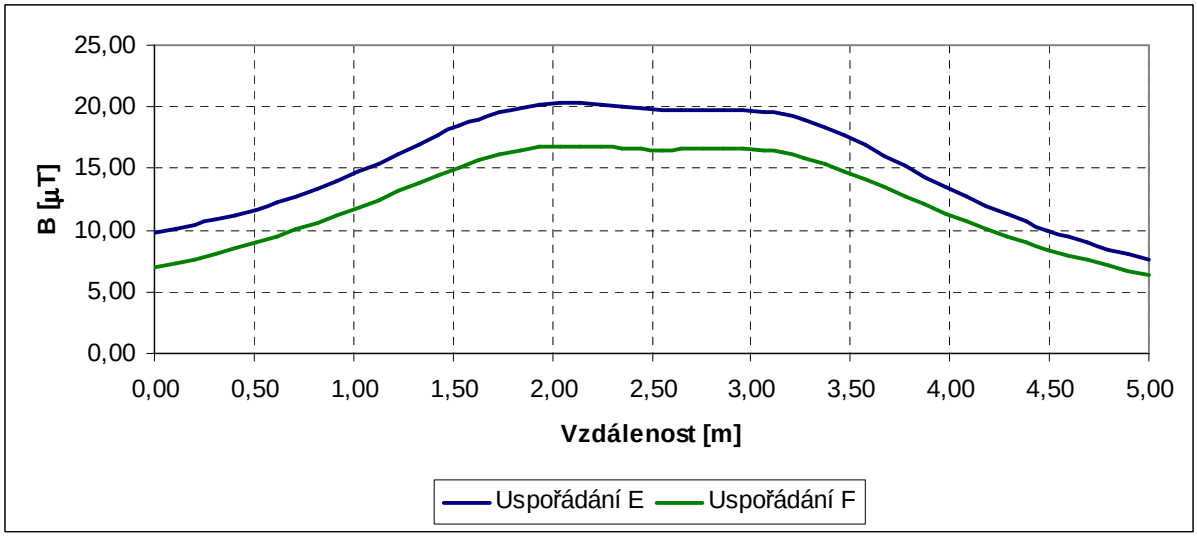
Obr. B2 Rozložení magnetické indukce v okolí systému přípojnic v osové vzdálenosti 1 metr, lineární uspořádání



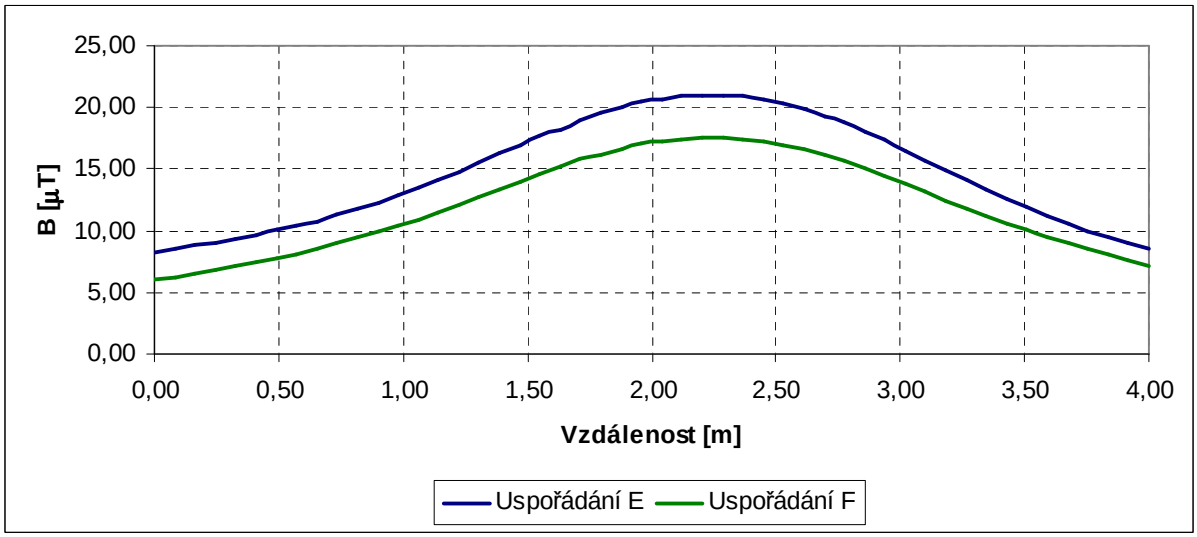
Obr. B3 Rozložení magnetické indukce v okolí systému přípojnic v osové vzdálenosti 0,5 metru, lineární uspořádání



Obr. B4 Rozložení magnetické indukce v okolí systému přípojnic v osové vzdálenosti 2 metry, trojúhelníkové uspořádání

