

**Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická
Katedra technologií a měření**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv jednofázového zkratu na vedení na zařízení uložená v zemi

Plzeň 2014

Bc. Martin Šíp

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin ŠÍP**
Osobní číslo: **E12N0039P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Vliv jednofázového zkratu na vedení na zařízení uložená v zemi**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

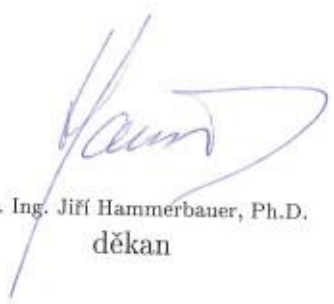
1. Prostudujte teorii k danému tématu a uveďte stav řešené problematiky.
2. Sestavte matematický model problému a vytvořte algoritmus pro řešení rozložení elektromagnetického pole.
3. Vyšetřete elektrické a magnetické pole v okolí venkovního vedení s jednofázovým zkratem.
4. Realizujte numerický model na počítači. Při řešení respektujte rozložení zpětného zkratového proudu mezi zemnicí lano a zemní cestu.
5. Řešte vliv elektrického a magnetického pole na zařízení uložená v zemi.

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

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

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

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


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

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 vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne 10. května 2014

.....
Bc. Martin Šíp

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí práce Ing. Lence Šroubové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Anotace

Předpokládaná práce je zaměřena na vliv jednofázové zkratu vedení na zařízení uložená v zemi. Hlavním úkolem je vyřešení vlivu elektromagnetického pole v okolí venkovních vedení s jednofázovým zkratem na zařízení uložená v zemi. Při řešení numerického modelu na počítači respektujeme rozložení zpětného zkratového proudu mezi zemnicím lanem a zemní cestou.

Klíčová slova

jednofázový zkrat, elektromagnetické pole, Agros2D, ochrana potrubí, přenosové soustavy

Abstract

This diploma thesis is focused on the influence of the single-phase short circuit on the buried systems. The main task of the thesis is to solve the influence of the electromagnetic field in the vicinity of overhead lines with the single-phase short circuit on the buried systems. We respect the reverse circuit current distribution between the earth cable and the earth way when we solve a numeric model on a computer.

Key words

single-phase short circuit, electromagnetic field, Agros2D, protection of pipelines, transmission system.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ZKRAT NA VEDENÍ	11
1.1 PORUCHA JEDNOFÁZOVÉHO ZKRATU	11
2 VELIČINY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	13
2.1 ZÁKLADNÍ MATERIÁLOVÉ VZTAHY	13
2.1.1 Permittivita – ϵ	13
2.1.2 Permeabilita – μ	13
2.1.3 Konduktivita – γ	13
3 MAXWELLOVY ROVNICE	14
3.1 MAXWELLOVY ROVNICE V INTEGRÁLNÍM TVARU	14
3.2 MAXWELLOVY ROVNICE V DIFERENCIÁLNÍM TVARU	15
4 MATEMATICKÝ MODEL	16
5 AGROS2D	17
5.1 ZÁKLADNÍ ČÁSTI	17
5.1.1 Preprocessor.....	17
5.1.2 Processor.....	17
5.1.3 Post-processor a Editor script	18
5.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ - FEM.....	19
5.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY	20
6 OCHRANA POTRUBÍ	22
6.1 ANODOVÁ A KATODOVÁ OCHRANA	22
6.1.1 Anodová ochrana.....	22
6.1.2 Katodová ochrana.....	24
6.1.3 Porovnání ochran	25
6.2 ZAŘÍZENÍ ULOŽENÁ V ZEMI.....	26
7 STOŽÁRY	27
7.1 STOŽÁR „SOUDEK“	27
7.2 STOŽÁR „KOČKA“	28
8 MODEL „SOUDEK“	29
8.1 MODEL V AGROSU2D.....	29
8.1.1 Preprocessor.....	29
8.1.2 Výpočetní řešení.....	30
8.1.3 Počáteční síť	30
8.1.4 Post-processor	30
8.2 ANALÝZA MODELU „SOUDEK“	32
8.2.1 Vliv hloubky na proudové hustotě.....	32
8.2.2 Vliv proudové hustoty na náplň potrubí.....	34
8.2.3 Vliv vodivosti půdy.....	35

8.2.4	Vliv zpětného proudu	36
8.2.5	Vliv elektrické vodivosti potrubí.....	38
8.2.6	Vliv rozložení půdních horizontů	40
8.2.7	Potrubí vedené nad zemí	40
8.3	VÝPOČET POVRCHOVÉHO JEVU V OCELI	42
8.4	MODEL V AGROSU2D.....	43
8.4.1	Preprocessor	43
8.4.2	Počáteční síť	43
8.5	ANALÝZA MODELU „KOČKA“	44
8.5.1	Vliv hloubky na proudovou hustotu.....	44
8.5.2	Vliv proudové hustoty na náplň potrubí.....	46
8.5.3	Vliv vodivosti půdy na potrubí	47
8.5.4	Vliv zpětného proudu	47
8.5.5	Vliv elektrické vodivosti potrubí.....	49
8.5.6	Vliv rozložení půdních horizontů	50
8.5.7	Potrubí vedené nad zemí	51
9	ZÁVĚR	53
	SEZNAM LITERATURY	54
10	SEZNAM PŘÍLOH.....	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na vliv jednofázového zkratu vedení na zařízení uložená v zemi. Práce řeší vliv jednofázového zkratu na stožáru, který je řazen mezi nejčastější poruchy. V dnešní době je důležitý bezporuchový přenos elektrické energie, která se stává stále důležitější a nezbytnější pro obyvatele naší planety. Zařízení uložená v zemi jsou jednofázovým zkratem na vedení ovlivněna jak rozložením zpětného zkratového proudu zemnicím lanem tak zemnicí cestou. Zařízeními se pro nás stávají přenosové soustavy vodovodního či plynového potrubí, které jsou při poruše ovlivňovány elektromagnetickým polem.

První část práce se zaměřuje na popsání jednofázového zkratu elektromagnetického pole a s ním souvisejícími materiálovými konstantami a Maxwellovými rovnicemi. V další části je představen program Agros2D, ve kterém je realizován numerický model rozložení elektromagnetického pole. Dále je ukázáno možné uložení potrubí a jeho ochrany. V závěru první části jsou popsány dvě varianty stožáru, z nichž první patří do skupiny stožárů velmi vysokého napětí a druhý do skupiny napětí zvláště vysokého.

Druhá část práce řeší rozložení elektromagnetického pole kolem potrubí pro vybrané stožáry, ve které je respektováno rozložení zpětného zkratového proudu.

Seznam symbolů a zkratk

B [T]	.....	Magnetická indukce
D [C/m ²]	.....	Elektrická indukce
H [A/m]	.....	Intenzita magnetického pole
E [V/m]	.....	Intenzita elektrického pole
Q [C]	.....	Elektrický náboj
A [Wb/m]	.....	Vektorový magnetický potenciál
J [A/m ²]	.....	Hustota elektrického proudu
I_{k1}'' [A]	.....	Jednofázový zkratový proud
c [-]	.....	Napěťový součinitel
U_n [V]	.....	Napětí na vedení
Z [Ω]	.....	Impedance
R [Ω]	.....	Elektrický odpor
μ [H/m]	.....	Permeabilita
μ_r [-]	.....	Relativní permeabilita
μ_0 [H/m]	.....	Permeabilita vakua
ε [F/m]	.....	Permitivita
ε_0 [F/m]	.....	Permitivita vakua
ε_r [F/m]	.....	Relativní permitivita
γ [S/m]	.....	Měrná elektrická vodivost
v [m/s]	.....	Rychlost
Φ [Wb]	.....	Magnetický indukční tok
Ψ [C]	.....	Elektrický indukční tok
FEM	.....	Finite Element Method
A	.....	Lineární symetrický diferenciální operátor
u	.....	Hledaná funkce
Ω	.....	Oblast hranice Γ
Γ	.....	Hranice oblasti Ω

1 Zkrat na vedení

Zkrat je náhodné či úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi, při kterém platí, že elektrický potenciál je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule. Při poruše vznikají zkratové proudy, které v blízkosti místa zkratu mívají několikanásobnou hodnotu proudu oproti běžným provozním hodnotám proudu. Při zkratu však dochází k poklesu napětí v síti [5,6].

Hlavní příčiny zkratu:

- Porucha izolace způsobená přepětím
- Úder blesku
- Zestárnutí izolačních materiálů
- Mechanické poškození

Existuje více druhů zkratů:

- a) Souměrné
- b) Nesouměrné

Souměrný zkrat:

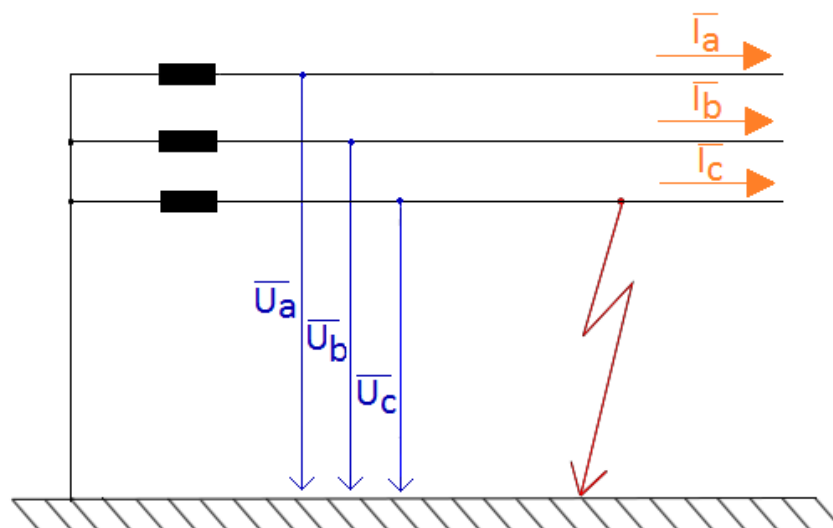
- Trojfázový zkrat – postiženy jsou všechny 3 fáze

Nesouměrný zkrat:

- Jednofázový zkrat
- Dvoufázový zkrat – spojení dvou fází
- Dvoufázový zemní zkrat - spojení dvou fází se zemí

1.1 Porucha jednofázového zkratu

Pokud předpokládáme na obr. 3 jednoduchou symetrickou 3f soustavu, obvod zahrnuje impedanci generátoru a impedanci vnější části obvodu [5].



