

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TEORETICKÉ ELEKTROTECHNIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Numerické modelování vlivů externích elektrických a  
magnetických polí na liniová úložná zařízení**

*Originál (kopie) zadání BP/DP*

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na řešení elektrického a magnetického pole venkovních trojfázových vedení a jejich vliv na liniová úložná zařízení. Práce se zabývá modelováním magnetického pole pomocí programu Agros2D. V práci jsou sledovány veličiny, které jsou způsobeny vlivem pole venkovních vedení, v kovových liniových zařízeních v závislosti na umístění zařízení a transpozici fázových vodičů pro dané stožáry vvn.

## **Klíčová slova**

Elektrické pole, magnetické pole, Maxwellovy rovnice, kvazistacionární elektromagnetické pole, skin efekt, elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetická interference, elektromagnetická susceptibilita, elektrochemická koroze, parazitní proudy, bludné proudy

## **Abstract**

The thesis is focused on the solution of electric and magnetic fields of three-phase overhead power lines and the effects their interference has on buried pipelines. The work deals with the modeling of the magnetic field using Agros2D. The paper observed variables that are caused due to the field of outdoor overhead lines in metal line systems, depending on the location of the equipment and the transposition of the phase conductors for high voltage tower .

## **Key words**

The electric field, magnetic field, Maxwell's equations, quasi-stationary electromagnetic fields, skin effect, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, electromagnetic susceptibility, electrochemical corrosion, parasitic currents, stray currents

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 7.6.2013

Kateřina Kopelentová

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala své vedoucí bakalářské práce Ing. Lence Šroubové Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

A ráda bych poděkovala za podporu svojí mamince.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>12</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>14</b>
<b>1. ELEKTROMAGNETICKÉ POLE</b> .....	<b>15</b>
1.1 ELEKTRICKÉ POLE .....	15
1.1.1 Elektrostatické pole .....	16
1.1.2 Stacionární proudové pole .....	16
1.2 MAGNETICKÉ POLE .....	16
1.2.1 Stacionární magnetické pole .....	17
1.3 KVAZISTACIONÁRNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ POLE .....	17
1.4 POVRCHOVÝ JEV .....	17
1.4.1 Elektrický skinefekt .....	17
1.4.2 Magnetický skinefekt .....	18
<b>2. ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA</b> .....	<b>18</b>
2.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA BIOLOGICKÝCH SYSTÉMŮ .....	18
2.2 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ .....	19
2.2.1 Elektromagnetická interference .....	20
2.2.2 Elektromagnetická susceptibilita .....	20
<b>3. PARAZITNÍ PROUDY V LINIOVÝCH ÚLOŽNÝCH ZAŘÍZENÍCH</b> .....	<b>21</b>
3.1 INDUKOVANÉ PROUDY .....	21
3.1.1 Indukované proudy střídavé .....	21
3.1.2 Indukované proudy stejnosměrné .....	21
3.2 BLUDNÉ PROUDY .....	21
3.2.1 Přirozené proudové pole .....	21
3.2.2 Umělé proudové pole .....	21
3.3 ELEKTROCHEMICKÁ KOROZE PARAZITNÍMI PROUDY .....	22
3.4 OMEZENÍ PARAZITNÍCH PROUDŮ .....	23
3.4.1 Pasivní protikorozi ochrana .....	23
3.4.2 Aktivní protikorozi ochrana .....	23
<b>4. AGROS2D</b> .....	<b>23</b>
<b>5. ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLAD</b> .....	<b>24</b>
5.1 VÝPOČTY ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ .....	24
5.2 PREPROCESSING .....	25
5.3 PROCESSING.....	27
5.4 POSTPROCESSING .....	27
5.4.1 Proudová hustota v ocelovém úložném zařízení.....	27
5.4.2 Magnetická indukce v ocelovém úložném zařízení.....	28
5.4.3 Sledované hodnoty v závislosti na poloze úložného zařízení .....	29
5.4.4 Transpozice vodičů .....	32

5.4.5 Možnosti potlačení vlivu elektromagnetických polí na úložná zařízení .....	32
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>34</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>36</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>39</b>



## Seznam obrázků

Obr.2.1: Základní řetězec EMC .....	19
Obr.2.2: Definice úrovní a mezí, vyzařování a odolnosti .....	20
Obr.5.1: Stožár typu dvojitého portálu.....	24
Obr.5.2: Geometrický model s vygenerovanou sítí .....	26
Obr.5.3: Rozložení proudové hustoty v ocelovém potrubí .....	28
Obr.5.4: Rozložení magnetické indukce v ocelovém potrubí.....	28
Obr.5.5: Graf závislosti proudové hustoty na vzdálenosti potrubí od osy stožáru .....	29
Obr.5.6: Graf závislosti magnetické indukce na vzdálenosti potrubí od osy stožáru .....	29
Obr.5.7: Graf závislosti ztrát v závislosti na vzdálenosti potrubí od osy stožáru .....	30
Obr.5.5: Graf závislosti proudové hustoty na hloubce uložení potrubí .....	30
Obr.5.6: Graf závislosti magnetické indukce na hloubce uložení potrubí .....	31
Obr.5.7: Graf závislosti ztrát na hloubce uložení potrubí .....	31

## Seznam tabulek

Tab.1.1: Maxwellovy rovnice .....	15
Tab.2.1: Nejvyšší přípustné hodnoty indukovaných proudů, absorbovaných výkonů a hustoty ozáření podle vyhlášky Ministerstva zdravotnictví ČR č. 480/2000 Sb. ....	19
Tab.3.1: Pravděpodobnost koroze střídavým proudem .....	2
Tab.5.1 Hodnoty proudové hustoty, magnetické indukce a ztrát v ocelovém potrubí pro různé transpozice vodičů vedení .....	33

## Seznam symbolů a zkratek

Označení	Jednotka	Význam
<b>B</b>	T	magnetická indukce
<b>D</b>	C m <sup>-2</sup>	elektrická indukce
<b>E</b>	V m <sup>-1</sup>	intenzita elektrického pole
F	N	síla
f	Hz	frekvence
<b>H</b>	A m <sup>-1</sup>	intenzita magnetického pole
h	m	hloubka
I	A	elektrický proud
<b>J</b>	A m <sup>-2</sup>	proudová hustota
l	m	délka
P	W	ztráty, výkon
Q	C	náboj
r	m	poloměr
R	Ω	odpor
R <sub>m</sub>	H <sup>-1</sup>	magnetický odpor
S	m <sup>2</sup>	plocha
S <sub>p</sub>	VA	přirozený výkon
t	s	čas
γ	S m <sup>-1</sup>	měrná vodivost, konduktivita
v	m s <sup>-1</sup>	rychlost
ε	F m <sup>-1</sup>	permitivita prostředí
ε <sub>0</sub>	F m <sup>-1</sup>	permitivita vakua
ε <sub>r</sub>		relativní permitivita prostředí
λ	m	vlnová délka
μ	H m <sup>-1</sup>	permeabilita prostředí
μ <sub>0</sub>	H m <sup>-1</sup>	permeabilita vakua
μ <sub>r</sub>		relativní permeabilita prostředí
Φ	Wb	magnetický indukční tok
Ψ	A	posuvný proud

EMC	elektromagnetická kompatibilita
EMI	elektromagnetická interference
EMP	elektromagnetické pole
EMS	elektromagnetická susceptibilita

## Úvod

V dnešní době je kladen velký důraz na nepřetržitost, stabilitu a bezpečnost dodávek elektřiny, plynu, tepla a dalších médií. Při rozšiřování a výstavbě nových liniových staveb se však v praxi setkáváme s nedostatečně rychlou odezvou na dynamický rozvoj společnosti. V oblasti energetiky tak dochází k přetěžování stávajících rozvodů energie zejména z důvodu nepredikovatelnosti výkonu fotovoltaických a větrných elektráren. Příliš dlouhá doba výstavby pak ovlivňuje vývoj i v dalších odvětvích.

Při projektování nových liniových staveb je důležité posoudit mnoho faktorů, které by mohli ovlivnit jak samotnou výstavbu, tak i pozdější bezporuchovou funkci zařízení. Z právního hlediska nastává největší problém při výkupu stavebních pozemků, které je velmi časově náročné. Z tohoto důvodu dochází k výstavbě více liniových staveb na jednom pozemku.

Pokud se na jednom pozemku současně nachází elektrická vedení i úložná liniová zařízení, může docházet vlivem magnetického pole k degradaci materiálu kovových potrubí. Přítomnost bludných a indukovaných proudů v potrubí způsobuje jeho korozi a následné proděravění. Z bezpečnostního i finančního hlediska je nutné tyto proudy omezit na minimum. Ideálním řešením je použití liniových zařízení z plastových materiálů, u kterých nedochází k elektromagnetické vazbě s elektrickým vedením. Jelikož se plastové potrubí nevyrábí ve větších průměrech, nelze se vždy vyhnout kovovým materiálům, a je tedy nutné přijmout ochranná opatření.

## 1. Elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole je tvořeno polem elektrickým a magnetickým. Samostatně se tyto pole vyskytují jen ve zvláštních případech, jelikož časová změna jednoho pole je doprovázena vznikem druhého pole. Vztahy mezi elektrickou a magnetickou složkou elektromagnetického pole popisují Maxwellovy rovnice viz Tab.1.

Tab.1: Maxwellovy rovnice převzato z [1.1]

		Integrální tvar	Diferenciální tvar	
I.	Ampérův zákon	$\oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}$	$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	(1.1.)
II.	Faradayův indukční zákon	$\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$	$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	(1.2.)
III.	Gaussova věta	$\oint_s \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q$	$\text{div } \mathbf{D} = \rho$	(1.3.)
IV.	Rovnice kontinuity magnetického pole	$\oint_s \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$	$\text{div } \mathbf{B} = 0$	(1.4.)

Změny, které probíhají v proměnném elektromagnetickém poli, probíhají v elektrickém a magnetickém poli zároveň. Elektromagnetické pole je nositelem energie a šíří se prostorem v podobě elektromagnetického vlnění rychlostí:

$$v = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r} \quad (1.5)$$

Jeho rychlost šíření ve vakuu se uvažuje i pro šíření ve vzduchu a je přibližně rovna  $3 \cdot 10^8$  m/s.