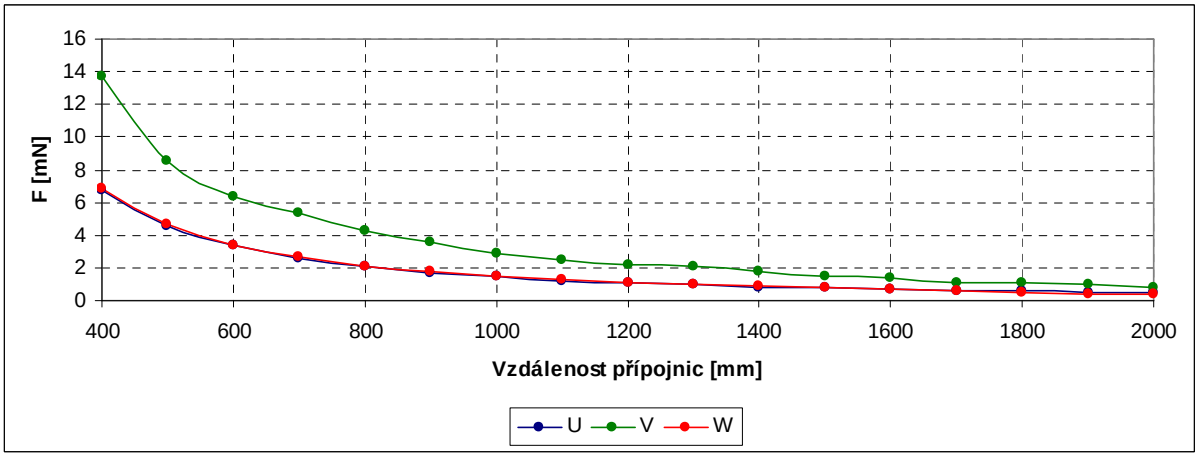


Obr. B5 Rozložení magnetické indukce v okolí systému přípojnic v osové vzdálenosti 1 metr, trojúhelníkové uspořádání

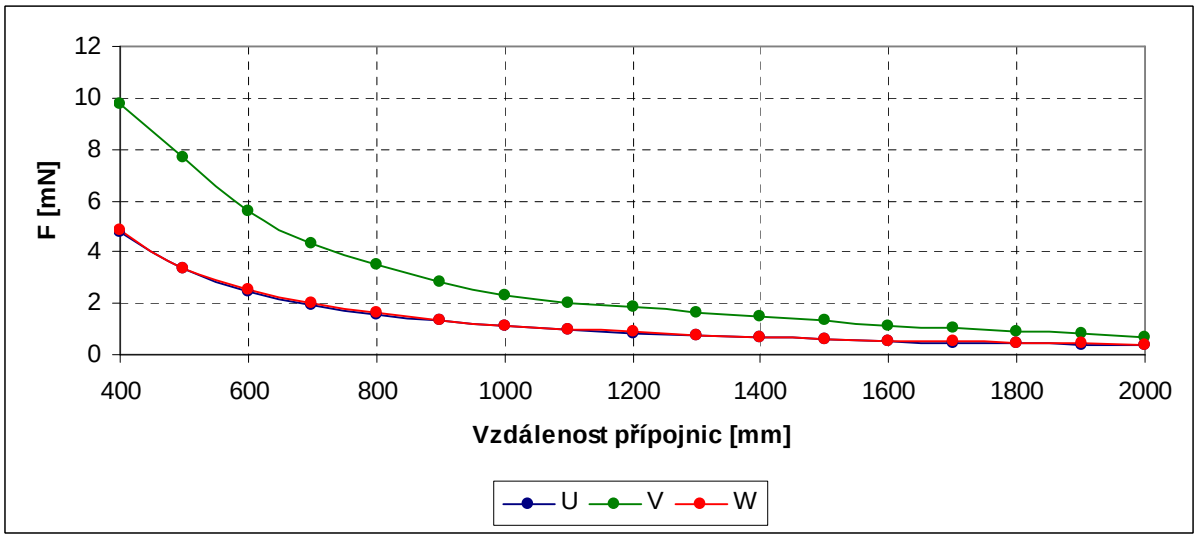


Obr. B6 Rozložení magnetické indukce v okolí systému přípojnic v osové vzdálenosti 0,5 metru, trojúhelníkové uspořádání

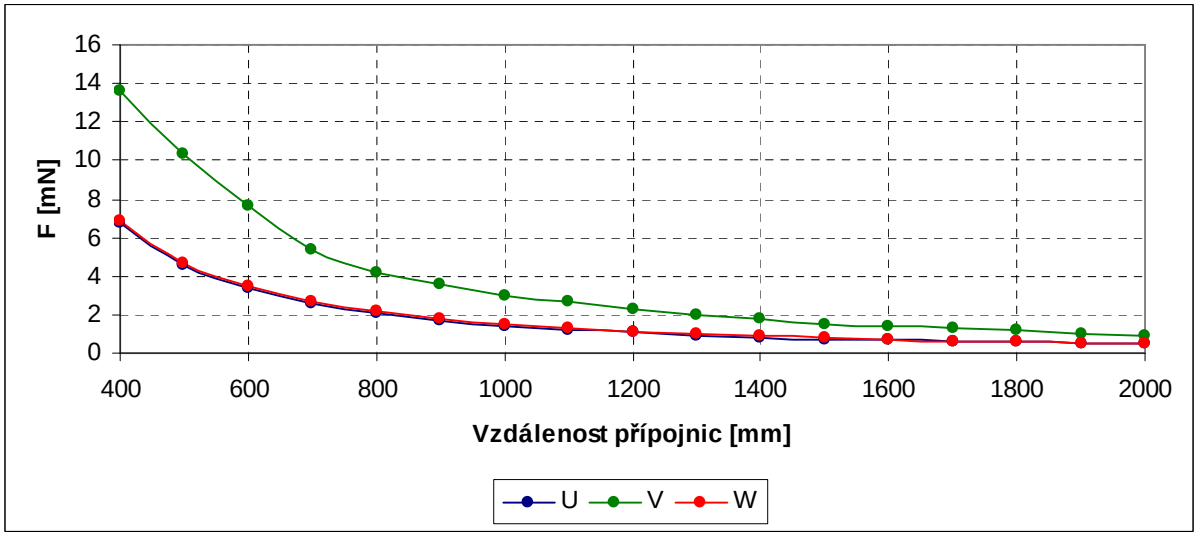
Příloha C *Závislost velikosti sil na vzdálenosti přípojnic*