Obr. 1 Jednofázový zkrat

Jednofázový zkrat může nastat pouze v sítích pracujících s uzlem přímo uzemněným nebo uzemněným přes malou impedanci. Do těchto spojení je nemožné zahrnovat zkrat se zemním spojením, jelikož při obou zkratech dochází ke spojení jedné fáze se zemí. K zemnímu spojení dochází pouze tehdy, jedná-li o soustavy s neúčinně uzemněným a izolovaným uzlem či soustavy s uzlem uzemněným přes rezonanční tlumivku [5,6].

Výpočet jednofázového zkratu I_{k1}'' :

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2 Z_{(1)} + Z_{(0)}|} \quad (1.1)$$

kde je

- Z_1 – sousledná impedance,
- Z_0 – netočivá zkratová impedance
- c - napěťový součinitel
- U_n – napětí na vedení

Pro případ venkovního vedení je zpětná impedance $Z_{(2)}$ rovna impedanci sousledné $Z_{(1)}$.

$$Z_{(2)} = Z_{(1)} \quad (1.2)$$

Netočivá zkratová impedance $Z_{(0)}$ je vypočítána jako:

$$Z_{(0)} = \frac{U_{(0)}}{I_{(0)}} \quad (1.3)$$

Je určena ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením, například zemí. Napěťový součinitel c nabývá hodnoty 1,05 při výpočtu zkratového proudu [6].

2 Veličiny elektromagnetického pole

Tato část popisuje veličiny a jejich jednotky v soustavě SI, které jsou používány v modelu elektromagnetického pole. Pro lepší přehlednost zde budou vyjmenovány základní materiálové konstanty [7,8].

2.1 Základní materiálové vztahy

Základní materiálové vztahy jedná se o:

- $D = \varepsilon E$
- $J = \gamma E$
- $B = \mu H$

2.1.1 Permitivita – ε

Permitivita charakterizuje dielektrika (izolanty) a je dáno následujícím vztahem:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \text{ [F/m]} \quad (2.1)$$

Relativní permitivita se rozděluje podle nabývaných hodnot:

- $\varepsilon_r = 1$ hodnota pro vakuum
- $\varepsilon_r > 1$ pro všechny látky
- $\varepsilon_r \cong 1$ pro vzduch

2.1.2 Permeabilita – μ

Permeabilita charakterizuje magnetika a je dána vztahem:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \text{ [H/m]} \quad (2.2)$$

Dle nabytých hodnot je relativní permeabilita rozdělena do následujících skupin:

- $\mu_r \cong 1$ pro diamagnetické a paramagnetické látky
- $\mu_r \gg 1$ pro feromagnetické látky (nelineární prostředí)

2.1.3 Konduktivita – γ

Konduktivita, která charakterizuje vodič, je také známa pod názvem „měrná elektrická vodivost“. Je obrácenou hodnotou rezistivity:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \text{ [\Omega/m]} \quad (2.3)$$

3 Maxwellovy rovnice

V této části jsou popsány Maxwellovy rovnice jak v integrálním tak v diferenciálním tvaru.

3.1 Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru

- I. Maxwellova rovnice – jedná se v ní o zákon celkového proudu, tzv. Ampérův zákon -

$$\oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt} \quad (3.1)$$

kde je dále

$$\Psi = \int_S \mathbf{D} d\mathbf{S} \quad (3.2)$$

Vektor \mathbf{H} se pohybuje po uzavřené křivce c a je roven celkovému vodivému proudu I a posuvnému proudu $\frac{d\Psi}{dt}$, které jsou spojeny s křivkou c . Pod znaménkem I se rozumí celkový součet elektrických proudů, které procházejí plochou S , přičemž znaménka proudů jsou závislá na orientaci proudů vůči normále plochy S .

Levá strana rovnice $\oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l}$ se označuje jako oběhové magnetické napětí, které je spojené s křivkou c . V této Maxwellově rovnici se považuje permeabilitou za materiálovou konstantou [7].

- II. Maxwellova rovnice zabývá se Faradayovým indukčním zákonem -

$$\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.3)$$

kde je dále

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} \quad (3.4)$$

Vektor \mathbf{E} se pohybuje po uzavřené křivce c a rovná se záporné derivaci magnetického indukčního toku $-\frac{d\Phi}{dt}$, který je spojený znovu s plochou c . Plocha S je orientována pravotočivě s křivkou c . Oběhové elektrické napětí se zjišťuje z levé strany rovnice $\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l}$, která se spojuje s křivkou c [7].

- III. Maxwellova rovnice – zvaná též jako Gaussova věta -

$$\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q \quad (3.5)$$

kde je dále

$$Q = \int_V \rho dV \quad (3.6)$$

Jedná se o elektrický indukční tok na uzavřené ploše S , který se rovná celkovému náboji

v oblasti V a jenž je ohraničen plochou S . V třetí Maxwellově rovnici je určeno zřídlové pole. Pokud z kladně nabitého tělesa vychází indukční čáry a přecházejí do záporně nabitého tělesa, jsou tyto elektrické indukční čáry neuzavřené [7].

IV. Maxwellova rovnice – jedná v ní o spojitost magnetického indukčního toku -

$$\oint_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} = 0 \quad (3.7)$$

Tato rovnice vyjadřuje magnetický indukční tok přes uzavřenou plochu S , který je roven nule. Pokud jsou magnetické indukční čáry uzavřené, jedná se o magnetické pole nezřídlové, protože zde není žádný magnetický náboj [7].

3.2 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru

I. Maxwellova rovnice

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.8)$$

Z rovnice je dáno, že rotace intenzity magnetického pole je rovna hustotě vodivého proudu \mathbf{J} a hustotě posuvného (Maxwellova) proudu $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$. Magnetické pole je považováno za obecně vírové [7].

II. Maxwellova rovnice

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.9)$$

Druhá Maxwellova rovnice ukazuje rotaci intenzity elektrického pole, která je rovna záporné derivaci magnetické indukce \mathbf{B} . Magnetické pole se stává obecně nevírové [7].

III. Maxwellova rovnice

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (3.10)$$

Divergence elektrické indukce \mathbf{D} je rovna objemové hustotě volného náboje ρ . Elektrické pole volných nábojů je zřídlové [7].

IV. Maxwellova rovnice

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3.11)$$

Divergence magnetické indukce \mathbf{B} se rovná 0. Magnetické pole je nezřídlové [7].

4 Matematický model

Frekvence 50 Hz, která odpovídající pomalým časovým změnám, je přiřazena matematickému modelu. Ten je modelován v Agrosu2D v kartézském souřadnicovém systému předpokládající lineární prostředí. Předpokladem pro vytvoření tohoto matematického modelu je dále harmonický průběh proudu [2].

V programu Agros2D jsou využívány materiálové konstanty. Permeabilita a konduktivita jsou konstantní vzhledem k lineárnímu prostředí. Prioritní je vztah pro výpočet vektorového magnetického potenciálu:

$$\underline{B} = \text{rot } \underline{A} \quad (4.1)$$

Dále je použita parciální diferenciální rovnice pro popsání rozložení elektromagnetického pole z důvodu popsání fázoru magnetického vektorového potenciálu \underline{A} :

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot} \underline{A}) + j\omega\gamma \underline{A} = \underline{J}_{ext} \quad (4.2)$$

Jelikož měrná elektrická vodivost γ v našem modelu odpovídá σ , bude výsledná rovnice, která je řešena v Agrosu2D, vypadat takto:

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} (\text{rot} \underline{A} - \underline{B}_r) \right) - \sigma v \times \text{rot} \underline{A} + j\omega\sigma \underline{A} = \underline{J}_{ext} \quad (4.3)$$

Při řešení výpočtu jsou některé body z rovnice nulové. Pro řešení je však důležité vypočtení magnetického vektorového potenciálu \underline{A} [2].

V Agrosu2D je vytvořen matematický model, který je stejný jako v ostatních programech zabývajících se elektromagnetickým polem.

5 Agros2D

Agros2D je multiplatformní aplikace určená k řešení fyzikálních polí. Aplikace je napsaná v jazyce C++ a slouží k simulaci fyzikálních polí, jako jsou například elektrostatika, elektrické proudové pole, magnetické pole, teplotní pole, mechanika a akustika v kartézském či osově symetrickém uspořádání. Aplikace dále umožňuje využití analýzy ustáleného stavu, harmonickou analýzu a analýzu přechodového děje [1].

5.1 Základní části

Rozdělení na základní části aplikace:

- a. Preprocessor
- b. Processor
- c. Post-processor
- d. Editor skriptů

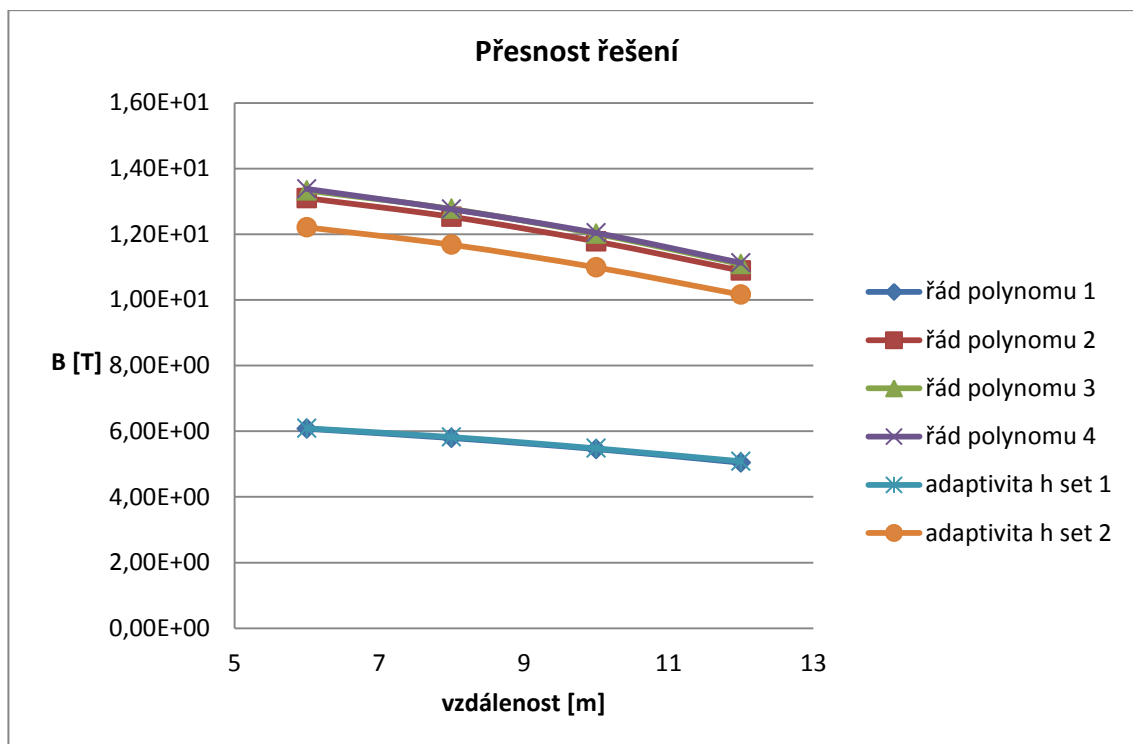
5.1.1 Preprocessor

Nejdříve se pomocí preprocessoru vytvoří geometrii dané oblasti k níž jsou dále nadefinovány materiálové konstanty a okrajové podmínky. Pro základní formáty CAD systémů zde existuje možnost importu/exportu geometrie modelu [1].

5.1.2 Processor

Processor diskretizuje geometrii daného problému, tudíž slouží k výpočtu hledané veličiny ve význačných bodech sítě. Processor sestaví matici tuhosti a vektoru zatížení. K řešení parciálních diferenciálních rovnic se využívá knihovna Hermes 2D v níž je použita adaptivní metoda konečných prvků vyššího řádu přesnosti s tzv. automatickou prostorovou adaptivitou, která může být typu h , p a kombinací hp [3].

Z obr. 2 je patrné, že pro přesnost řešení je důležité správně nastavit řád polynomu a zjemnění počítané sítě. Nastavení řádu polynomu se pohybuje od 2 do 4. Pro nastavení h prostorové adaptivity je přednastaven druhý řád polynomu. Úroveň zjemnění sítě se pohybuje okolo hodnoty 1. Zbylá řešení, která byla testována, nejsou vyhovující pro výpočet elektromagnetického pole, protože dochází k velkým odchýlkám od řešení výpočtu.



Obr. 2 Přesnost řešení Agros2D

Bohužel v programu Agros2D nešlo použít p prostorovou adaptivitu a kombinaci h_p , která vychází z předešlých dvou adaptivit.

Při řešení numerického modelu na počítači bylo zajímavé sledovat využití jeho fyzické paměti počítače, jelikož při vyšším řádu polynomu byla hodnota fyzické paměti počítače na hodnotě 800 MB. Při dalším zvětšení nároků na výpočet v programu počítač většinou zamrzl z důvodu selhání lineárního řešiče.

5.1.3 Post-processor a Editor script

Post-processor nám poskytuje analýzu a vizualizaci vypočtených hodnot procesoru. Vypočtené hodnoty lze dále zpracovat pomocí barevných map a vektorů, které se upravují jako povrchové či objemové integrální veličiny charakterizující dané pole. Editor skriptů znamená přidání skriptovacího jazyka Python. Prostřednictvím jazykem Python Agros2D získává rychlé a kvalitní nástroje díky kterým je možno provádět pomocné výpočty při modelování [1,3].

5.2 Metoda konečných prvků - FEM

Metoda konečných prvků je důležitá metoda pro řešení numerických diferenciálních rovnic. Její princip spočívá v nalezení rovnice, která aproximuje původní rovnici. Předpokládá se okrajová úloha, která je definovaná diferenciální rovnicí v oblasti Ω

$$Au = f \quad (5.1)$$

kde je

- A – lineární symetrický diferenciální operátor
- u – hledaná funkce
- f – je daná funkce
- Ω - oblast hranice Γ

V oblasti Ω jsou zvolené body, které se nazývají uzly a jimi zvolené podoblasti nazývající se konečné prvky. Tyto konečné prvky se nesmí překrývat a musí souvisle vyplňovat řešenou oblast. Princip metody je v diskretizaci spojitého kontinua do daného konečného počtu prvků. Zjednodušeně hledáme konečné počty hodnot v oblasti Ω s danou hranicí Γ , ze kterých lze sestavit přibližné řešení namísto hledání neznámých funkcí v oblasti Ω . Převedeme tedy analytické řešení diferenciálních rovnic na řešení soustav algebraických lineárních rovnic [15].

Metoda konečných prvků je zvláštní případ Ritzovy a Galerkinovy variační metody. Základ těchto metod je tvořen větou o minimu funkcionálu energie. Funkcionál energie je dán skalárním součinem v reálném Hilbertově prostoru uvedeném níže. Rovnice (5.1) nabývá kvadratický funkcionál pro řešení

$$u_0 = D(A) \quad (5.2)$$

v definičním oboru v hustém reálném Hilbertově prostoru H .

$$Fu = (Au, u) - 2(f, u) \quad (5.3)$$

Ritzova metoda se používá, pokud je bilineární forma symetrická $a(u, v)$. Funkcionál energie lze vyjádřit vztahem:

$$Fu = a(u, u) - 2(f, u) \quad (5.4)$$

Galerkinova metoda nemusí mít bilineární formu symetrickou; rozdíl těchto metod spočívá v podmínce. Podmínka pro splnění Galerkinovy metody je v podmínce [15]:

$$a(u_0, v_N) = (f, v_N) \quad (5.5)$$

kde je

- v_N – podprostor V_N s bázovými funkcemi

Metoda konečných prvků se snaží při řešení pomocí zvoleného prostoru V_N a báze o splnění předpokladu, aby matice A měla co nejvíce nul. Pro výsledný rozklad oblast Ω do podoblastí je vytvořen termín síť. Pojem konečný prvek je použit pro následující označení [15]:

- K - prvek sítě,
- P - prostor polynomů definovaný na K
- Σ - konečná množina funkčních hodnot nebo hodnot derivací polynomu z prostoru P ve zvolených bodech prvku K

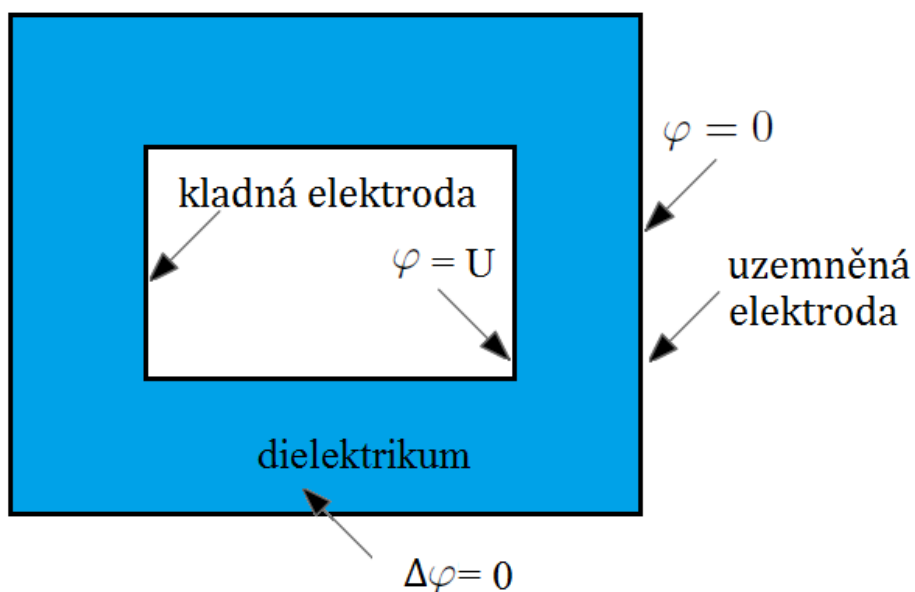
5.3 Okrajové podmínky

Aplikace Agros2D používá metodu konečných prvků pro řešení okrajových podmínek. Pro jednoznačnost řešení v aplikaci rozlišujeme v aplikaci dvě základní okrajové podmínky:

- Dirichletova okrajová podmínka
- Neumannova okrajová podmínka

V Dirichletově okrajové podmínce známe daný potenciál φ , zatímco Neumannova okrajová podmínka je dána normálovou derivací potenciálu $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ na hranici oblasti [2].

Na obr. 3 je vysvětlena aplikace okrajových podmínek pro kondenzátor. Na jeho elektrodách kondenzátoru daný potenciál známe, tudíž je aplikována Dirichletova okrajová podmínka. Neumannova okrajová podmínka je následně nadefinována v oblasti dielektrika kondenzátoru



Obr. 3 Ukázka okrajových podmínek v Agros2D

Pokud jsou v Agrosu2D definovány fiktivní hranice, jsou to hranice označují řešenou oblast. Za splnění této podmínky mají tyto fiktivní hranice normálovou derivace potenciálu rovnou nule [2].