### 1.1. Elektrické pole

Vzniká mezi elektricky nabitými tělesy (částicemi), které na sebe silově působí prostřednictvím účinků tohoto pole. Elektrické pole vzniká jak mezi částicemi, které jsou v klidu, tak i mezi částicemi které se pohybují. Podle jejich pohybu můžeme dělit elektrické pole na elektrostatické a stacionární proudové. Protože elektrické pole vzniká i mezi nepohyblivými částicemi, je zřejmé, že pro jeho vznik není podmínkou protékající proud. Jeho intenzita je přímo úměrná napětí mezi částicemi.

### 1.1.1. Elektrostatické pole

Elektrostatické pole je zvláštní druh elektromagnetického pole, kdy nevzniká magnetická složka. Je buzeno nepohyblivými náboji, není tedy spojeno se vznikem spřaženého magnetického pole. Základní myšlenkou elektrického pole je bodový náboj. Bodové náboje můžeme definovat jako elektricky nabitá tělesa, jejichž rozměry jsou zanedbatelně malé v poměru k jejich vzdálenosti.

Mezi dvěma bodovými náboji působí elektrostatická síla, projevují se její silové účinky a existuje elektrostatické pole. Směr síly je dán charakterem působících nábojů. Pokud na sebe působí dva bodové náboje se stejnou polaritou, budou se odpuzovat. Naopak, pokud na sebe působící bodové náboje budou opačné polarity, výsledná síla bude přitažlivá. Velikost elektrické síly, kterou na sebe působí dva bodové náboje, vyjadřuje Coulombův zákon (1.6).

$$F = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \frac{Q}{r^2} \quad (1.6)$$

Intenzita elektrostatického pole závisí na napětí mezi bodovými náboji a na jejich vzájemné vzdálenosti.

### 1.1.2. Stacionární proudové pole

Stacionární proudové pole je vyvolané stacionárním proudem a pro jeho existenci je nutná přítomnost zdroje. Stacionární proud je tvořen náboji pohybujícími se konstantní rychlostí. Z toho plyne, že pole je časově neproměnné. Hustota tohoto proudu je definována jako

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (1.7)$$

kdy intenzita  $\mathbf{E}$  podle druhé Maxwellovy rovnice je:

$$\oint \mathbf{E} \, dl = 0 \quad (1.8)$$

## 1.2. Magnetické pole

Magnetické pole vzniká v okolí magnetických látek a vodičů, jimiž protéká elektrický proud, jako důsledek pohybu elektrických nábojů. A to jak volných, tak i vázaných. Vázané elektrony se vyskytují u magnetických látek, dipólů, kde se pohybují po pomyslných drahách kolem jader atomů. Magnetické pole je přímo úměrné elektrickému proudu a je charakterizováno vektorem intenzity  $\mathbf{D}$  (1.3).

### 1.2.1. Stacionární magnetické pole

Stacionární magnetické pole je pole časově neproměnné. Vzniká v okolí permanentních magnetů a vodičů protékaných stejnosměrným elektrickým proudem. Stacionární proudové pole vyvolává pole magnetické, avšak stacionární magnetické pole nevyvolává pole proudové. Na rozdíl od proudového pole se stacionární magnetické pole projevuje svými silovými účinky. Silově působí na vodiče protékané proudem a ostatní pohybující se částice.

## 1.3 Kvazistacionární elektromagnetické pole

Kvazistacionární elektromagnetické pole je buzeno časově proměnnými proudy. Aby elektromagnetické pole bylo kvazistacionární, musí splňovat několik podmínek. Časové změny pole musí být natolik pomalé, že v první Maxvellově rovnici (1.1) můžeme zanedbat posuvný proud  $\Psi$  oproti proudu vodivému  $I$ . Kvazistacionární elektromagnetické pole je typické pro silnoprůdové rozvody pro frekvence kolem 50 Hz. Pro tento případ musí ještě platit podmínka, že vlnová délka (1.9) elektromagnetických vln musí být mnohonásobně větší než rozměry přenosové soustavy [1.1], [1.3], [1.5], [1.6], [1.6], [1.7], [1.8].

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.9)$$

## 1.4 Povrchový jev

S povrchovými jevy se můžeme setkat v případě střídavých elektromagnetických polí. Podle veličiny, která povrchový jev vyvolala můžeme hovořit o elektrickém povrchovém jevu, elektrickém skinefektu, nebo o magnetickém povrchovém jevu, magnetickém skinefektu.

### 1.4.1 Elektrický skinefekt

Elektrický povrchový jev pozorujeme u vodičů, jimiž prochází časově proměnný proud. Vzniklé magnetické pole indukuje ve vodiči vířivé proudy a ty se superponují s proudem, který vodičem protéká. Výsledná proudová hustota se rozloží v průřezu nerovnoměrně, u povrchu vodiče se zvětší a v jeho ose se zmenší. Rozdíl velikosti proudové hustoty mezi krajem a osou vodiče závisí na frekvenci proudu, který skinefekt vyvolal. V případě stejnosměrného proudu ( $f = 0$  Hz) je proudová hustota rozložena rovnoměrně, nedochází ke vzniku povrchového jevu. U vysokých frekvencí může docházet až k tomu, že proud



protéká jen tenkou povrchovou vrstvou vodiče. Můžeme tedy říct, že se zvyšující se frekvencí proudu se zvyšuje i odpor vodiče.

#### 1.4.2 Magnetický skin efekt

Magnetický skin efekt je vyvolán proměnným magnetickým indukčním tokem  $\Phi$ . Indukované vířivé proudy vyvolávají vlastní magnetické pole, které se superponuje s původním magnetickým polem, a tak vzniká povrchový jev. Dochází k nerovnoměrnému rozložení magnetické indukce, kdy největší hodnoty dosahuje u povrchu vodiče. Vlivem magnetického povrchového jevu dochází k zvyšování magnetického odporu neboli reluktance [1.4].

## 2. Elektromagnetická kompatibilita

„Elektromagnetická kompatibilita (slučitelnost) je definována jako schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a naopak svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nepřipustně neovlivňovat své okolí, tj. nevyzařovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení.“ [2.8]

Podle oblasti působení se elektromagnetická kompatibilita (EMC) dělí na elektromagnetickou kompatibilitu biologických systémů a na elektromagnetickou kompatibilitu elektrických zařízení a přístrojů.

### 2.1. Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

EMC biologických systémů studuje vliv celkového elektromagnetického pozadí na živé organizmy. Vedle elektromagnetického pole (EMP) tvořeného lidskou činností, umělého EMP, existuje přirozené EMP. Přirozené EMP je všude-přítomné a organizmy se na něj již adaptovaly. Jeho zdrojem může být Slunce, atmosferické poruchy, blesky atd. Uměle vytvořené EMP může mít však při překročení určitých limitů viz tab. 2.1 negativní účinky na biologické organismy. Výsledky studií těchto hodnot jsou nejednoznačné, protože každý organismus reaguje na EMP jinak. Účinky působení EMP na organismus můžeme rozdělit

na tepelné a netepelné. Tepelné účinky jsou vyvolány vysokou hodnotou energie EMP, která působí ohřev tkání, a jsou přímo úměrné frekvenci pole. Netepelné účinky mají za následek indukování proudů do tkání a ty pak ovlivňují funkci nervového systému, srdeční cévy atd.

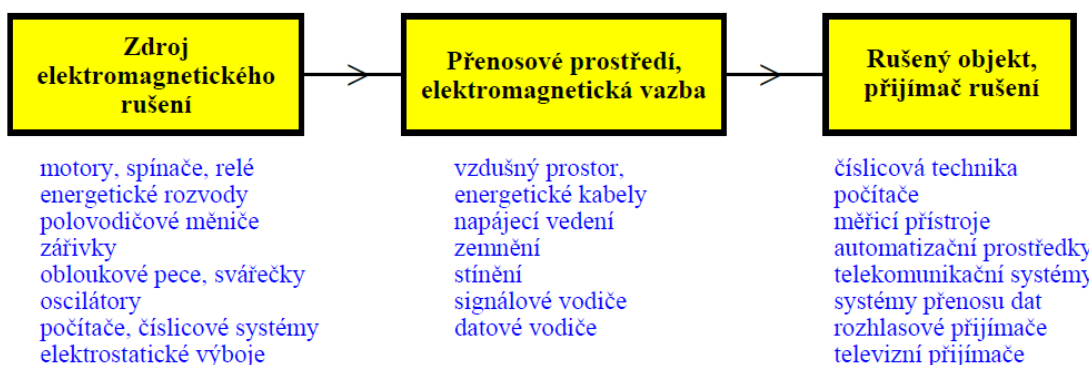
Veličina	Zaměstnanci				Ostatní osoby			
	Kmitočet $f$ [Hz]				Kmitočet $f$ [Hz]			
	< 1	1 ÷ 4	4 ÷ 10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> ÷ 10 <sup>7</sup>	< 1	1 ÷ 4	4 ÷ 10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> ÷ 10 <sup>7</sup>
Indukovaná proudová hustota [A/m <sup>2</sup> ]	0,057	$\frac{0,04}{f}$	0,01	$\frac{f}{10^5}$	0,011	$\frac{0,008}{f}$	0,002	$\frac{f}{5 \cdot 10^5}$
Měrný absorbovaný výkon [W/kg]	10 <sup>5</sup> ÷ 10 <sup>10</sup>				10 <sup>5</sup> ÷ 10 <sup>10</sup>			
	0,4				0,08			
Plošná hustota zářivého toku [W/m <sup>2</sup> ]	10 <sup>10</sup> ÷ 3·10 <sup>11</sup>				10 <sup>10</sup> ÷ 3·10 <sup>11</sup>			
	50				10			

Tab. 2.1. Nejvyšší přípustné hodnoty indukovaných proudů, absorbovaných výkonů a hustoty ozáření podle vyhlášky Ministerstva zdravotnictví ČR č. 480/2000 Sb. Převzato z [2.8]

Vlivem magnetické indukce může v půdě, jejíž elektrická vodivost není nulavá, vznikat malá proudová hustota. Pro lidi je proudová hustota vyskytující se v půdě limitována vyhláškou 1/2008 Sb. Tato hodnota se ovšem nevztahuje na ostatní živé organismy, které se vyskytují v půdě.

## 2.2. Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

EMC technických systému se zabývá vzájemným působením a ovlivňováním elektrotechnických a elektronických systémů. Její působení lze popsat „základním řetězcem EMC“ viz obr. 2.1.