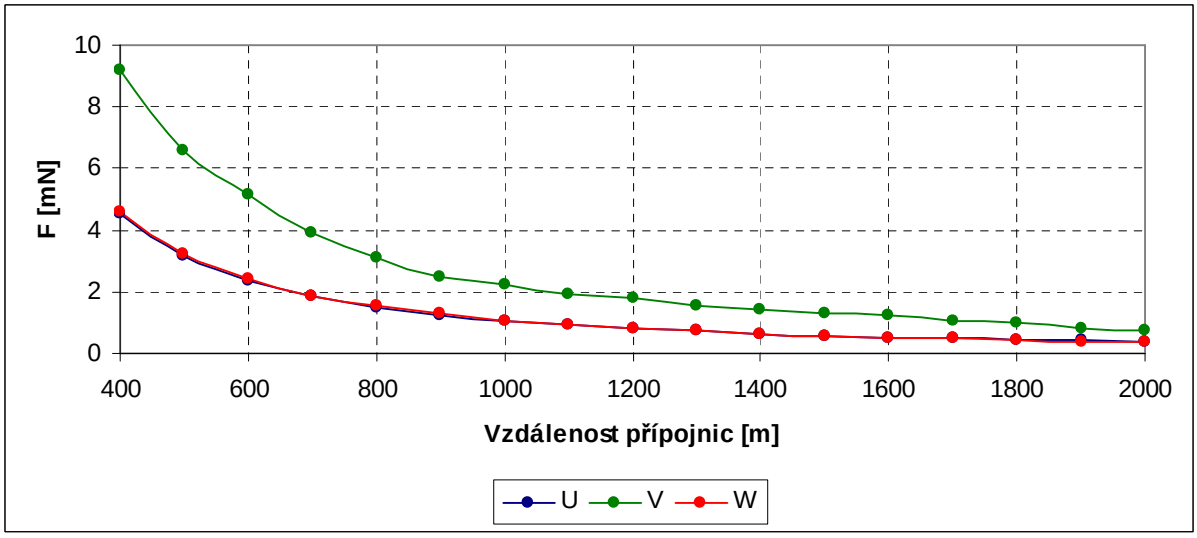
Obr. C1 Závislost velikosti sil na vzdálenosti přípojnic v uspořádáni A



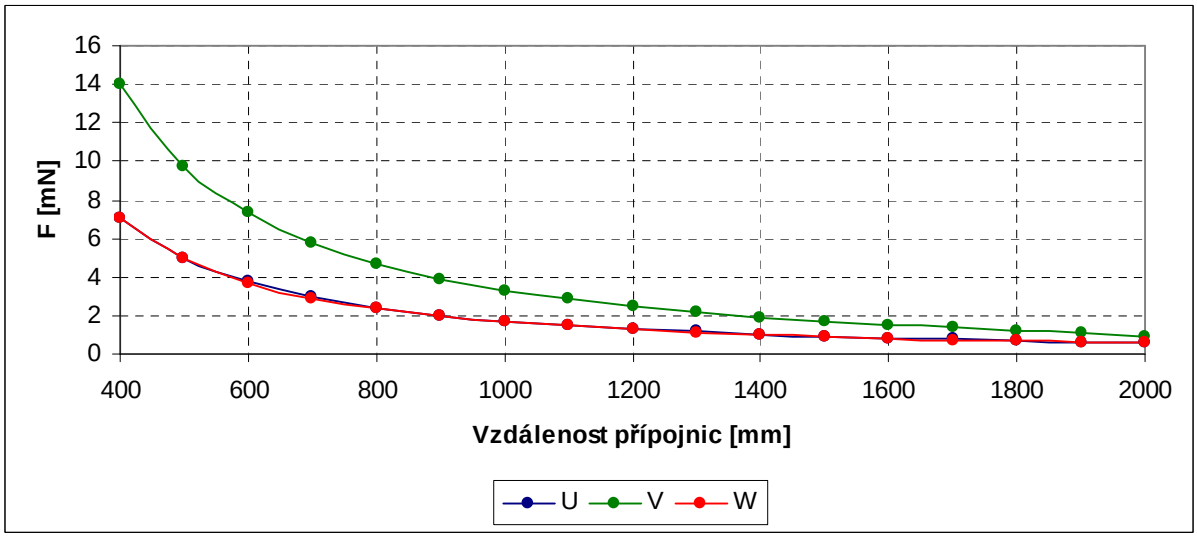
Obr. C2 Závislost velikosti sil na vzdálenosti přípojnic v uspořádáni B