6 Ochrana potrubí

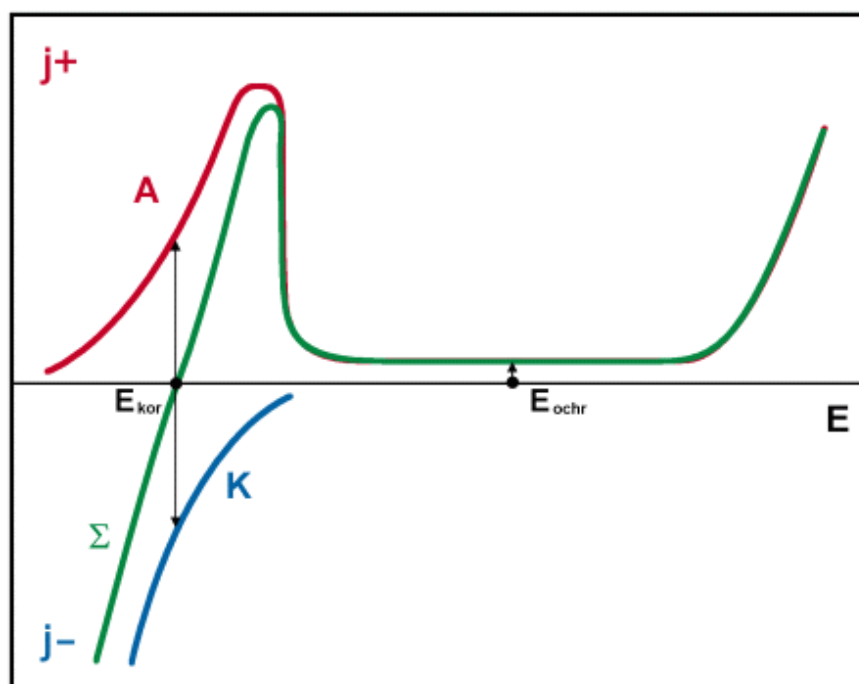
6.1 Anodová a katodová ochrana

Elektrochemická koroze patří mezi nejčastější koroze vůbec. Ochrana proti ní je vytvářena na základě stejnosměrného proudu. Její největší příčinou koroze se zdá být vlhkost. Tento druh koroze probíhá v elektrolytech neboli ve vodivém prostředí, kde dochází ke změně nosiče náboje. Existují ochrana anodová a katodová [9,10].

6.1.1 Anodová ochrana

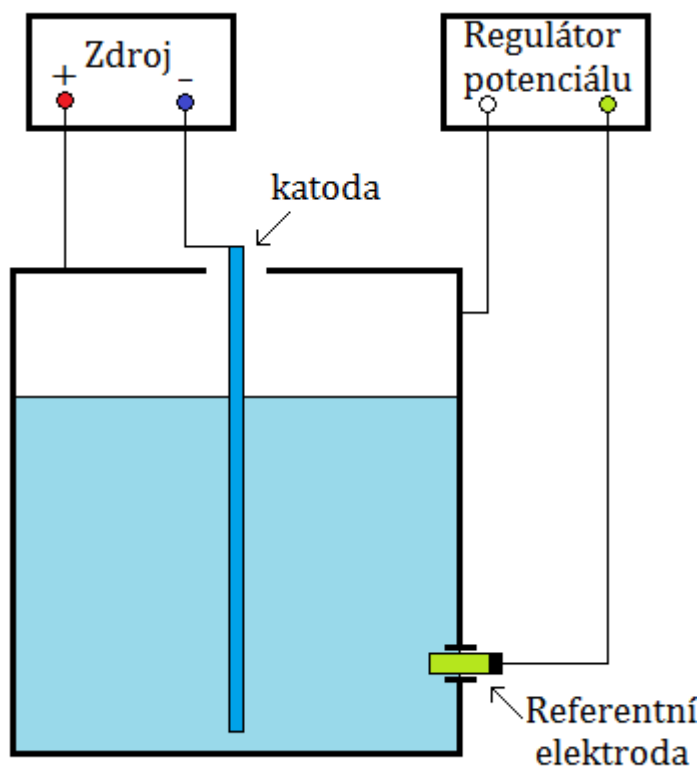
Anodová ochrana má menší význam oproti ochraně katodové z důvodu menší vhodnosti uplatnění na průmyslové objekty. Při tomto druhu ochrany je chráněné zařízení zapojeno jako anoda. Používá se pro vnitřní povrchy zařízení většinou v chemických odvětvích [9].

Princip anodové ochrany je ve vytvoření proudu, který vyvolá pasivaci, jak je patrné z níže obr. 4.



Obr. 4 Anodická ochrana; převzato z [9]

Pro zajištění konstantního potenciálu na chráněném zařízení je nutný zdroj proud. Na obr. 5 vidíme princip systému anodové ochrany. Tento systém anodové ochrany chrání zařízení na anodové elektrodě. Jako snímač potenciálu zde slouží referenční elektroda, která zajišťuje konstantní potenciál na zařízení [9,11].

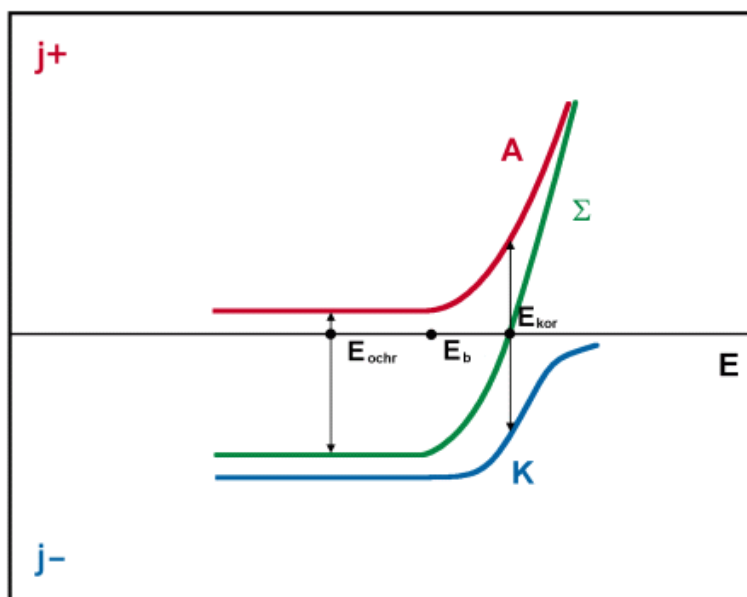


Obr. 5 Systém anodové ochrany

Katodu v zařízení můžeme umístit libovolně, protože odpor prostředí zpasivovaného povrchu zařízení je velice malý. Životnost katod se pohybuje přibližně okolo 1 roku. Pro zajištění životnosti však musí být zajištěna správná volba materiálu dle typu korozního prostředí. Referenční elektroda musí být velice spolehlivá pro funkčnost celého systému, neboť se jedná o hlavní část systému ochrany zařízení. V celém systému ochrany se zpravidla instalují tři tyto elektrody. První referenční elektroda je řídicí a je spojena s hlavním zdrojem. Druhá elektroda je zapojena na záložní zdroj. Třetí elektroda má funkci kontrolní či záložní. Typ elektrody se samozřejmě opět odvozuje od druhu korozního prostředí. Popsaný druh ochrany vyžaduje splnění určitých požadavků jak pro instalaci, tak na kvalifikovanou obsluhu [9,10].

6.1.2 Katodová ochrana

Katodová ochrana posunuje potenciál kovu záporným směrem. Oproti anodové ochraně dochází ke snižování anodové proudové hustoty, což je patrné z obr. 6 [10].

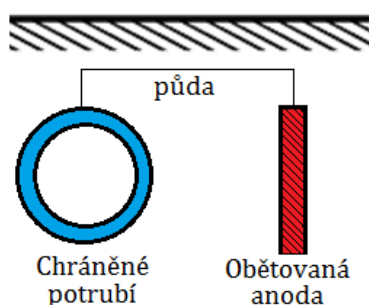


Obr. 6 Katodová ochrana; převzato z [9]

Princip této ochrany je v poklesu korozní rychlosti dvěma způsoby, a to přímým potlačením anodového rozpuštění a nepřímou pasivací. Přímým potlačením anodového rozpuštění je anodová reakce, která vylučuje kyslík nebo chlor (v prostředí s chloridy). Při nepřímé pasivaci dochází k alkalizaci (snížení kyselosti) roztoku a k odstranění chloridů z povrchu chráněného zařízení [9].

6.1.2.1 Katodová ochrana s obětovanou anodou

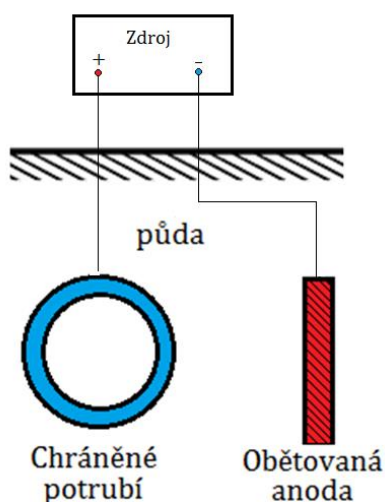
Princip této metody spočívá v zapojení chráněného zařízení s kovem, který má více negativní korozní potenciál než chráněné zařízení zobrazené na obr. 7. Pro obětované anody lze použít slitiny hořčíku, zinku či hliníku. Nejčastěji katodicky chráněným kovem je uhlíková ocel. Tento způsob je již zastaralý, neboť pochází z půlky 19. století, ale stále se používá [9,10].



Obr. 7 Katodová ochrana s obětovanou anodou

6.1.2.2 Katodová ochrana s vnějším zdrojem proudu

Chráněné zařízení z následujícího nákresu je spojeno se záporným pólem zdroje stejnosměrného proudu. Kladný pól je připojen na inertní anodu. Jež může být vyrobena z kovů (uhlíková ocel), z těžko rozpustných materiálů (grafit) anebo z nerozpustných materiálů (platina). Připojením ochranného proudu se kovovému povrchu předá zápornější potenciál. Tento typ ochrany je výhodný při použití menšího množství anod s využitím vnějšího zdroje stejnosměrného proudu [10,11].



Obr. 8 Katodová ochrana s vnějším zdrojem proudu

6.1.3 Porovnání ochran

Oba druhy elektrochemické ochrany se doplňují. Katodové ochrana je teoreticky nejvhodnější pro všechny kovy či slitiny v prostředí, kde je dána elektrolytická vodivost. Právě tato ochrana se využívá především u uhlíkové oceli, zatímco anodová ochrana se výhradně využívá pro kovy, kde existuje aktivně pasivní přechod především při změně potenciálu. Velikost ochranného proudu katodové ochrany je úměrná korozní rychlosti. Z hlediska bezpečnosti se stává anodové ochrana rizikovější, protože se zde vyskytuje nucená pasivace kovu průchodem proudu. Katodová ochrana je spíše označována jako doplňková ochrana [10,11].

6.2 Zařízení uložená v zemi

V současnosti je nejčastějším materiálem pro výrobu potrubí ocel, i když trendem v budoucnosti bude spíše zaměření se na použití plastů, které nepodléhají elektromagnetickým či korozivním vlivům. Mezi vybraná zařízení v zemi prověřovaná v mé práci se řadí vodovody a plynovody. Pro rozvod plynovodu z důvodu bezpečnosti se používají ocelová plynová potrubí. Ve své práci se zaměřuji na ocelové trubky bezešvé, které jsou vhodnější pro tyto účely, viz obr 9 [14].