Obr.2.1: Základní řetězec EMC. Převzato z [2.8]

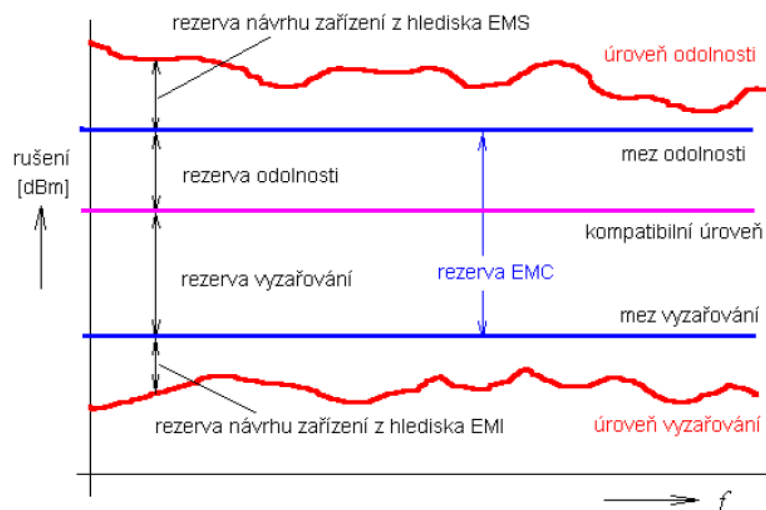
### 2.2.1 Elektromagnetická interference

Elektromagnetická interference (EMI), neboli elektromagnetické rušení, popisuje zdroje rušení, šíření rušivého signálu, příčiny rušení a jejich odstraňování. Rušivá emise se může přenášet po vedení ve formě rušivých proudů, vazbou (blízkým elektromagnetickým polem) nebo vyzařováním elektromagnetického pole (vzdáleným elektromagnetickým polem). Rušení prostřednictvím vedení převládá zejména u průmyslových aplikací, protože jsou od rušení elektromagnetickými poli odstíněny.

### 2.2.2 Elektromagnetická susceptibilita

Elektromagnetická susceptibilita (EMS) je elektromagnetická odolnost vůči rušivému signálu. Zabývá se odstraňováním důsledků elektromagnetického rušení a schopností systému bezporuchově pracovat v tomto rušivém prostředí.

Z hlediska návrhu musíme uvažovat, že každé elektrotechnické či elektronické zařízení je zároveň zdrojem elektromagnetického rušení i jeho přijímačem, proto musí být jeho mez odolnosti vyšší než mez vyzařování obr. 2.2. Aby byly splněny požadavky EMC, musí být úroveň vyzařování nižší než mez vyzařování, a naopak úroveň odolnosti vyšší než mez odolnosti [1.2], [1.9], [2.1], [2.3],[ 2.8], [2.9].



Obr.2.2: Definice úrovní a mezí, vyzařování a odolnosti. Převzato z [2.8]

### **3. Parazitní proudy v liniových úložných zařízeních**

U kovových liniových zařízeních se setkáváme s parazitními proudy, které způsobují jejich degradaci korozí. Přítomnost těchto proudů je způsobena buď přímou indukcí vnějšího magnetického pole, nebo pronikáním do zařízení z okolní půdy.

#### **3.1 Indukované proudy**

Vlivem vnějšího umělého magnetického pole se do kovových liniových zařízení indukují parazitní proudy stejnosměrné nebo střídavé, a to podle charakteru zdroje.

##### **3.1.1 Indukované proudy stejnosměrné**

Indukce stejnosměrných proudů je způsobena magnetickým polem tvořeným stejnosměrným trakčním vedením.

##### **3.1.2 Indukované proudy střídavé**

Střídavé proudy jsou indukované do liniových zařízení vlivem magnetického pole střídavých elektrických vedení. Intenzita koroze střídavými proudy je dána zejména vzdáleností mezi liniovým úložným zařízením a elektrickým vedením, velikostí přenášeného napětí (proudu), vedením a uspořádáním fázových vodičů. [2.10]

#### **3.2 Bludné proudy**

Bludné proudy jsou proudy, které se vyskytují v zemi a způsobují korozi kovových liniových zařízení. Jejich zdrojem může být jak umělé, tak i přirozené proudové pole.

##### **3.2.1 Přirozené proudové pole**

Přirozené proudové pole vzniká vlivem induktivních jevů v zemském magnetickém poli. Dalším zdrojem tohoto pole jsou bludné proudy, které vznikají v půdě elektrochemickou aktivitou hornin.

##### **3.2.2 Umělé proudové pole**

Umělá proudová pole jsou tvořena bludnými proudy, které se vyskytují v půdě jako následek vodiče nedostatečně izolovaného od země nebo zařízení, které využívá zem jako zpětný vodič. Pole může být vyvolané stejnosměrným nebo střídavým proudem.

Stejnosměrné bludné proudy se podle vodivosti země rozšiřují do okolí vedení, avšak směr jejich toku není možné přesně stanovit. Jejich zdroji jsou zejména stejnosměrně elektrifikované železnice, městská trolejová doprava, metro a další systémy, které využívají jako zpětných vodičů kolejnice. Dalším významným zdrojem jsou stejnosměrné rozvody v průmyslových podnicích, které využívají elektrické svářečí agregáty.

Střídavé bludné proudy jsou důsledkem elektromagnetické vazby mezi elektrickým vedením střídavého proudu a zemí. Směr jejich toku přibližně kopíruje trasu vedení. Zdrojem střídavých bludných proudů jsou zejména elektrická vedení, případně střídavé trakční systémy [2.10], [2.4].

### 3.3 Elektrochemická koroze parazitními proudy

Elektrochemická koroze způsobená bludnými proudy neohrožuje kovová liniová zařízení v celé délce, ale jen v určitých částech. Liniová zařízení tvoří tři potenciálové části. A to na katodickou, neutrální a anodickou oblast. Katodická oblast je tvořena vstupem proudu do úložného zařízení a je ohrožena zejména pokud je potrubí vyrobeno z hliníku nebo olova. Může docházet ke ztrátě pevnosti, což je velice nebezpečné z u plynovodních zařízení. V neutrální oblasti bludné proudy pouze protékají a není ohrožena koroze. Anodickou oblastí vystupují bludné proudy z úložného zařízení. Dochází k elektrolytickému rozpouštění kovů a výslednému proděravění kovu. K výraznému poškození dochází hlavně u ocelových, případně litinových zařízení v přítomnosti stejnosměrných bludných proudů. [2.4][2.5], [2.11].

Liniové kovové zařízení se považuje za chráněné proti korozi střídavými proudy, jestliže efektivní hodnota hustoty střídavého proudu nepřesáhne  $30 \text{ Am}^{-2}$  viz tab.5.1.

Efektivní hustota proudu [ $\text{A m}^{-2}$ ]	Pravděpodobnost koroze stříd. proudem
< 30	nízká
30 – 100	střední
> 100	vysoká

Tab.3.1: Pravděpodobnost koroze střídavým proudem. Převzato z [3.1]

### 3.4 Omezení vzniku parazitních proudů

Z bezpečnostních i finančních důvodů je třeba přijmout ochranná opatření a předejít tak korozi kovových liniových zařízení. Jedním z možných řešení je zvětšení vzdálenosti liniových zařízení od zdroje proudového pole, protože intenzita koroze je nepřímo úměrná této vzdálenosti. Dalším řešením je použití některé z protikorozních ochran úložných zařízení.

#### 3.4.1 Pasivní protikorozní ochrana

Odizolováním povrchu liniových zařízení od země zvýšíme odpor zařízení a tím minimalizujeme parazitní proudy. Jiný způsob pasivní ochrany je zvýšení podélného odporu potrubí, např. použitím izolačních spojek.

#### 3.4.2 Aktivní protikorozní ochrana

Aktivní protikorozní ochrana se zakládá na principu účinku stejnosměrného proudu, který prochází chráněným zařízením. Tento proud snižuje protikorozní rychlost. Podle zapojení chráněného zařízení rozlišujeme ochranu katodickou a anodickou, podrobněji v [2.7]. Další zdroje [2.5], [2.4], [2.10], [2.11].

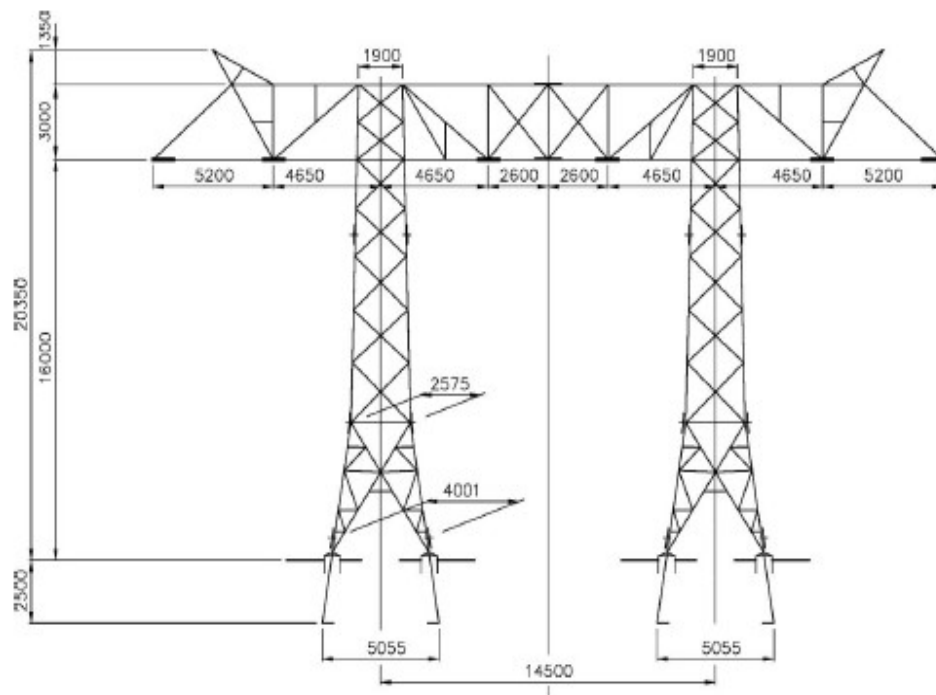
## 4. Agros2D

Program Agros2d je určen pro řešení fyzikálních polí. Je napsán v jazyce C++ a pro řešení příslušných parciálních rovnic využívá metodu konečných prvků. Pomocí Agrosu2D lze řešit problematiku elektrostatického, elektrického proudového, magnetického, teplotního nebo akustického pole. Problém lze řešit v kartézském nebo osově symetrickém uspořádání pro ustálený stav, harmonický průběh nebo pro přechodový děj.