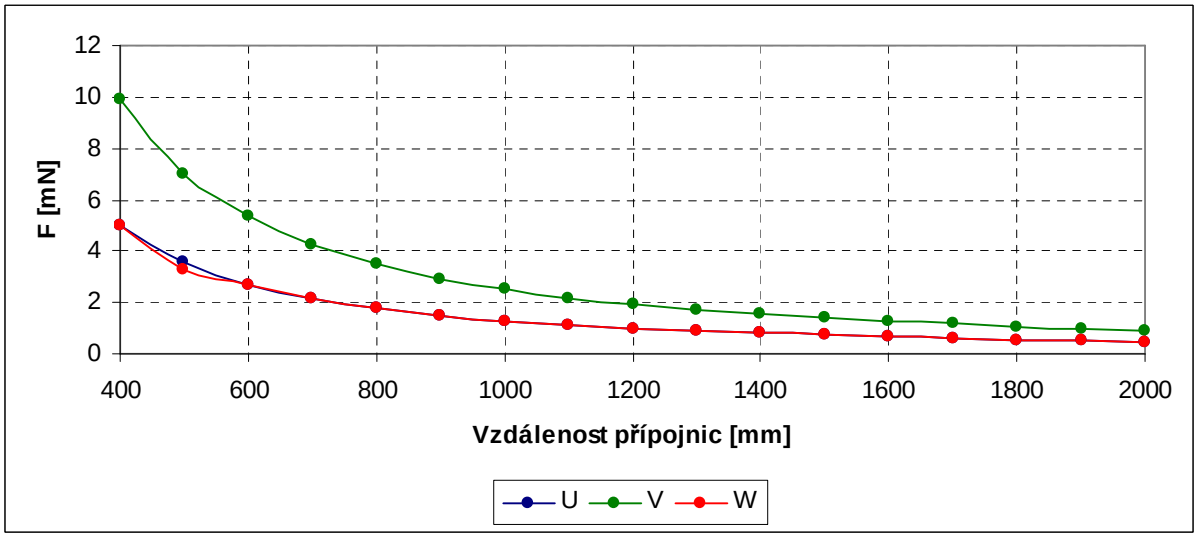
Obr. C3 Závislost velikosti sil na vzdálenosti přípojnic v uspořádáni C



Obr. C4 Závislost velikosti sil na vzdálenosti přípojnic v uspořádáni 4



Obr. C5 Závislost velikosti sil na vzdálenosti přípojnic v uspořádáni E



Obr. C6 Závislost velikosti sil na vzdálenosti přípojnic v uspořádáni F

Příloha D Tabulky hodnot sil

Tab. D1 Hodnoty síly v jednotlivých fázích v uspořádání A

Vzdálenost vodičů [mm]	Síla [N] vodič U	Síla [N] vodič V	Síla [N] vodič W
2000	4,76E-04	8,16E-04	3,66E-04
1900	5,16E-04	9,76E-04	4,40E-04
1800	5,63E-04	1,05E-03	5,10E-04
1700	6,17E-04	1,10E-03	5,85E-04
1600	6,79E-04	1,37E-03	6,66E-04
1500	7,53E-04	1,53E-03	7,53E-04
1400	8,41E-04	1,78E-03	8,53E-04
1300	9,47E-04	2,04E-03	9,68E-04
1200	1,08E-03	2,20E-03	1,11E-03
1100	1,24E-03	2,51E-03	1,28E-03
1000	1,44E-03	2,90E-03	1,49E-03
900	1,71E-03	3,59E-03	1,76E-03
800	2,08E-03	4,31E-03	2,13E-03
700	2,59E-03	5,32E-03	2,65E-03
600	3,35E-03	6,40E-03	3,42E-03
500	4,57E-03	8,53E-03	4,64E-03
400	6,75E-03	1,42E-02	6,82E-03

Tab. D2 Hodnoty síly v jednotlivých fázích v uspořádání B

Vzdálenost vodičů [mm]	Síla [N] vodič U	Síla [N] vodič V	Síla [N] vodič W
2000	3,72E-04	6,82E-04	3,72E-04
1900	4,04E-04	8,02E-04	4,14E-04
1800	4,40E-04	8,95E-04	4,57E-04
1700	4,82E-04	1,06E-03	5,05E-04
1600	5,31E-04	1,12E-03	5,58E-04
1500	5,87E-04	1,34E-03	6,20E-04
1400	6,60E-04	1,48E-03	6,91E-04
1300	7,35E-04	1,62E-03	7,74E-04
1200	8,32E-04	1,86E-03	8,75E-04
1100	9,54E-04	2,05E-03	9,99E-04
1000	1,11E-03	2,31E-03	1,15E-03
900	1,31E-03	2,80E-03	1,36E-03
800	1,57E-03	3,48E-03	1,62E-03
700	1,94E-03	4,31E-03	2,00E-03
600	2,48E-03	5,62E-03	2,54E-03
500	3,33E-03	7,65E-03	3,39E-03
400	4,79E-03	9,73E-03	4,85E-03
300	7,74E-03	1,26E-02	7,80E-03

Tab. D3 Hodnoty síly v jednotlivých fázích v uspořádání C

Vzdálenost vodičů [mm]	Síla [N] vodič U	Síla [N] vodič V	Síla [N] vodič W
2000	4,63E-04	9,16E-04	4,59E-04
1900	5,04E-04	1,02E-03	5,12E-04
1800	5,51E-04	1,15E-03	5,68E-04
1700	6,05E-04	1,27E-03	6,30E-04
1600	6,69E-04	1,38E-03	7,00E-04
1500	7,43E-04	1,53E-03	7,80E-04
1400	8,31E-04	1,76E-03	8,73E-04
1300	9,38E-04	1,95E-03	9,84E-04
1200	1,10E-03	2,26E-03	1,12E-03
1100	1,23E-03	2,68E-03	1,28E-03
1000	1,44E-03	2,96E-03	1,49E-03
900	1,71E-03	3,61E-03	1,77E-03
800	2,08E-03	4,17E-03	2,14E-03
700	2,60E-03	5,35E-03	2,66E-03
600	3,36E-03	7,69E-03	3,43E-03
500	4,60E-03	1,04E-02	4,67E-03
400	6,79E-03	1,37E-02	6,87E-03