Obr. 9 Ocelové bezešvé potrubí; převzato z [12]

Hloubka uložení potrubí se pohybuje mezi 1 až 3 metry pod zemí i nad zemí, jelikož v některých případech není možné uložit potrubí pod zem. Velký vliv na vytvoření této situace mohou mít, jak finanční prostředky, tak i geologické podmínky.

Ukázka rozměrů ocelových bezešvých trubek:

Tab. 1 Rozměry ocelového potrubí, převzato z [15]

Průměr trubky [mm]	Tloušťka vnější stěny [mm]
57	2,9
133	4,5
273	7
508	14

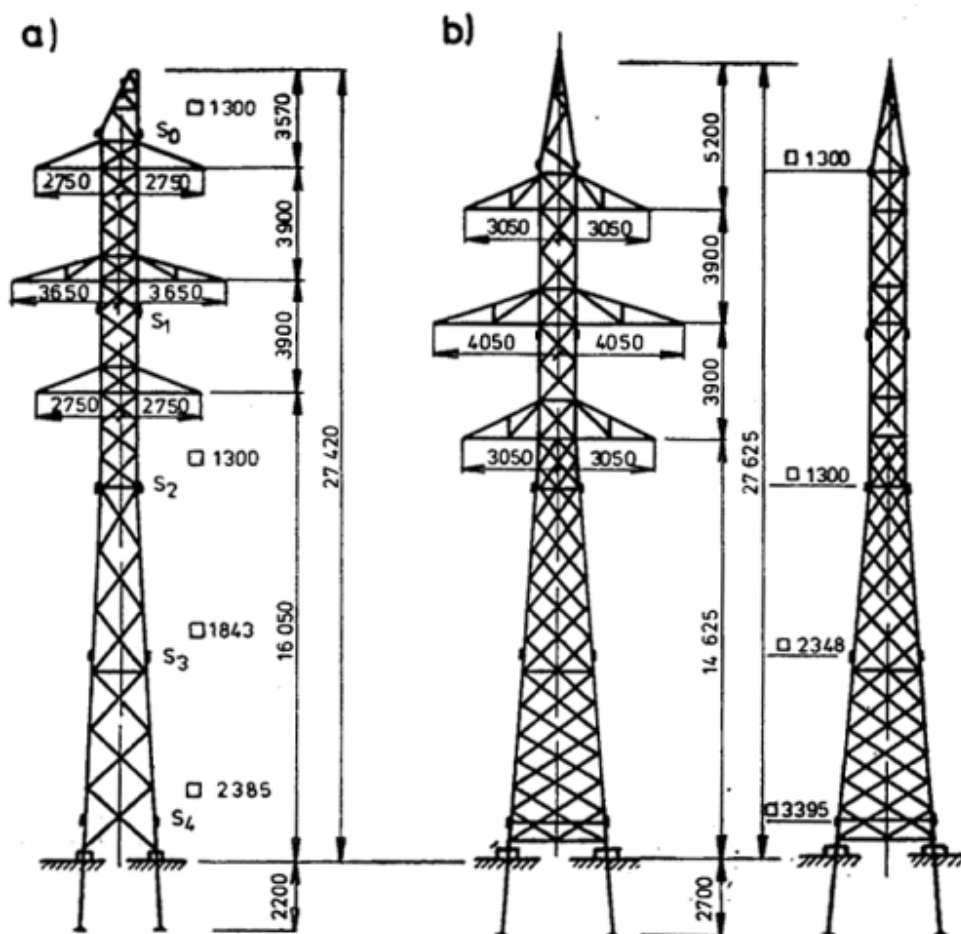
Rozměry potrubí dle normy jsou označovány ČSN 42 5710 a ČSN 42 5715, v nichž jsou uvedeny mezní úchytky. V modelech se používá pouze ocelovou trubka, neboť vliv izolace na rozložení elektromagnetického pole není tak velký. Výchozí průměr potrubí pro numerický model je 273/7 mm [15].

7 Stožáry

Pro model jsou vybrány dva typy stožárů s různými parametry, stožár typu „Soudek“ a typu „Kočka“. Ke konstrukci stožárů se používají válcové profily, přesněji úhelníky. Další možný způsob konstrukce je použití trubek, díky čemuž je získána lepší únosnost stožáru. Tento typ je velmi nákladný, a proto je vyráběn pouze v menší míře. Všechny stožáry se vyrábějí z kvalitní oceli jakostní třídy pod označením 11353, 11373 dle EN 40/2 [13].

7.1 Stožár „Soudek“

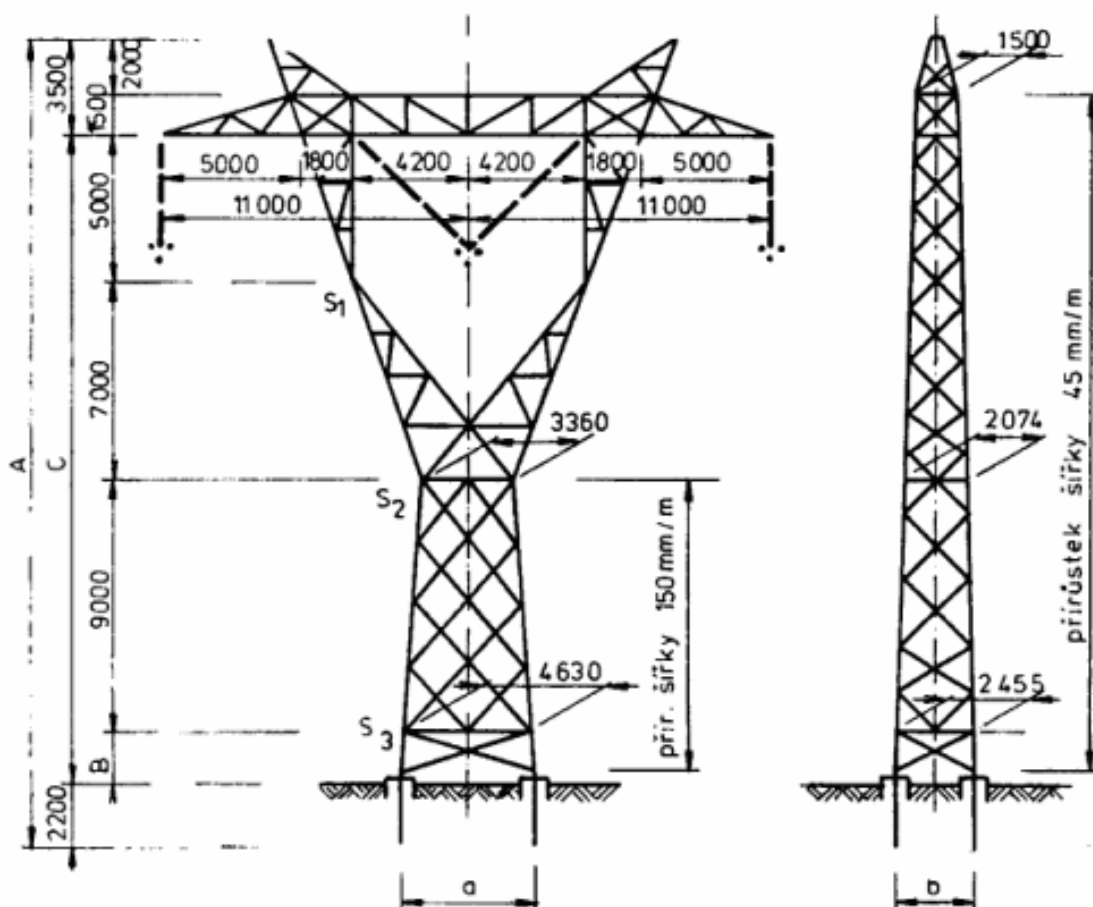
Stožár typu „Soudek“ může být nosný či vyztužený. Oba druhy tohoto stožáru jsou konstruovány pro 2 x 110kV. Ke stožárům jsou připevněny vodiče 6 450 AlFe + 185 AlFe 3 o velké hmotnosti. Oba druhy stožárů jsou si tvarově podobné avšak v přímém směru má vyztužený stožár větší rozměry, širší profil a větší výplň, neboť je namáhán většími ohybovými momenty a kroucením. Do svého modelu jsem dodal zemnicí lano, které je uloženo 3 metry nad horními vodiči, viz obr. 10 [13].



Obr. 10 Stožár typu Soudek; převzato z [13]

7.2 Stožár „Kočka“

Tento typ stožáru patří do druhé skupiny stožárů pro 400kV vedení. Jak je z obr. 11 patrné, jedná se o stožár s „oknem“ uprostřed. Při uspořádání vodičů v jedné úrovni se stožár podobá tvaru Y. Takovýto stožár je typizován pro 400kV je tvořen vylehčenou ocelí Atmosfix. Vodiče pro tento typ jsou 3x3 450 AlFe 6 + 2 185 AlFe 3. Stožár bývá zpravidla šroubovaný. Je sestaven z několika tyčových prvků, což je velká výhoda pro přepravu stožáru. Další výhodou je uspořádání vodičů do trojúhelníku, jak z hlediska elektrotechnického, tak konstrukčního, viz obr 11 [13].