Samotnou simulaci lze rozdělit na preprocessing, procesing a postprocessing. V preprocessingu (v předběžném zpracování) se volí druh řešeného fyzikálního pole a volí se souřadnicový systém. Dále se vytváří příslušný model, definují se jeho geometrické rozměry, přiřazují se materiálové vlastnosti a podmínky na rozhraní. Nakonec se vygeneruje síť. Processing (řešení) je automatické řešení úlohy. Postprocessing (následné zpracování) je poslední etapa simulace, kdy se vyhodnocuje řešení úlohy a provádí se grafická interpretace výsledků [2.2].

## 5. Ilustrativní příklad

V této kapitole se budu věnovat postupné analýze magnetického pole venkovního trojfázového vedení a výsledného indukovaného proudu do kovového liniového zařízení v závislosti na místě uložení zařízení v zemi a transpozici vodičů vedení. Pro řešení ilustrativního problému jsem si vybrala stožár typu Dvojitý portál, který se používá pro vedení o napěťové hladině 400 kV. Výsledky pro další stožár jsou uvedené v příloze A.



Obr.5.1: Stožár typu Dvojitý portál. Převzato z [2.6].

### 5.1 Výpočty základních parametrů

Pro samotnou simulaci problému je nutné znát proudovou hustotu  $J$  v jednotlivých fázích vedení. Vypočítala jsem si proud fází z napětí a přirozeného výkonu na vedení, kdy jsem vycházela ze vzorce (5.1.).

$$S_p = 3UI \tag{5.1}$$

$$U = 400 \text{ kV}$$

$$S_p = 550 \text{ MVA}$$

$$I = \frac{S_p}{3U} = 550 \frac{10^6}{3 \cdot 400 \cdot 10^3} = 458. \bar{3} \text{ A}$$

A dále proudovou hustotu  $J$  podle vzorce

$$J = \frac{I}{S} = \frac{I}{\pi r^2} \quad (5.2)$$

$$r = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$J = \frac{458. \bar{3}}{\pi (2.5 \cdot 10^{-2})^2} = 233 \, 427.2499 \text{ A m}^{-2}$$

Jelikož jsou proudy v jednotlivých fázích mezi sebou posunuty o úhel  $120^\circ$ , mohu proudovou hustotu v jednotlivých fázích určit jako:

$$J_u = 233 \, 427.2499 + j0 \text{ A m}^{-2}$$

$$J_v = -116 \, 713.625 + j202 \, 153.9283 \text{ A m}^{-2}$$

$$J_w = -116 \, 713.625 - j202 \, 153.9283 \text{ A m}^{-2}$$

## 5.2 Preprocessing

V nastavení problému jsem si zvolila jako druh fyzikálního pole; pole magnetické, kartézský souřadný systém a harmonickou analýzu. Dále jsem si vytvořila model vedení pro stožáru typu dvojitého portálu se základní polohou potrubí v se středem v bodě  $[8.55; -1]$ .

Fázové vodiče jsou tvořeny kružnicemi o poloměru  $r = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$  se středy o souřadnicích [m]:

$$[2.6; 11], [11.9; 11], [17.1; 11], [-2.6; 11], [-11.9; 11], [-17.1; 11]$$

Model potrubí tvoří dvě soustředné kružnice se středem v bodě  $[8.55; -1]$  o poloměrech  $r_1 = 0.5 \text{ m}$  a  $r_2 = 0.48 \text{ m}$ . Střed kružnic jsem v průběhu modelování posouvala v metrových intervalech po ose  $x$  a  $y$ .



Pro definici materiálů jsem do modelu umístila značky oblastí a určila jejich materiálové vlastnosti.

Fázové vodiče:

$$J_u = 233\,427.2499 + j\,0 \text{ A m}^{-2}$$

$$J_v = -116\,713.625 + j\,202\,153.9283 \text{ A m}^{-2}$$

$$J_w = -116\,713.625 - j\,202\,153.9283 \text{ A m}^{-2}$$

$$\mu_r = 1$$

$$\gamma = 37.7 \cdot 10^6 \text{ S m}^{-1}$$

Země:

$$\mu_r = 1$$

$$\gamma = 0.01 \text{ S m}^{-1}$$

Vzduch:

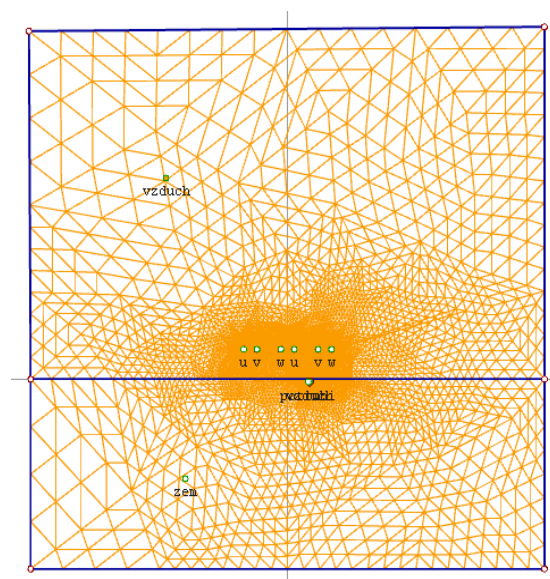
$$\mu_r = 1$$

Ocelové potrubí:

$$\mu_r = 8\,000$$

$$\gamma = 500\,000 \text{ S m}^{-1}$$

Okrajovou podmínku jsem určila pro vektorový magnetický potenciál  $A = 0$  na hranici obdélníkové oblasti o rozměrech 200 x 200 m.



Obr.5.2: Geometrický model s vygenerovanou sítí.

Poslední krok preprocessingu je diskretizace problému a následné automatické vygenerování sítě. Počet zjemnění sítě byl nastaven na hodnotu 2, kvůli zpřesnění výsledku.

### 5.3 Processing

Processing zahrnuje automatické řešení daného problému. Dále odvodím rovnici pro magnetické pole, ze které program při řešení vychází.

V tomto příkladě se jedná o fyzikální problém magnetického pole, a proto budu vycházet z I. Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru (1.1). Jelikož uvažované pole je kvazistacionární, můžu zanedbat posuvný proud (kapitola 1.3) a psát rovnici ve tvaru:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (5.3)$$

Dále využiji II. Maxwellovu rovnici v diferenciálním tvaru (1.2). Pro řešení problému budu uvažovat lineární prostředí, z čehož vyplývá, že v jednotlivých oblastech bude  $\mu = \text{konst.}$  a  $\gamma = \text{konst.}$  Průběh vyšetřovaného proudu je harmonický, proto lze přejít k symbolicko-komplexnímu zobrazení. Využitím materiálových vztahů a rovnice (5.4)

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (5.4)$$

pro vektorový magnetický potenciál, rozložení elektromagnetického pole mohu pak popsat parciální diferenciální rovnicí pro fázor magnetického vektorového potenciálu  $\mathbf{A}$  ve tvaru:

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot } \underline{\mathbf{A}}) + \mathbf{j}\omega \gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{\text{ext}} \quad (5.5)$$

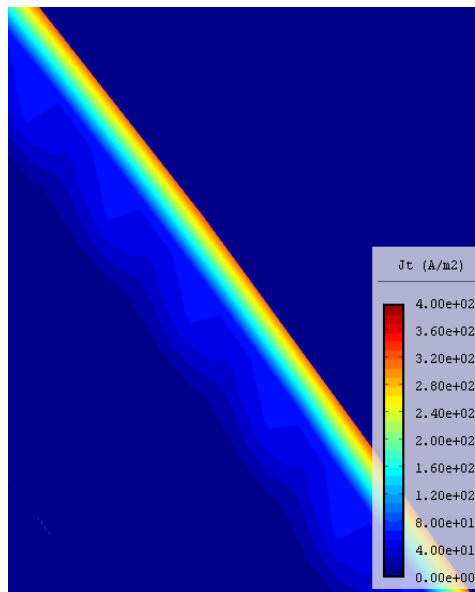
### 5.4 Postprocessing

Poslední část simulace problému zahrnuje vyšetření výsledků simulace. V této kapitole budu sledovat proudovou hustotu, magnetickou indukci a ztráty v ocelovém potrubí v závislosti na poloze potrubí nebo na transpozici vodičů vedení.

#### 5.4.1 Proudová hustota v ocelovém úložném zařízení

Nachází-li se ocelové potrubí v blízkosti magnetického pole, dochází k indukovaní proudu vlivem elektromagnetické vazby mezi vedením a liniovým zařízením. Na obr.5.4 je vidět

rozložení proudové hustoty v potrubí.

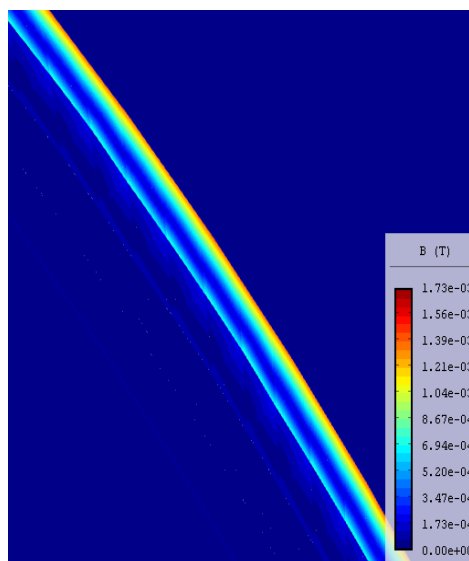


Obr.5.3: Rozložení proudové hustoty v ocelovém potrubí.

Z obrázku je vidět, že proudová hustota není rozložena v potrubí rovnoměrně, což je způsobeno elektrickým povrchovým jevem, skin efektem (kapitola 1.4.1).