Tab. D4 Hodnoty síly v jednotlivých fázích v uspořádání D

Vzdálenost vodičů [mm]	Síla [N] vodič U	Síla [N] vodič V	Síla [N] vodič W
2000	3,77E-04	7,20E-04	3,51E-04
1900	4,06E-04	8,37E-04	3,87E-04
1800	4,40E-04	9,64E-04	4,26E-04
1700	4,79E-04	1,06E-03	4,70E-04
1600	5,25E-04	1,24E-03	5,20E-04
1500	5,78E-04	1,31E-03	5,77E-04
1400	6,41E-04	1,43E-03	6,44E-04
1300	7,17E-04	1,58E-03	7,24E-04
1200	8,10E-04	1,80E-03	8,20E-04
1100	9,25E-04	1,95E-03	9,38E-04
1000	1,07E-03	2,24E-03	1,09E-03
900	1,26E-03	2,51E-03	1,28E-03
800	1,51E-03	3,13E-03	1,53E-03
700	1,86E-03	3,92E-03	1,89E-03
600	2,37E-03	5,16E-03	2,40E-03
500	3,17E-03	6,58E-03	3,20E-03
400	4,56E-03	9,20E-03	4,59E-03

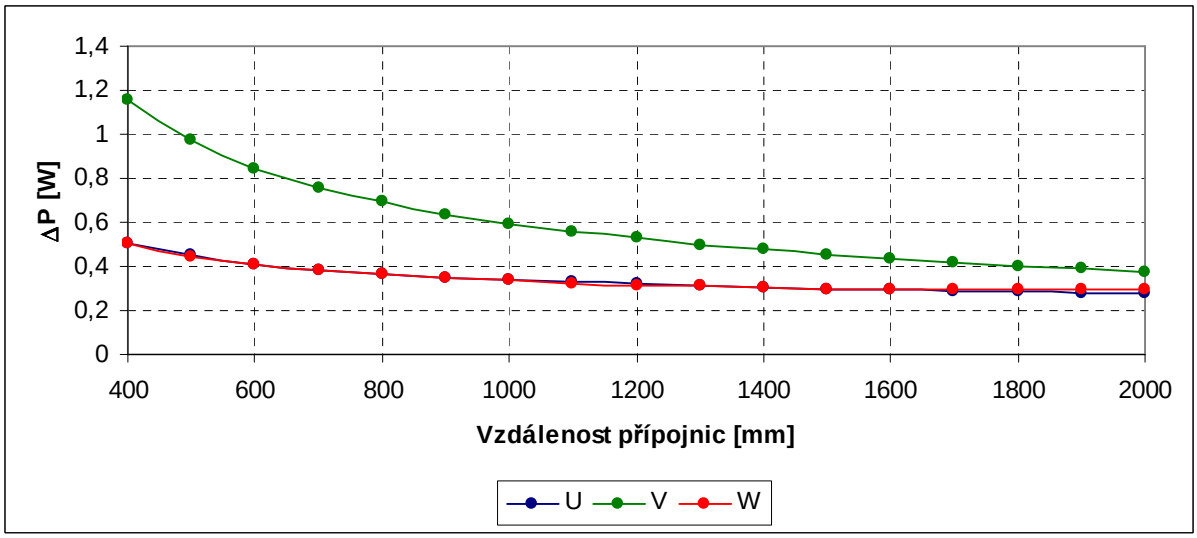
Tab. D5 Hodnoty síly v jednotlivých fázích v uspořádání E

Vzdálenost vodičů [mm]	Síla [N] vodič U	Síla [N] vodič V	Síla [N] vodič W
2000	5,81E-04	9,22E-04	5,63E-04
1900	6,33E-04	1,06E-03	6,13E-04
1800	6,90E-04	1,20E-03	6,71E-04
1700	7,56E-04	1,36E-03	7,37E-04
1600	8,33E-04	1,52E-03	8,12E-04
1500	9,21E-04	1,71E-03	9,00E-04
1400	1,03E-03	1,93E-03	1,00E-03
1300	1,15E-03	2,18E-03	1,13E-03
1200	1,30E-03	2,49E-03	1,28E-03
1100	1,48E-03	2,86E-03	1,46E-03
1000	1,71E-03	3,31E-03	1,69E-03
900	2,01E-03	3,90E-03	1,98E-03
800	2,40E-03	4,69E-03	2,38E-03
700	2,95E-03	5,76E-03	2,92E-03
600	3,74E-03	7,33E-03	3,71E-03
500	4,97E-03	9,77E-03	4,94E-03
400	7,09E-03	1,40E-02	7,05E-03

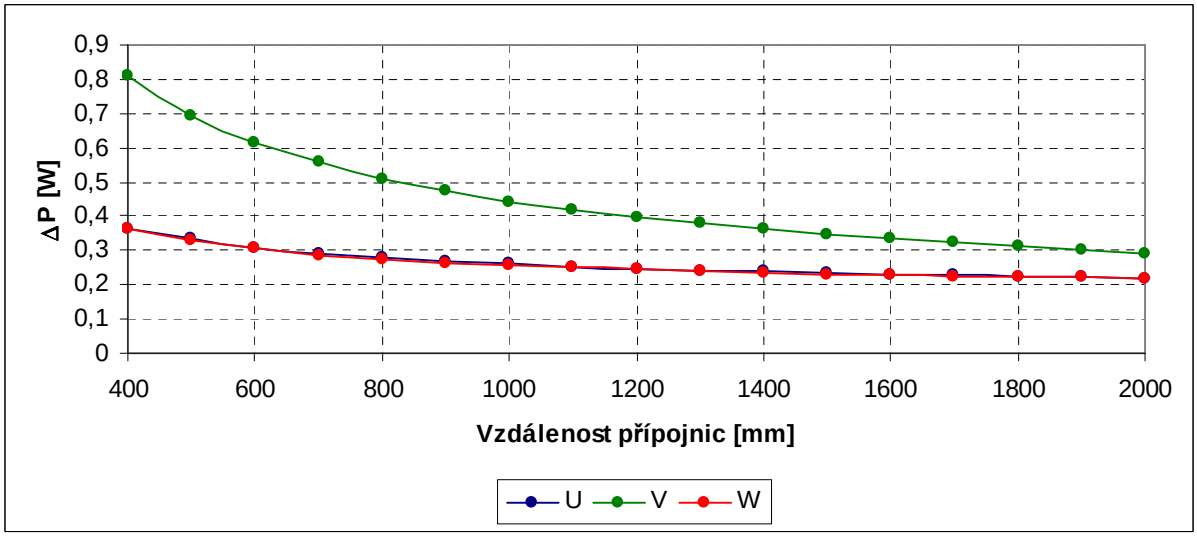
Tab. D6 Hodnoty síly v jednotlivých fázích v uspořádání F