Obr. 11 Stožár typu Kočka; převzato z [13]

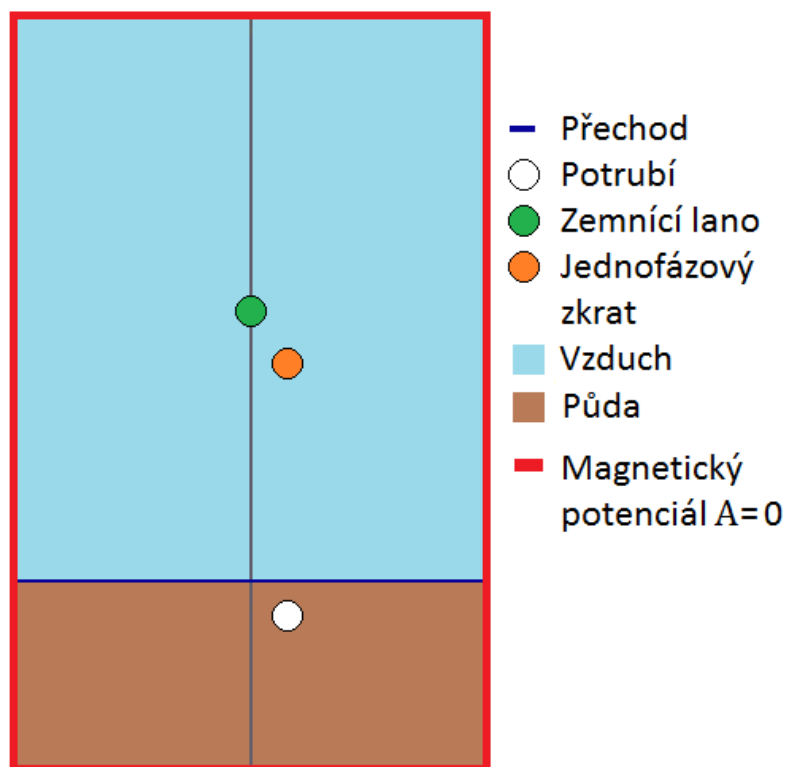
8 Model „Soudek“

8.1 Model v Agrosu2D

První model v Agrosu2D se zaměřuje na stožár typu „Soudek“ pro 110kV se zemnicím lanem, na kterém je zkoumán vliv jednofázového zkratu. Pro tento typ je uloženo potrubí v zemi od 1 do 3 metrů, ale také zároveň nad zemí maximálně do výšky 3 metrech. Tímto zařízením může protékat voda nebo plyn. Výška stožáru se pohybuje okolo 27 metrů včetně zemnicího lana, které leží 3 metry nad vodiči. Ve středu stožáru se nachází zemnicí lano tak, aby krylo vodiče před vnějšími vlivy (např. blesky).

8.1.1 Preprocessor

V preprocessoru modelu je vytvořena geometrie pro daný problém, která se stává klíčovým bodem pro další postup. Celý model je řešen v kartézském souřadnicovém systému včetně materiálových konstant a nastavení okrajových podmínek, bez kterých nelze výpočet začít. Při vytvoření okrajových podmínek musí být nastaven magnetický potenciál ($A = 0$) pro řešenou oblast. Na obr. 12 níže je ukázána geometrie modelu řešeného v Agrosu2D. Modul preprocessoru obsahuje několik základních operací s uzly, hranami a oblastmi, což také zahrnuje otáčení. Oba druhy stožárů jsou si tvarově podobné avšak v přímém směru má vyztužený stožár větší rozměry, širší profil a větší výplň posuny s těmito prvky.



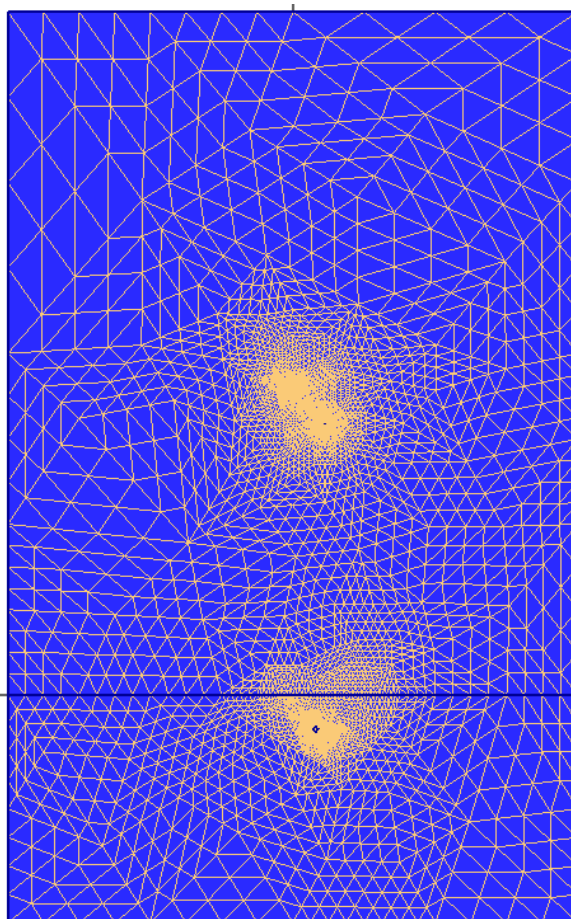
Obr. 12 Geometrie pro model „Soudek“

8.1.2 Výpočetní řešení

Výpočet numerického řešení má v programu Agros2D následující kroky. Nejdříve se musí vygenerovat síť z navrženého geometrického uspořádání, poté jsou vytvořeny soubory s vygenerovanou sítí. Třetím krok se převede síť do formátu Hermes2D sítě, v předposledním kroku je z paměti počítače načtena síť a následně je daný problém úspěšně vyřešen.

8.1.3 Počáteční síť

V tomto kroku se vytvoří počáteční síť s určitým počtem elementů. Pro správné řešení je kladen důraz na výběr řádu a zjemnění, dále také na použité adaptivitu a obsah elementu pro danou oblast. Na obr. 13 je vidět ukázkou vytvořené počáteční sítě.



Obr. 13 Počáteční síť v Agrosu2D

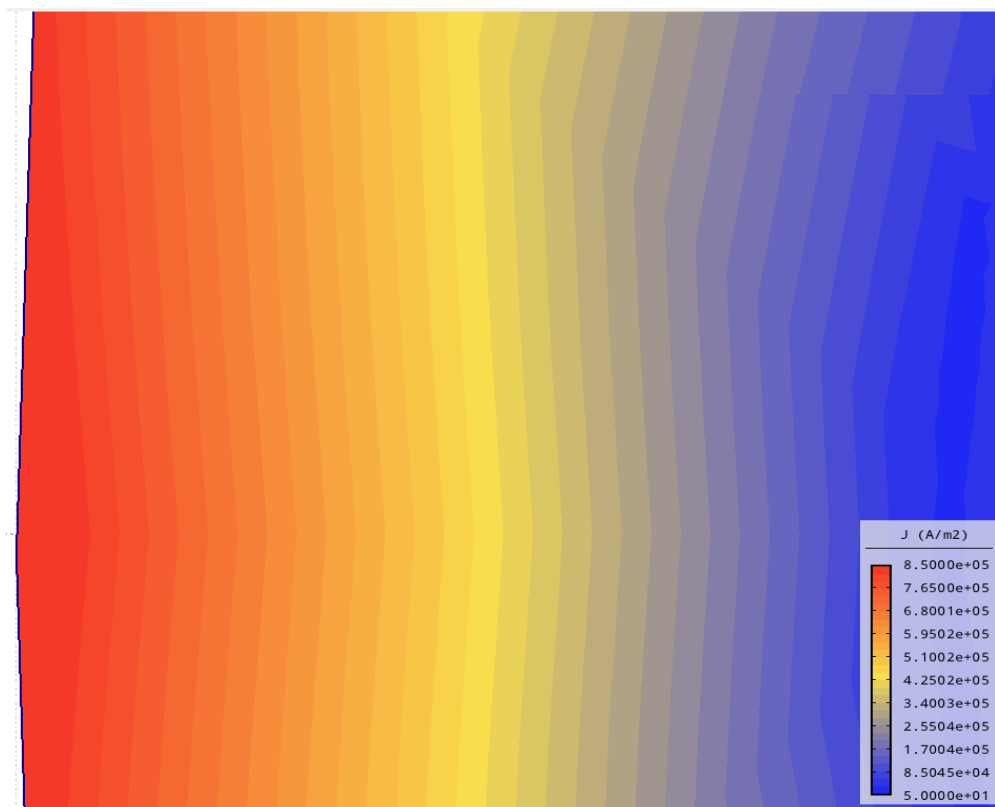
8.1.4 Post-processor

Po kroku preprocessoru a processoru se ve své práci zbývám o nejzajímavější částí - post-processorem. V této části programu mohou být pro daný model Agros2D zobrazeny různé proměnné.

Proměnné, jež jsou stanoveny níže, mají největší váhu při řešení elektromagnetického pole:

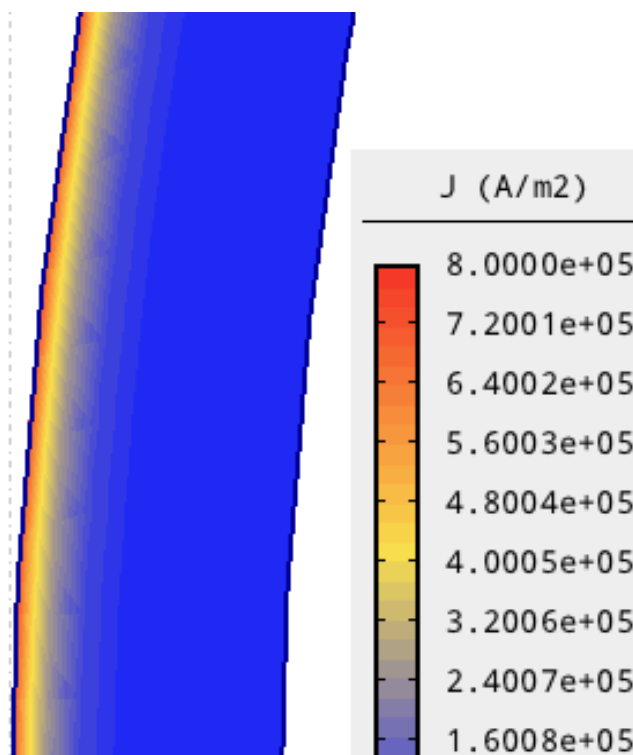
- J – celková proudová hustota (hustota elektrického proudu)
- H – intenzita magnetického pole
- B – magnetická indukce

Pro měření daného problému se v post2D využívá několik funkcí. Jednou z klíčových funkcí je určení hodnoty veličiny v bodě, čímž se nastaví bod pro správné porovnávání hodnot. V post-processoru bude nejčastěji řešena celková proudová hustota J . Správnost řešení se pozná v dokonale pravidelném rozložení, jak dokazuje obr. 14.



Obr. 14 Správnost řešení Post 2D

Na obr. 15 je znázorněno rozložení celkové proudové hustoty v ocelovém plášti potrubí.