#### 5.4.2 Magnetická indukce v ocelovém úložném zařízení

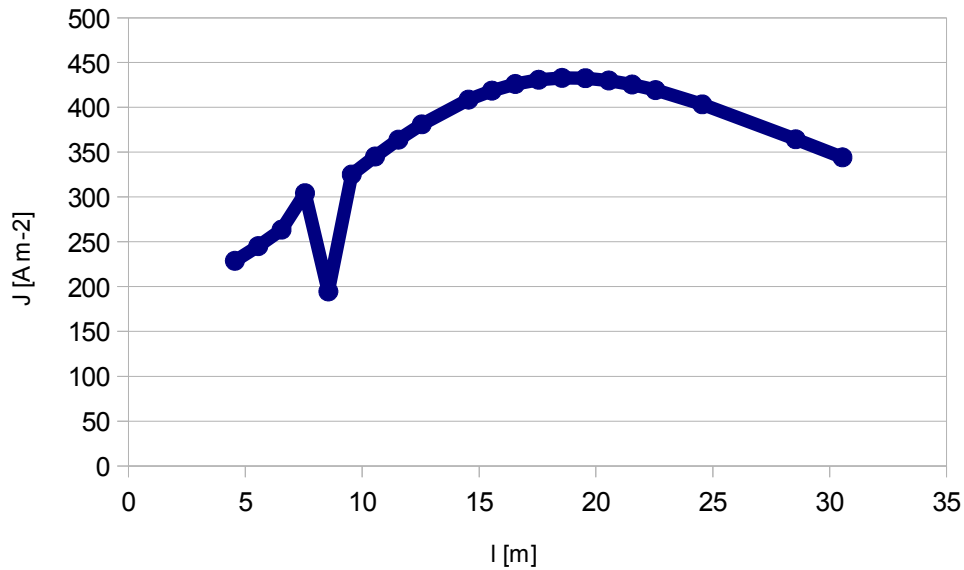
Stejně, jako jsme mohli pozorovat povrchový jev u proudové hustoty, se projevuje magnetický povrchový jev, magnetický skin efekt, u magnetické indukce. Jeho vlivem dochází k nerovnoměrnému rozložení magnetické indukce v ocelovém potrubí obr.5.4.



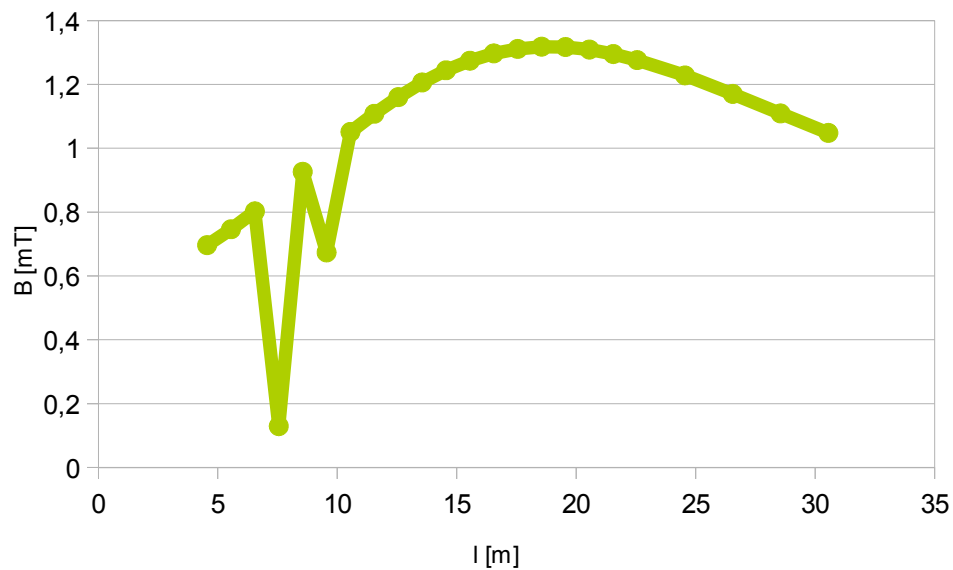
Obr.5.4: Rozložení magnetické indukce v ocelovém potrubí.

### 5.4.3 Sledovaná hodnoty v závislosti na poloze ocelového úložného zařízení

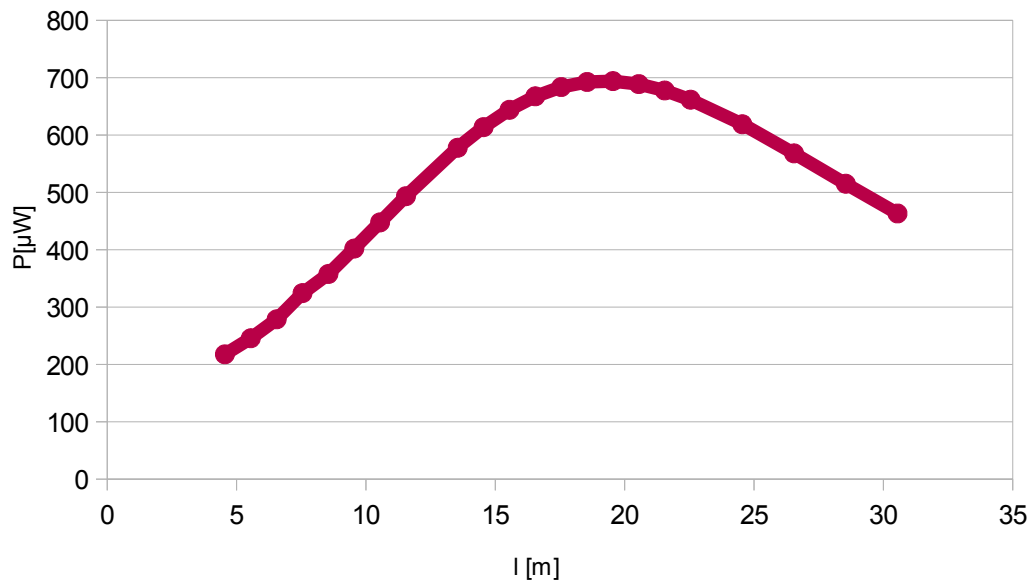
Na obr.5.4, obr.5.5, obr.5.6 jsou grafy závislosti proudové hustoty  $\mathbf{J}$ , magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a ztrát  $P$  v ocelovém potrubí na jeho vzdálenosti od osy stožáru. Simulace byla provedena pro konstantní hloubku potrubí  $h = -1$  m a pro hodnoty vzdáleností potrubí 4.55 m až 30.55 m od osy stožáru.



Obr.5.5: Graf závislosti proudové hustoty na vzdálenosti potrubí od osy stožáru

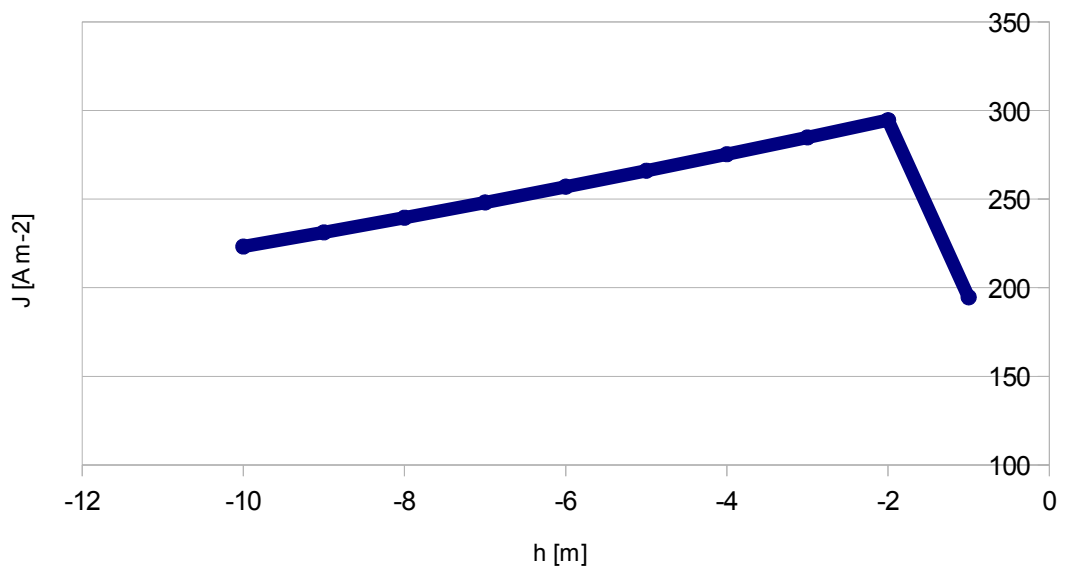


Obr.5.6: Graf závislosti magnetické indukce na vzdálenosti potrubí od osy stožáru