Vzdálenost vodičů [mm]	Síla [N] vodič U	Síla [N] vodič V	Síla [N] vodič W
2000	4,79E-04	9,05E-04	4,73E-04
1900	5,17E-04	9,80E-04	5,10E-04
1800	5,59E-04	1,06E-03	5,52E-04
1700	6,06E-04	1,16E-03	5,99E-04
1600	6,61E-04	1,27E-03	6,54E-04
1500	7,25E-04	1,40E-03	7,17E-04
1400	8,00E-04	1,55E-03	8,17E-04
1300	8,86E-04	1,72E-03	8,81E-04
1200	9,97E-04	1,93E-03	9,88E-04
1100	1,13E-03	2,20E-03	1,12E-03
1000	1,29E-03	2,52E-03	1,28E-03
900	1,50E-03	2,94E-03	1,49E-03
800	1,78E-03	3,49E-03	1,77E-03
700	2,17E-03	4,25E-03	2,15E-03
600	2,72E-03	5,35E-03	2,70E-03
500	3,56E-03	7,03E-03	3,26E-03
400	5,00E-03	9,90E-03	4,99E-03

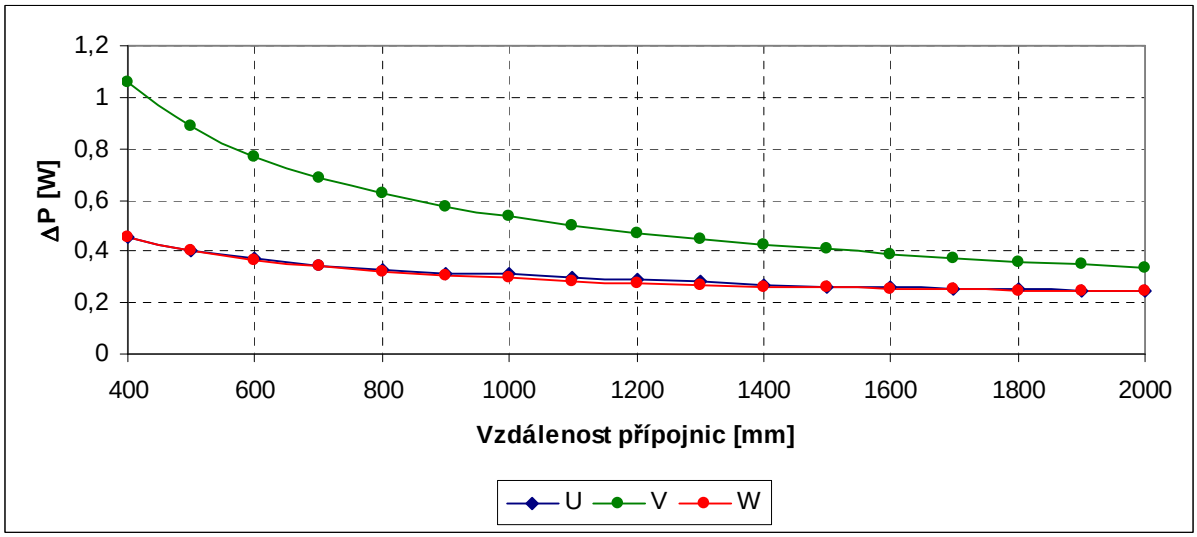
Příloha E Závislosti tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic



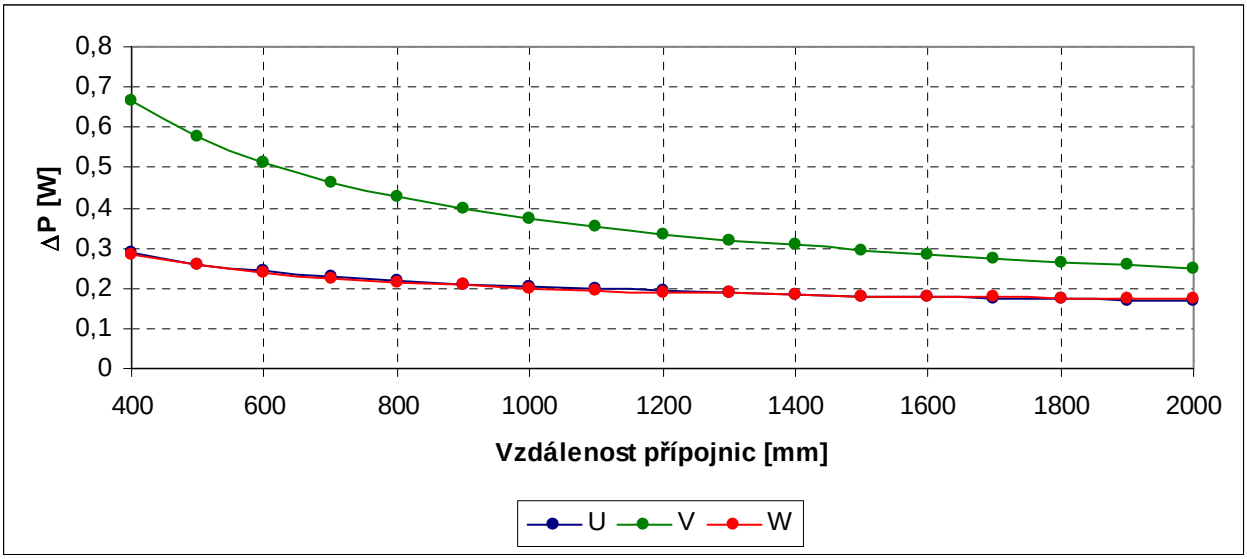
Obr. E1 Závislost tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic v uspořádání A