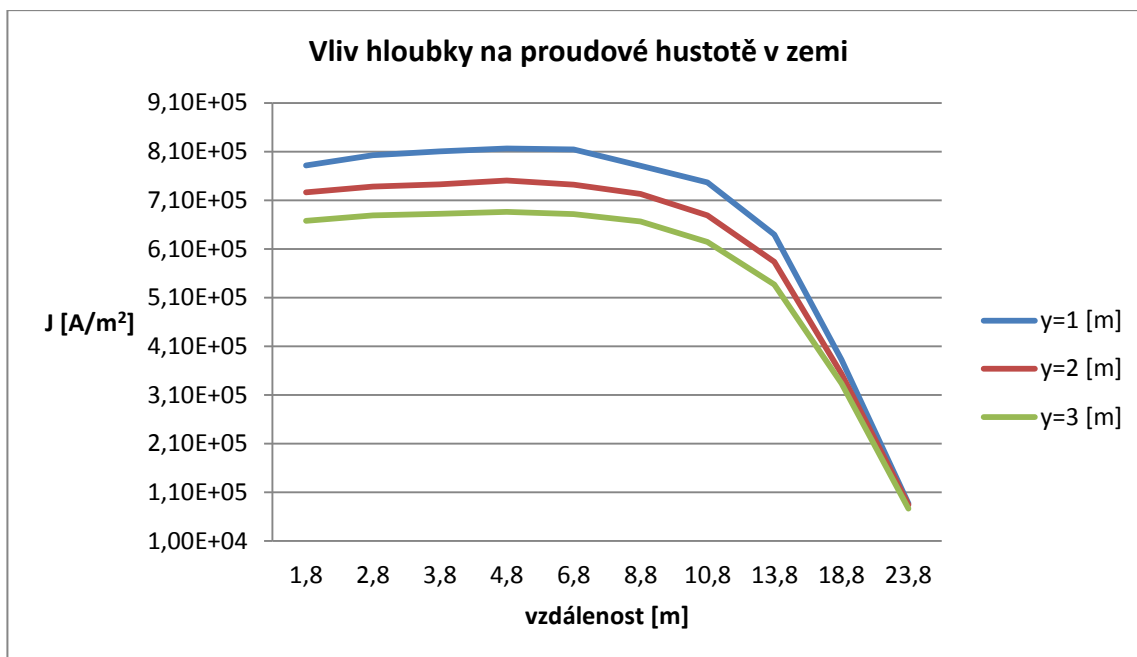
Obr. 15 Celkové rozložení z modelu

8.2 Analýza modelu „Soudek“

Pro model stožáru „Soudek“ budou namodelovány různé varianty, například vliv vodivosti půdy, vliv vodivosti oceli, vliv protékající látky a další.

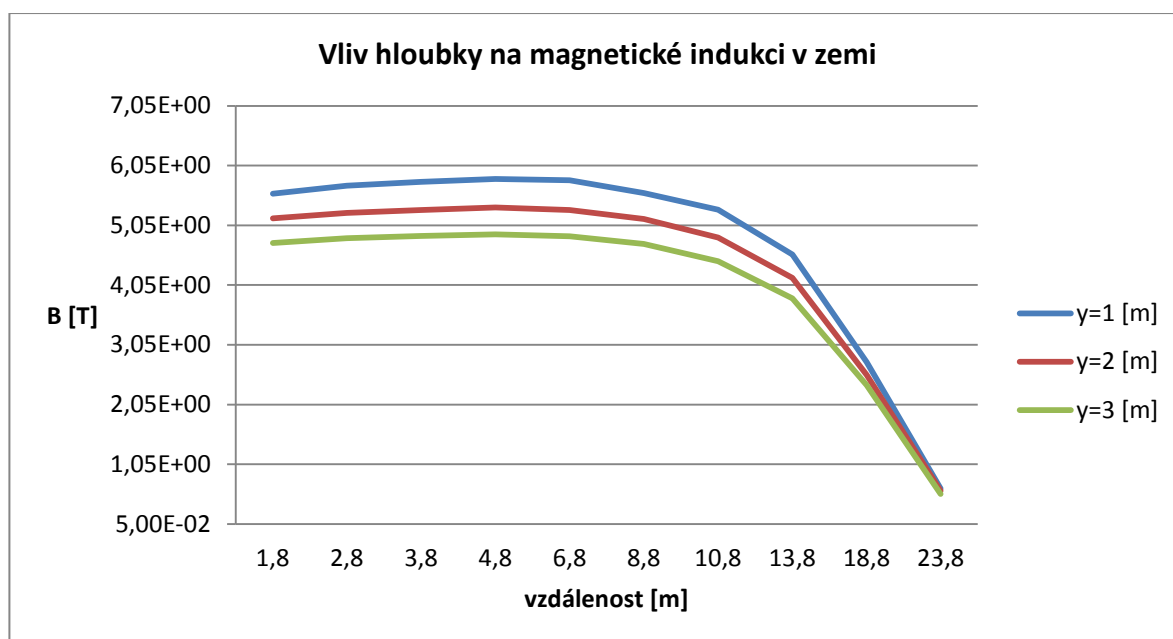
8.2.1 Vliv hloubky na proudové hustotě

Ve své práci se zaměřuji nejprve na vliv hloubky na potrubí uložené v zemi při elektrické vodivosti půdy 0,1 [S/m] a zařízení uložené v zemi tvořící plynovod. Na obr. 16 je testován vliv hloubky na potrubí i na všechna zmíněných zařízení. Je prokazatelně zřejmé, že s větší hloubkou uloženého potrubí je indukováno méně proudové hustoty, která má klesající charakter se vzdáleností od stožáru. Zjistil jsem, že maximální hodnoty pro proudovou hustotu jsou dosaženy tehdy, pokud je potrubí umístěno pod stožárem.



Obr. 16 Vliv hloubky na proudovou hustotu v zemi

Při testování vlivu hloubky na magnetickou indukci je zjištěn stejný vliv hloubky včetně jejího klesajícího charakteru s její vzdáleností od stožáru stejně jako v předchozím uvedeném textu, viz obr. 17.

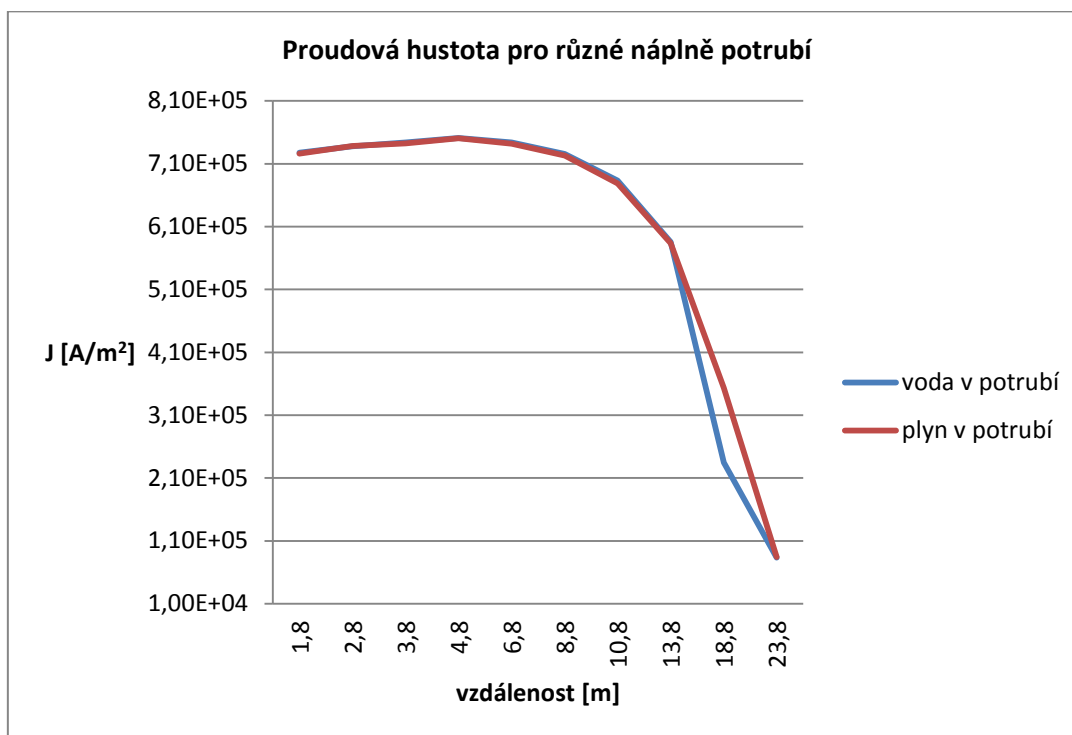


Obr. 17 Vliv hloubky na magnetickou indukci v zemi

V následujících grafech bude převážně prezentován vliv celkové proudové hustoty, protože charakter vlivu je již znatelný při tomto řešení, které je patrné z předcházejících grafů. Vzhledem k tomu, že bylo naměřeno velké množství dat, jsou v mé práci vybrány pouze některé z nich.

8.2.2 Vliv proudové hustoty na náplň potrubí

Po první testu zkoumajícím vliv hloubky na proudovou hustotu a magnetickou indukci v zemi je druhým testem v mé práci prokázán vliv náplně v potrubí, za použití vody (vodovod) místo plynu (plynovod). Model má stejné vlastnosti vodivosti půdy, jako bylo popsáno výše. Zařízení je uloženo v hloubce 2 metrů pod zemí. Jelikož voda má větší elektrickou vodivost než plyn (vzduch), mělo by docházet k lepšímu rozprostření celkové proudové hustoty v potrubí. Z celkového důsledku by měla proudová hustota klesnout, ale z obr. 18 je zřejmé, že jiná náplň v potrubí nemá na proudovou hustotu vliv.