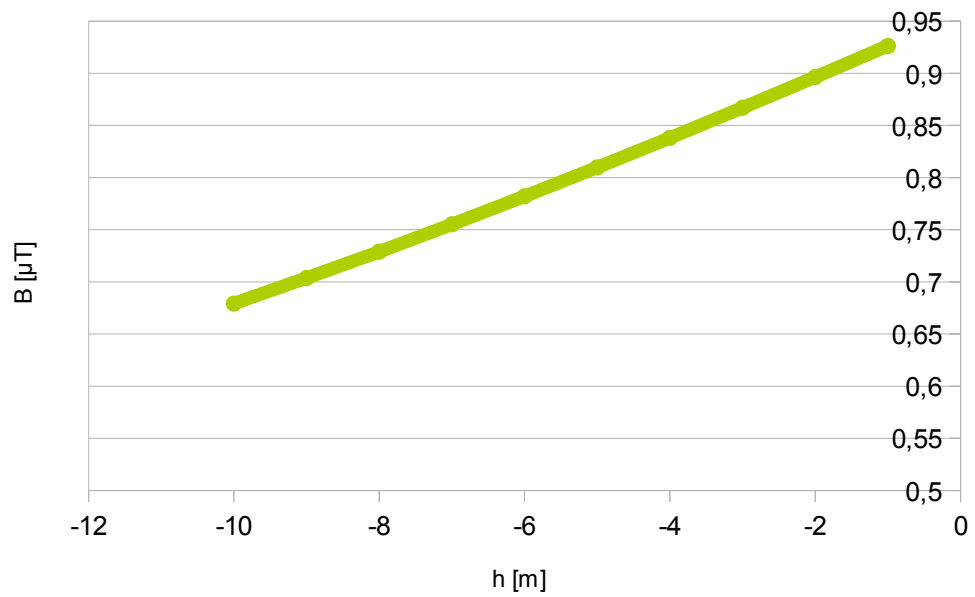


Obr.5.7: Graf závislosti ztrát na vzdálenosti potrubí od osy stožáru

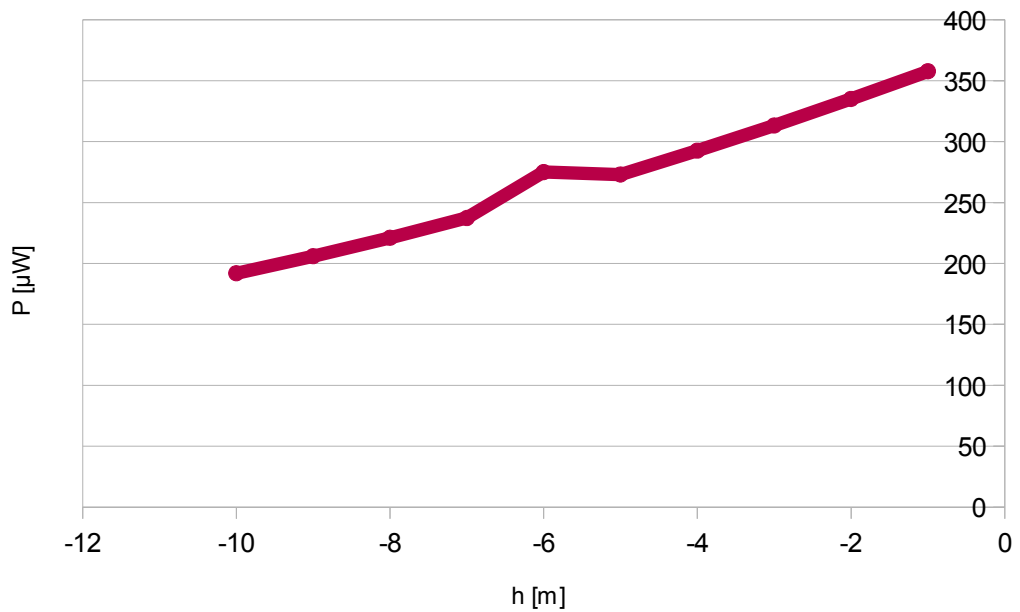
Grafy závislostí proudové hustoty  $\mathbf{J}$ , magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a ztrát  $P$  v ocelovém potrubí na hloubce uložení ocelového potrubí jsou uvedené na obr.5.8, obr.5.9 a obr.5.10. Simulace byla provedena pro konstantní vzdálenost potrubí od stožáru  $l = 8.55\text{m}$  a pro hodnoty hloubky uložení potrubí  $-1$  až  $-10$  m.



Obr.5.8: Graf závislosti proudové hustoty na hloubce uložení potrubí



Obr.5.9: Graf závislosti magnetické indukce na hloubce uložení potrubí


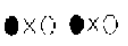
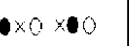





Obr.5.10: Graf závislosti ztrát na hloubce uložení potrubí

#### 5.4.4 Transpozice vodičů

Transpozice vodičů byla provedena pro potrubí se středem v bodě [8.55; -1]. Hodnoty proudové hustoty  $\mathbf{J}$ , magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a ztrát  $P$  v ocelovém potrubí jsou uvedeny v tabulce tab.5.1.

Tab.5.1 Hodnoty proudové hustoty, magnetické indukce a ztrát v ocelovém potrubí pro různé transpozice vodičů vedení

	Transpozice					
	1	2	3	4	5	3
						
$\mathbf{J}$ [ $\text{Am}^{-2}$ ]	277.6	204.5	283	203.3	280	260,2
$\mathbf{B}$ [mT]	1.515	1.116	1.263	1.111	1.532	1.423
$P$ [ $\mu\text{W}$ ]	184.2	107.2	163.2	105	176.7	153.3

#### 5.4.5 Možnosti potlačení vlivu elektromagnetických polí na úložná zařízení

Vlivem přítomnosti elektromagnetického pole dochází k indukovaní parazitních proudů do ocelových liniových zařízení, která se nachází v blízkosti elektrického vedení. Přítomnost parazitních proudů velkých hodnot způsobuje degradaci materiálu kovových potrubí. Podle tab.3.1 lze kovová liniová zařízení považovat za chráněná proti korozi, jestliže efektivní hodnota hustoty indukovaného střídavého proudu nepřesáhne  $30 \text{ Am}^{-2}$ . Z uvedených výsledků vyplývá, že hodnoty proudové hustoty v ocelovém potrubí, které je umístěno ve vyšetřované vzdálenosti od osy stožáru, nevyhovují ani pro jeden z daných stožárů. Z bezpečnostního i finančního hlediska je nutné minimalizovat proudovou hustotu v potrubí, a tím snížit pravděpodobnost koroze střídavým proudem.

Z výsledků práce vyplývá několik způsobů, jak lze proudovou hustotu v ocelových liniových zařízeních omezit. Proudová hustota se vzdáleností od osy stožáru a hloubkou uložení liniových zařízení klesá. Potrubí by tedy mělo být umístěno do co největší možné vzdálenosti od osy stožáru. Hloubka uložení potrubí je bohužel nepříznivě ovlivněna finanční stránkou výkopových prací. Dalším možným řešením je volba rozmístění fází vedení.

Vhodnou volbou transpozice vodičů lze proudovou hustotu v kovových liniových zařízeních, podle typu stožáru, minimalizovat přibližně o třetinu až o polovinu hodnoty.



## Závěr

Ve své bakalářské práci jsem se zabývala modelováním magnetického a elektrického pole v okolí venkovních trojfázových vedení a jejich vlivem na liniová úložná zařízení.

Práce je rozdělena do pěti tématických kapitol. První čtyři kapitoly se věnují teorii k danému tématu a poslední pátá kapitola se věnuje samotnému řešení problému.

První kapitola je věnována teorii elektromagnetického pole. Jsou zde uvedené základní vztahy popisující elektrické a magnetické pole. V této kapitole je také popsáno kvazistacionární elektromagnetické pole, které se vyskytuje u silnoproudých rozvodů energie. V závěru kapitoly je popsán povrchový jev.

Druhá kapitola popisuje problematiku elektromagnetické kompatibility. Z legislativních důvodů často dochází k využití jednoho koridoru pro více nadzemních elektrických vedení a úložných liniových zařízení a tak dochází k ovlivňování úložných zařízení elektromagnetickým polem. Z bezpečnostních i finančních důvodů je tedy třeba řešit elektromagnetickou kompatibilitu mezi vedením a úložným zařízením.

Ve třetí kapitole je řešena problematika parazitních proudů, které vznikají jako odezva na přítomnost elektromagnetického pole. Dále jsou uvedena ochranná opatření.

Ve čtvrté, poslední teoretické kapitole je popis programu Agros2D. Tento program jsem si pro simulaci vybrala pro jeho snadné ovládání a pro jeho dostupnost.

Poslední kapitola se věnuje řešení ilustrativního příkladu. Jsou zde uvedeny výsledky numerického řešení elektrického a magnetického pole venkovních vedení a jeho vliv na ocelová liniová zařízení. V průběhu simulace jsem sledovala proudovou hustotu, magnetickou indukci a ztráty v ocelovém potrubí v závislosti na jeho vzdálenosti od osy stožáru, hloubce uložení nebo na transpozici vodičů vedení.

Pro simulaci vlivu elektrického a magnetického pole na úložná zařízení jsem si vybrala stožár typu Dvojitý portál, jehož řešení je uvedeno v kapitole pět. Výsledky pro stožár typu Donau uvádím v příloze. Stejný algoritmus, kterým byl problém řešen pro tyto dva stožáry, lze využít pro jakýkoliv jiný druh stožáru a jiné kovové potrubí vedoucí souběžně s nadzemním vedením. Uvedené příklady jsem řešila pro napěťovou hladinu 400 kV. Z rozložení proudové hustoty v potrubí je patrný elektrický skinefekt, který je způsoben indukovaným střídavým proudem. Stejně tak dochází k nerovnoměrnému rozložení magnetické indukce. Příčinou magnetického skinefektu je časově proměnný magnetický tok.

Dále byla zjišťována závislost sledovaných veličin na vzdálenosti ocelového potrubí od osy

stožáru. Z hlediska pravděpodobnosti koroze jsou všechny hodnoty proudové hustoty v potrubí získané simulací klasifikovány jako vysoká pravděpodobnost koroze. Je tedy nutné provést ochranné opatření užitím pasivní nebo aktivní ochrany. V závěru práce bylo magnetické pole vyšetřováno pro různé transpozice vodičů vedení. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v grafech a tabulkách v textu práce a v příloze. Z hlediska pravděpodobnosti koroze jsou všechny hodnoty proudové hustoty v potrubí získané simulací klasifikovány jako vysoká pravděpodobnost koroze. Je tedy nutné provést ochranné opatření užitím pasivní nebo aktivní ochrany.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1.1] BENEŠOVÁ, Zdeňka a MAYER, Daniel. *Základní příklady z teorie magnetického pole*. 1.vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. 167s.
- [1.2] HUDEC, Jaroslav. *Přepětí a elektromagnetická kompatibilita*. 1.vydání. Hradec Králové: HAKEL, 1996. 229s. ISBN 80-902201-0-X.
- [1.3] KONIG, Holger a ERLACHER, Peter. *Neviditelná hrozba?: elektromagnetická pole kolem nás*. 1. čes. vyd. Ostrava: HEL, 2001. 120 s. ISBN 80-86167-15-1.
- [1.4] MAYER, Daniel a BENEŠOVÁ, Zdeňka. *Teorie elektromagnetického pole*. 3.vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. 355s. ISBN 80-7082-826-9.
- [1.5] MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole*. 1.vydání. Praha: BEN, 1998. 159s. ISBN 80-86056-43-0 .
- [1.6] NOVOTNÝ, Karel. *Teorie elektromagnetického pole I*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 187 s. ISBN 80-01-03226-4.
- [1.7] PANKRÁČ, Vítězslav, HAZDRA, Pavel, NOVOTNÝ, Karel, *Teorie elektromagnetického pole*, vydání. 1. Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03320-1.
- [1.8] SEDLÁK, Bedřich a ŠTOLL, Ivan. *Elektrina a magnetismus*. 2.vydání. Praha: Akademie věd České republiky, 2002. 632s. ISBN 80-200-1004-1.
- [1.9] VACULÍKOVÁ, Polina, VACULÍK, Emil a kolektiv. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*. 1.vydání. Praha: Grada Publishing, 1998. 504s. ISBN 80-7169-568-8.