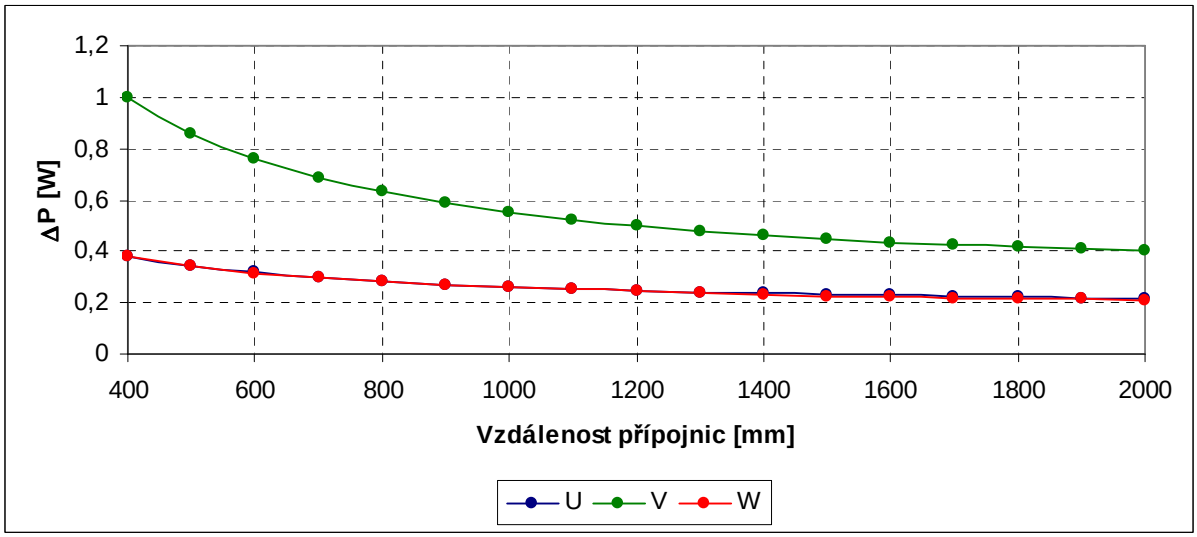
Obr. E2 Závislost tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic v uspořádání B



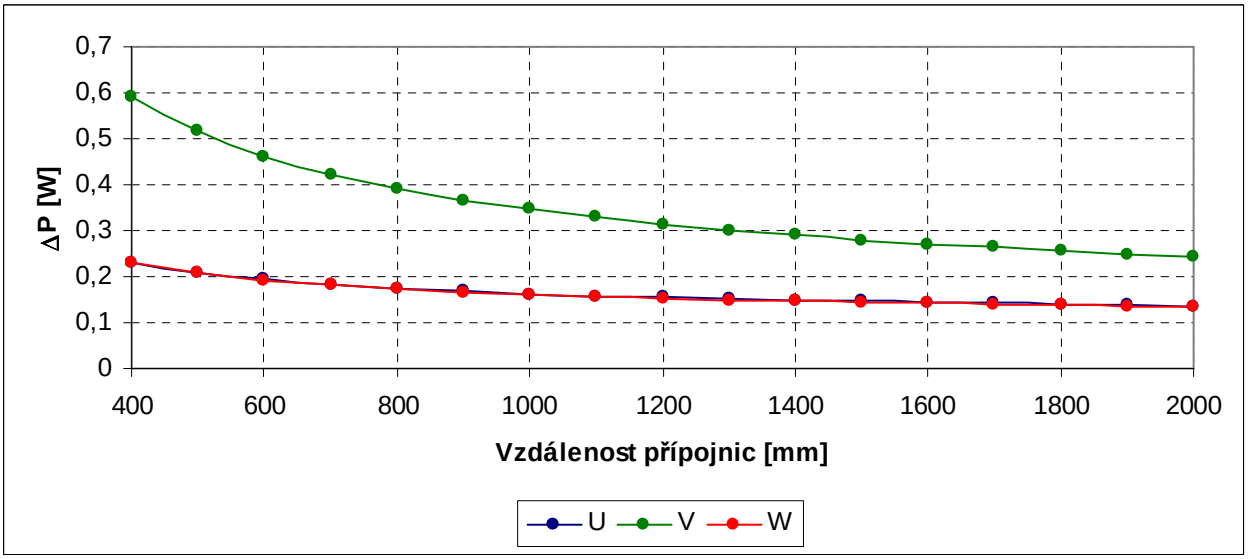
Obr. E3 Závislost tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic v uspořádání C



Obr. E4 Závislost tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic v uspořádání D



Obr. E5 Závislost tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic v uspořádání E