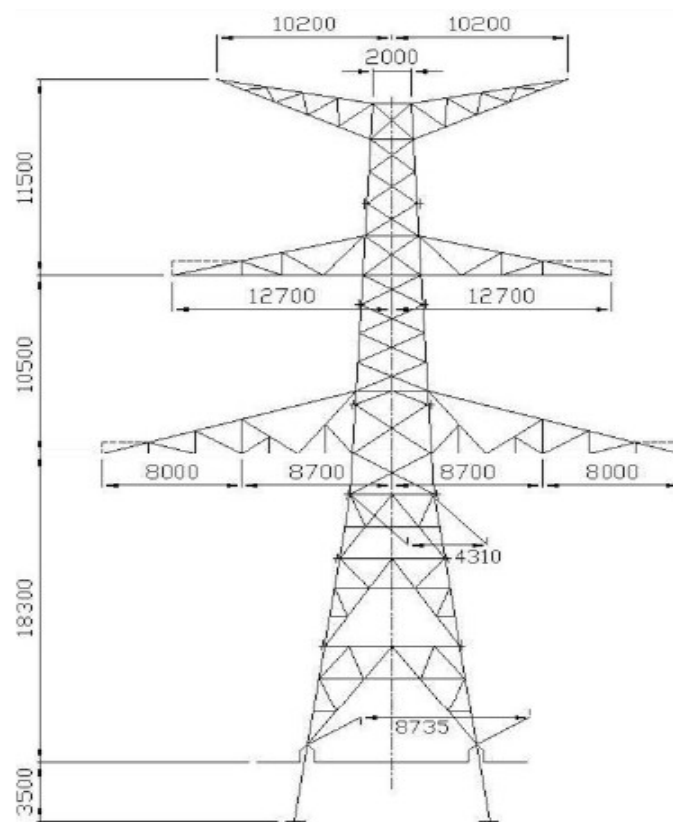
- [2.1] CABANOVA, Zuzana. *Biologické účinky magnetického pole* [online].  
[cit. 2013-06-04]. Dostupné z:  
<http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/83673/AEEE-2004-3-4-24-cabanova.pdf?sequence=1>
- [2.3] KOŠŤÁL, Josef. *EMF a lidské zdraví*. In: [online]. [cit. 2013-6-4]. Dostupné z:  
[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26149](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26149)
- [2.4] KOUDELKA, Ctirad. *Bludné proudy*. [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z:  
[http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/TZB/bludne\\_proudy.pdf](http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/TZB/bludne_proudy.pdf)
- [2.5] LANÍČEK, Ivo, Jan MATOUŠ a Karel ČERNOVSKÝ. *Ochrana úložných zařízení před negativními účinky bludných proudů*. [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z:  
<http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/306.pdf>
- [2.6] NAZARČÍK, Tomáš. *Vyšetření elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: *Vyšetření elektrického a magnetického pole v okolí venkovních vedení. Bakalářská práce. Vedoucí práce Zdeňka Benešová.*
- [2.7] NOVÁK, Pavel a Jaroslav BYSTRIANSKÝ. *Protikorozní ochrana kovů*. In: [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z:  
[http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze\\_materialu\\_pro\\_restauratory/kadm/pdf/1\\_4.pdf](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/1_4.pdf)
- [2.8] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita*. In: [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: [http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC\\_skripta.pdf](http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/EMC/EMC_skripta.pdf)
- [2.9] SVAČINA: Jiří. In: *Základy elektromagnetické kompatibility (EMC): Část 4: Způsoby a metody měření rušivých signálů* [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z:  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01021/index.html>

- [2.10] ŠROUBOVÁ, Lenka. Vliv *externího elektromagnetického pole na vybraná úložná zařízení a možnosti jeho potlačení* [online]. Plzeň, 2010 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/stag?urlid=prohlizeni-prace-detail&praceIdno=36914>. Disertační práce. Vedoucí práce Zdeňka Benešová.
- [2.11] *Protikorozní ochrana* [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://people.tuke.sk/augustin.varga/Texty/Protikorozna%20ochrana.pdf>
- [3.1] ČSN P CEN/TS 15280 (03 8369)  
Hodnocení pravděpodobnosti koroze střídavými proudy u potrubí uložených  
půdě - Aplikace na katodicky chráněná potrubí

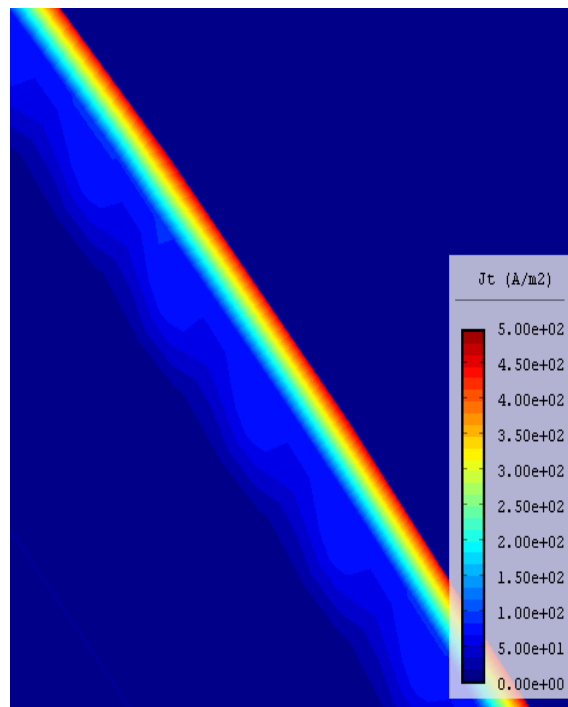
## Příloha A

Pro další ukázkou řešení jsem si vybrala stožár typu Donau o napěťové hladině 400 kV. Simulaci problému jsem provedla stejně jako pro stožár typu dvojitý portál s tím rozdílem, že kružnice tvořící fázové vodiče měly souřadnice:

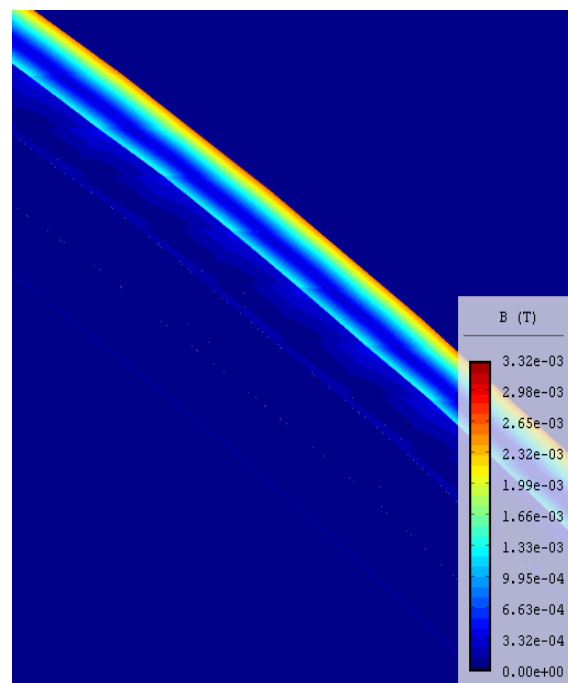
[12.7;23.8], [16.7;13.3], [8.7;13.3], [-12.7;23.8], [-16.7;13.3], [-8.7;13.3]



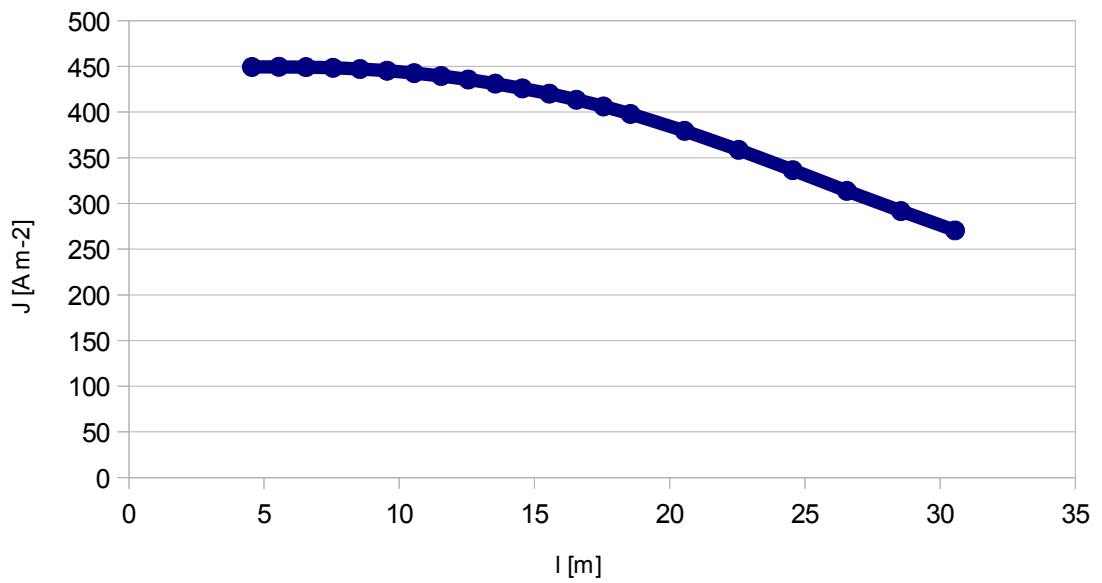
Obr.A.2: Stožár typu Donau. Převzato[Nazarčík]



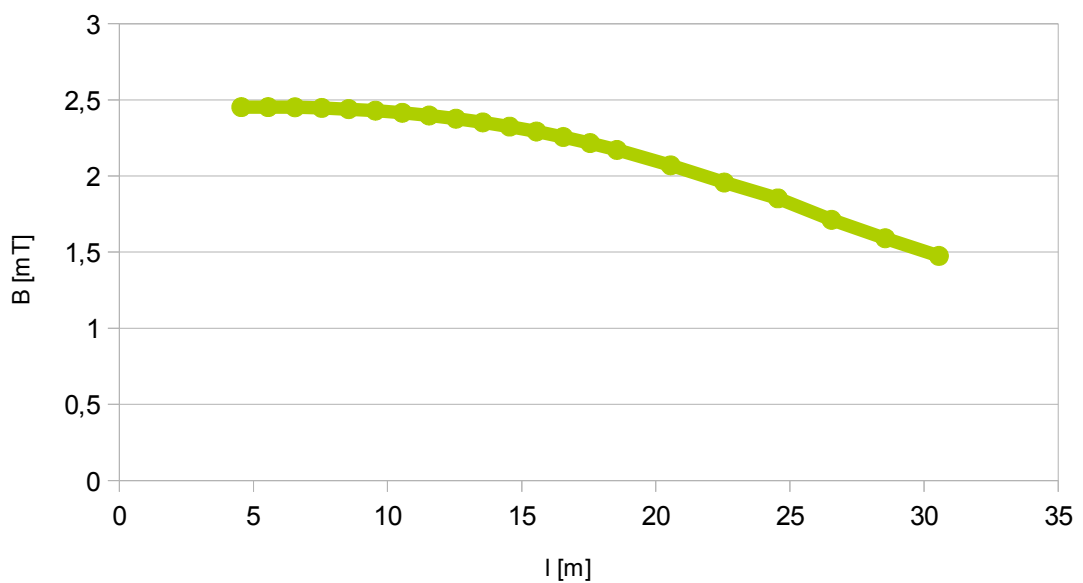
Obr.A.2: Rozložení proudové hustoty v ocelovém potrubí



Obr.A.3: Rozložení magnetické v ocelovém potrubí

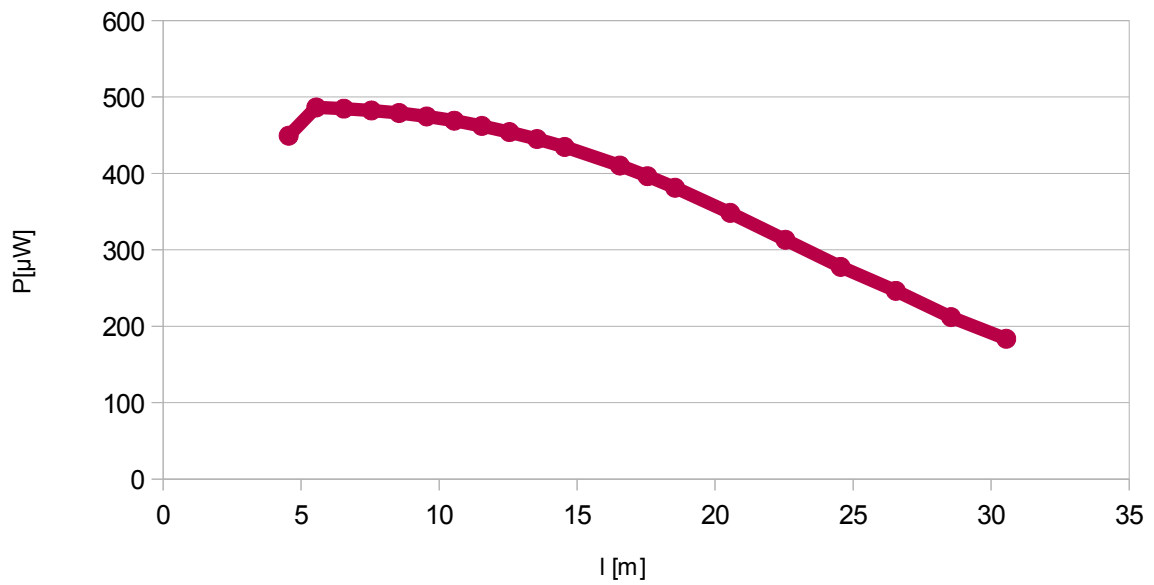


Obr.A.4: Graf závislosti proudové hustoty na vzdálenosti potrubí od osy stožáru

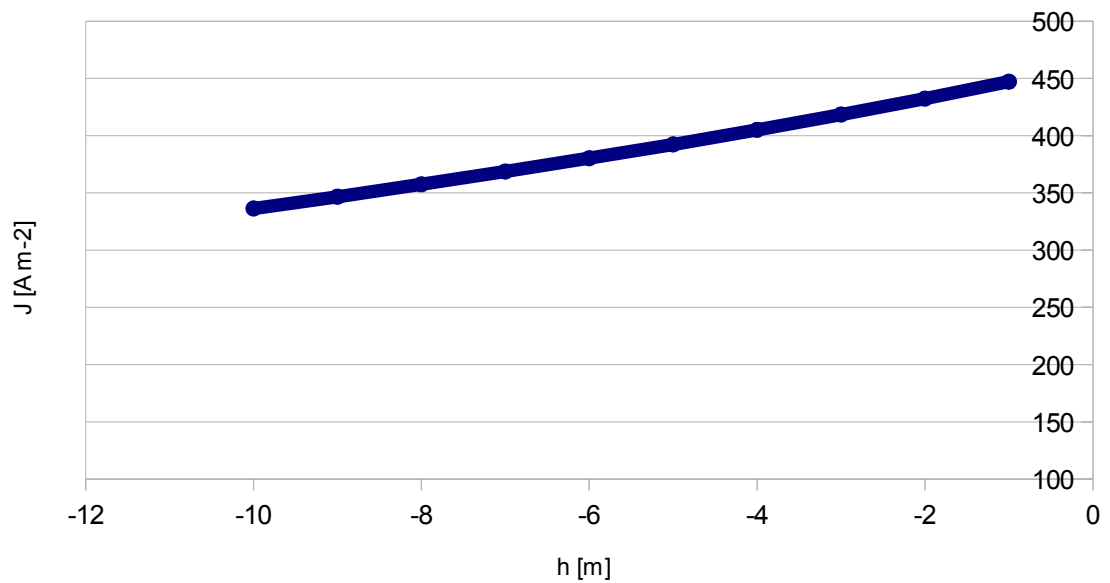


Obr.A.5: Graf závislosti ztrát na vzdálenosti potrubí od osy stožáru

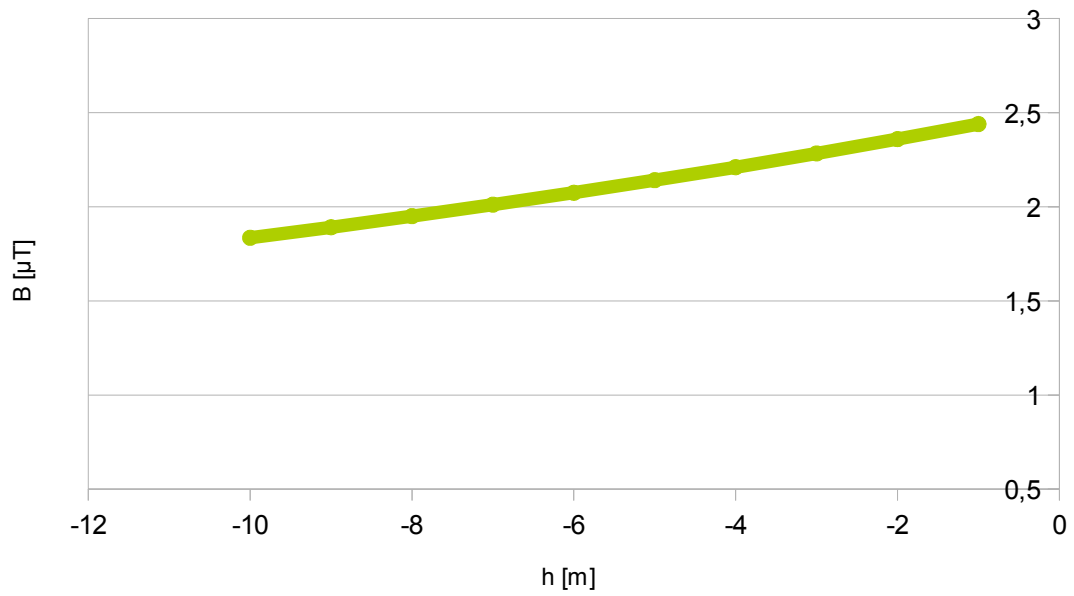




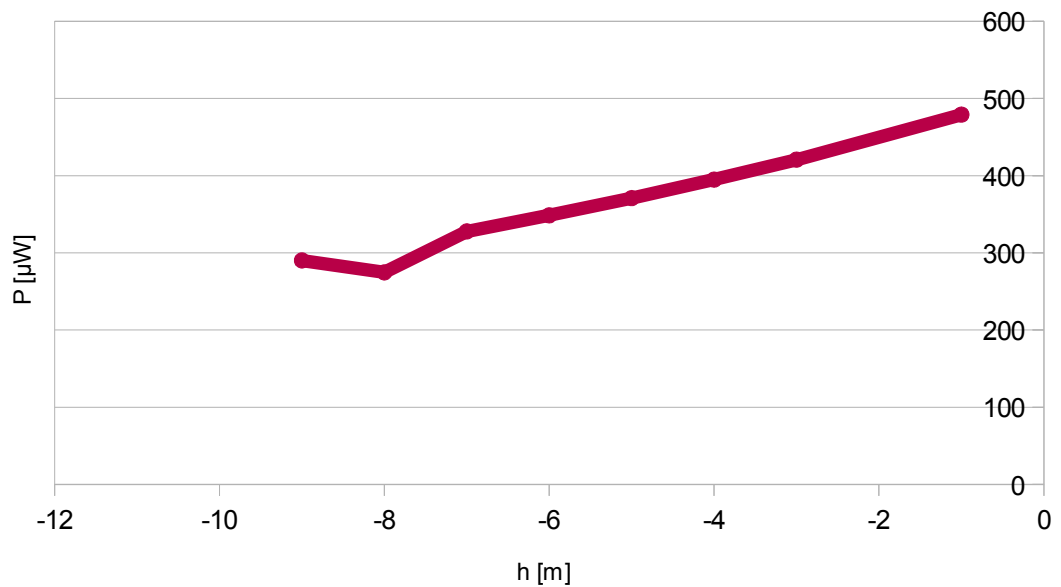
Obr.A.6: Graf závislosti magnetické indukce na vzdálenosti potrubí od osy stožáru



Obr.A.7: Graf závislosti proudové hustoty na hloubce uložení potrubí



Obr.A.8: Graf závislosti magnetické indukce na hloubce uložení potrubí



Obr.A.9: Graf závislosti ztrát na hloubce uložení potrubí

Transpozice						
	1	2	3	4	5	3
	●×○ ×○●	●×○ ●×○	●×○ ×○●	●×○ ○×●	●×○ ●○×	●×○ ○●×
<b>J</b> [Am <sup>-2</sup> ]	151.7	447.2	214.8	452.7	228.8	287.1
<b>B</b> [mT]	0.8277	2.439	1,172	2.469	1.248	1,827
<b>P</b> [μW]	36.01	479.1	119	429.9	123.5	193.5

Tab.A.1 Hodnoty proudové hustoty, magnetické indukce a ztrát v ocelovém potrubí pro různé transpozice vodičů vedení