Obr. E6 Závislost tepelných ztrát na vzdálenosti přípojnic v uspořádání F

Přílohy F Tabulky hodnot tepelných ztrát

Tab. F1 Hodnoty tepelných ztrát v jednotlivých fázích v uspořádání A

Vzdálenost vodičů [mm]	ΔP [W] vodič U	ΔP [W] vodič V	ΔP [W] vodič W
2000	0,2787	0,3746	0,2941
1900	0,282	0,3878	0,2929
1800	0,2856	0,402	0,293
1700	0,2896	0,4176	0,2942
1600	0,2941	0,4346	0,2965
1500	0,2991	0,4535	0,2997
1400	0,3047	0,4746	0,3039
1300	0,3112	0,4984	0,3093
1200	0,3187	0,5265	0,3158
1100	0,3274	0,557	0,3239
1000	0,3378	0,5939	0,337
900	0,3503	0,638	0,3459
800	0,3659	0,6921	0,3612
700	0,3857	0,7606	0,381
600	0,412	0,8433	0,4073
500	0,449	0,9733	0,4443
400	0,5051	1,159	0,5007

Tab. F2 Hodnoty tepelných ztrát v jednotlivých fázích v uspořádání B

Vzdálenost vodičů [mm]	ΔP [W] vodič U	ΔP [W] vodič V	ΔP [W] vodič W
2000	0,2196	0,2932	0,2196
1900	0,222	0,3022	0,2209
1800	0,2246	0,312	0,2227
1700	0,2274	0,3227	0,2248
1600	0,2306	0,3345	0,2275
1500	0,2341	0,3476	0,2306
1400	0,2381	0,3622	0,2342
1300	0,2425	0,3787	0,2384
1200	0,2476	0,3975	0,2434
1100	0,2535	0,4191	0,2492
1000	0,2605	0,4444	0,2562
900	0,2688	0,4744	0,2645
800	0,2791	0,5109	0,2748
700	0,2919	0,5563	0,2878
600	0,3087	0,6149	0,3048
500	0,3377	0,6944	0,328
400	0,3655	0,81	0,3621

Tab. F3 Hodnoty tepelných ztrát v jednotlivých fázích v uspořádání C

Vzdálenost vodičů [mm]	ΔP [W] vodič U	ΔP [W] vodič V	ΔP [W] vodič W
2000	0,2448	0,3369	0,2452
1900	0,2479	0,3483	0,2469
1800	0,2513	0,3608	0,2492
1700	0,2551	0,3745	0,252
1600	0,2593	0,3897	0,2555
1500	0,264	0,4066	0,2596
1400	0,2693	0,4256	0,2645
1300	0,2823	0,4471	0,2702
1200	0,2905	0,4718	0,277
1100	0,3002	0,5005	0,285
1000	0,3119	0,5343	0,2946
900	0,3119	0,5749	0,3063
800	0,3264	0,6248	0,3209
700	0,345	0,6879	0,3395
600	0,3697	0,7711	0,3644
500	0,4043	0,8867	0,3993
400	0,4569	1,061	0,4523

Tab. F4 Hodnoty tepelných ztrát v jednotlivých fázích v uspořádání D

Vzdálenost vodičů [mm]	ΔP [W] vodič U	ΔP [W] vodič V	ΔP [W] vodič W
2000	0,1695	0,2485	0,173
1900	0,1713	0,2562	0,1739
1800	0,1734	0,2644	0,1752
1700	0,1756	0,2734	0,1767
1600	0,1781	0,2832	0,1786
1500	0,1809	0,2941	0,1809
1400	0,184	0,3062	0,1836
1300	0,1876	0,319	0,1869
1200	0,1917	0,3351	0,1907
1100	0,1964	0,3527	0,1952
1000	0,2021	0,3733	0,2006
900	0,2088	0,3976	0,2073
800	0,2171	0,427	0,2155
700	0,2275	0,4637	0,2259
600	0,2411	0,5109	0,2395
500	0,2598	0,5749	0,2582
400	0,2898	0,668	0,2857

Tab. F5 Hodnoty tepelných ztrát v jednotlivých fázích v uspořádání E

Vzdálenost vodičů [mm]	ΔP [W] vodič U	ΔP [W] vodič V	ΔP [W] vodič W
2000	0,2154	0,4025	0,2109
1900	0,2181	0,4081	0,2135
1800	0,2211	0,4155	0,2164
1700	0,2244	0,4241	0,2197
1600	0,2288	0,4348	0,2233
1500	0,232	0,4474	0,2273
1400	0,2365	0,4623	0,2319
1300	0,2416	0,4798	0,2371
1200	0,2475	0,5003	0,243
1100	0,2542	0,5246	0,25
1000	0,2622	0,5537	0,2581
900	0,2718	0,5888	0,2679
800	0,2835	0,6321	0,2798
700	0,2982	0,6868	0,2948
600	0,3175	0,7584	0,3144
500	0,3439	0,8566	0,3411
400	0,3828	1,001	0,3804

Tab. F6 Hodnoty tepelných ztrát v jednotlivých fázích v uspořádání F

Vzdálenost vodičů [mm]	ΔP [W] vodič U	ΔP [W] vodič V	ΔP [W] vodič W
2000	0,1365	0,2439	0,1354
1900	0,138	0,2498	0,1368
1800	0,1397	0,2562	0,1384
1700	0,1415	0,2633	0,1402
1600	0,1435	0,2713	0,1422
1500	0,1457	0,2801	0,1445
1400	0,1487	0,29	0,147
1300	0,1511	0,3012	0,1499
1200	0,1544	0,314	0,1532
1100	0,1583	0,3288	0,1571
1000	0,1628	0,346	0,1616
900	0,1681	0,3665	0,167
800	0,1747	0,3914	0,1736
700	0,1829	0,4222	0,1819
600	0,1935	0,4619	0,1926
500	0,208	0,5154	0,2072
400	0,2291	0,5927	0,2283