Obr. 18 Vliv různých náplní na proudové hustotě

8.2.3 Vliv vodivosti půdy

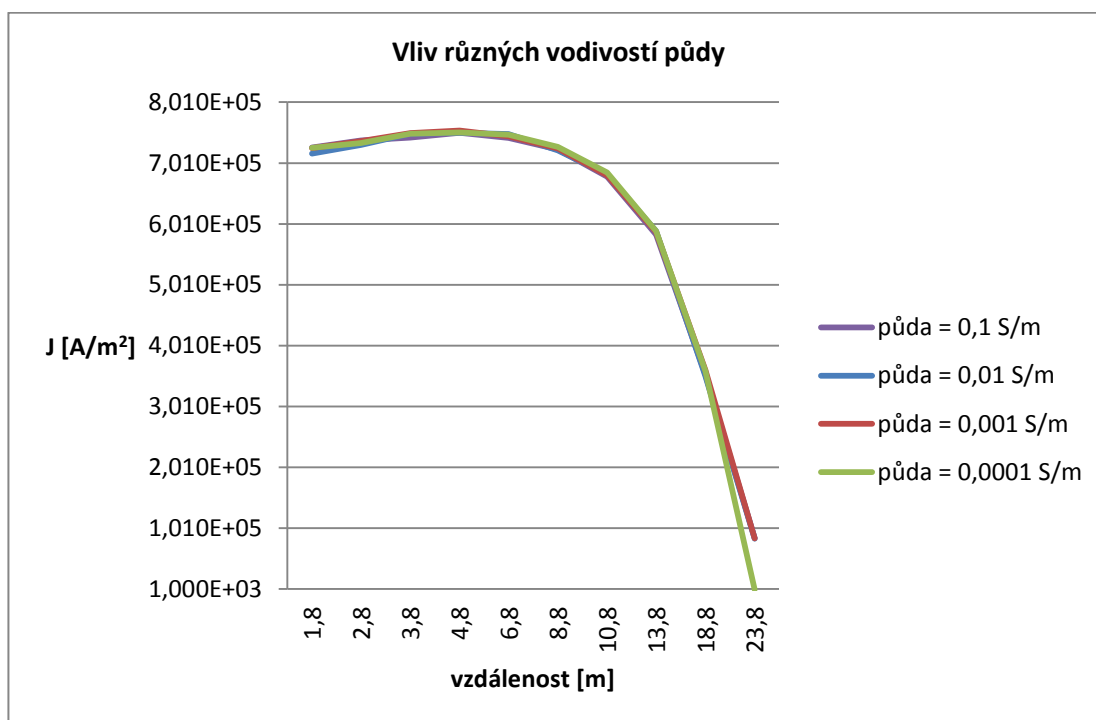
Významným činitelem, který může ovlivnit výsledky celkové proudové hustoty, by mohla být vodivost půdy. Půda může nabývat různých hodnot elektrických vodivostí:

Tab. 2 Proudová hustota pro různé náplně; převzato z [16]

Druhy zemin	Rezistivita [$\Omega \cdot m$]
Rašelina	30
Ornice	100
Vlhký písek	200 - 300
Vlhký štěrk	300 - 500
Suchý písek/štěrk	1000 - 3000
Suchá kamenitá půda	3000 - 10 000

Z tabulky je patrné, že elektrická vodivost závisí na druhu půdy, na rozvrstvení půdy, její teplotě a vlhkosti, jelikož zamrzlá zem má daleko nižší elektrickou vodivost než nezamrzlá. Pokud zemí bude procházet elektrický proud je země v okolí zemniče vysušována, tudíž tím dochází ke snížení elektrické vodivosti. Dalšími faktory, které mohou ovlivnit elektrickou vodivost, může být jak říční tak dešťová voda nebo mastné či olejové skvrny [16].

Elektrická vodivost půdy se počítá jako převrácená hodnota rezistivity půdy. Na obr. 19 je testován vliv různých elektrických vodivostí půdy na celkové proudové hustotě. Model má uložené potrubí v hloubce 2 metrů.



Obr. 19 Vliv různých vodivostí půdy na proudové hustotě

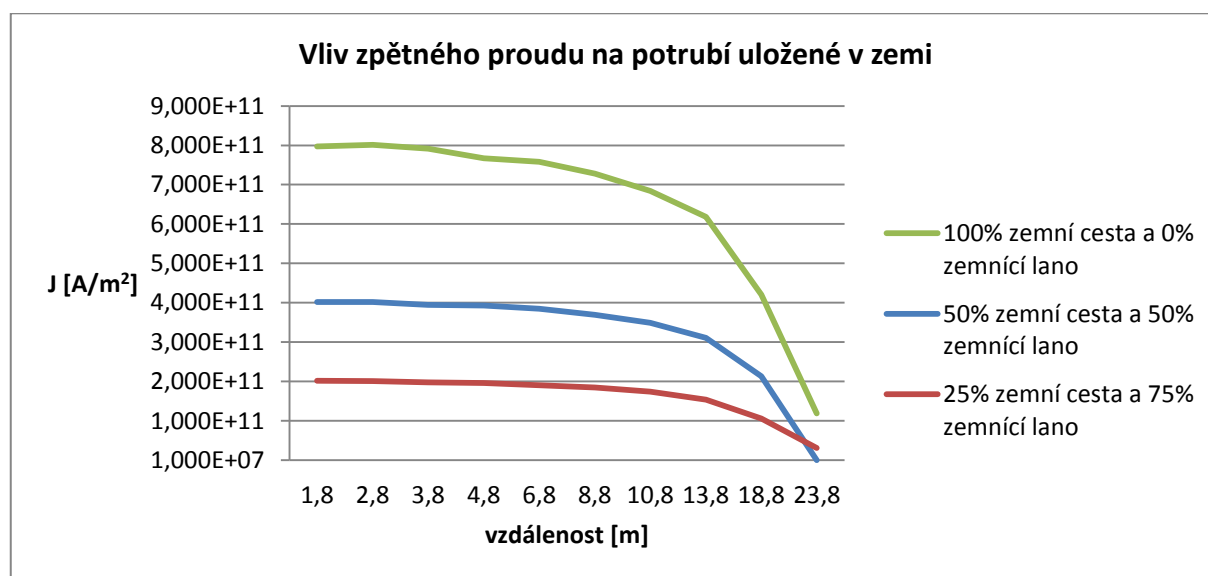
Vliv různých hodnot elektrických vodivostí půdy nemá vliv na změnu velikosti celkové proudové hustoty na potrubí.

8.2.4 Vliv zpětného proudu

V následném modelu má práce zkoumá rozložení zpětného proudu, který může procházet, jak zemnicí cestou, tak jejím lanem. Budou zde namodelovány čtyři nejpravděpodobnější situace, které mohou nastat při rozložení zpětného proudu v procentním poměru mezi zemní cestou a zemnicím lanem v těchto poměrech:

- 100% zemní cestou a 0% zemnicím lanem
- 50% zemní cestou a 50% zemnicím lanem
- 25% zemní cestou a 75% zemnicím lanem
- 0% zemní cestou a 100% zemnicím lanem

Na obr. 20 jsou porovnány jednotlivé modely. Tento model má potrubí uložené v hloubce 2 metrů v zemi při vodivosti půdy 0,1 [S/m].



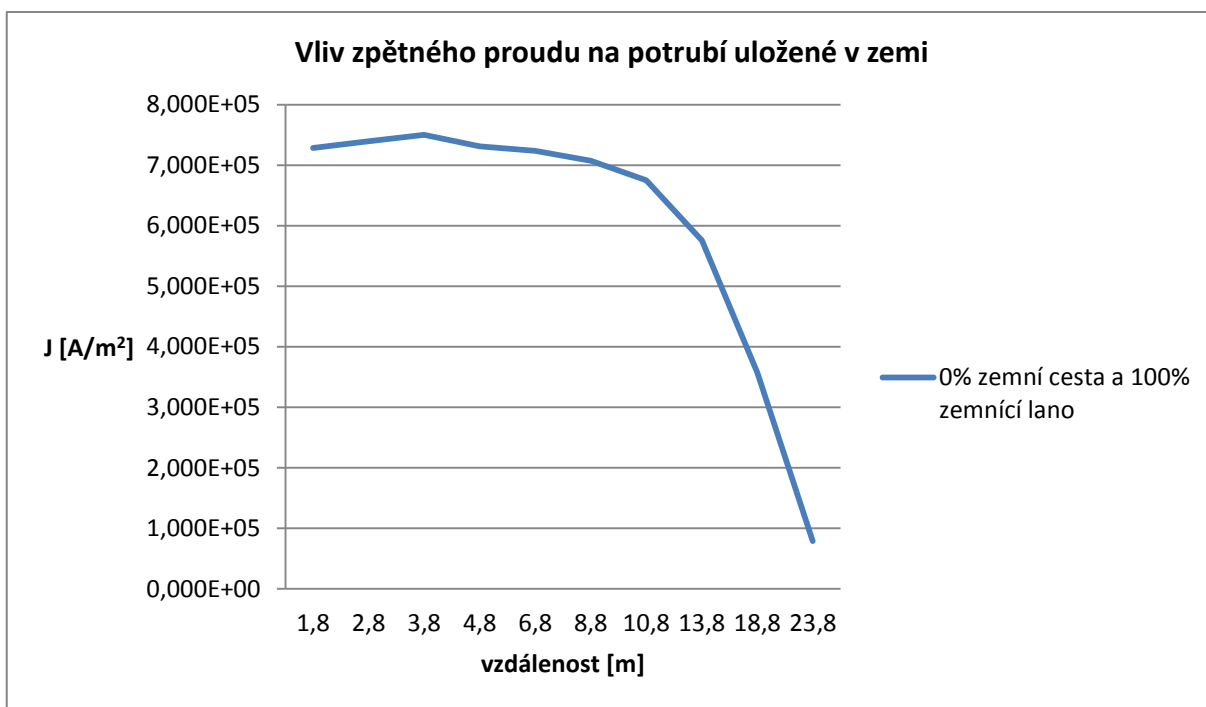
Obr. 20 Vliv zpětného proudu na potrubí

Nejvyšší naměřené hodnoty jsou prokazatelně stanované pro procentní definici zpětného proudu 100/0, tudíž všechen zpětný proud teče zemní cestou. Stožár je tedy bez zemnicího lana.

Druhá možnost je platná pro procentní vyjádření zpětného proudu v poměru 50/50. V praxi k tomuto poměru dochází ve větších vzdálenostech od rozvodných stanic. Z výsledků je patrné, že zemnicí lano nemá na potrubí takový vliv, jako má zpětný proud směřující zemní cestou.

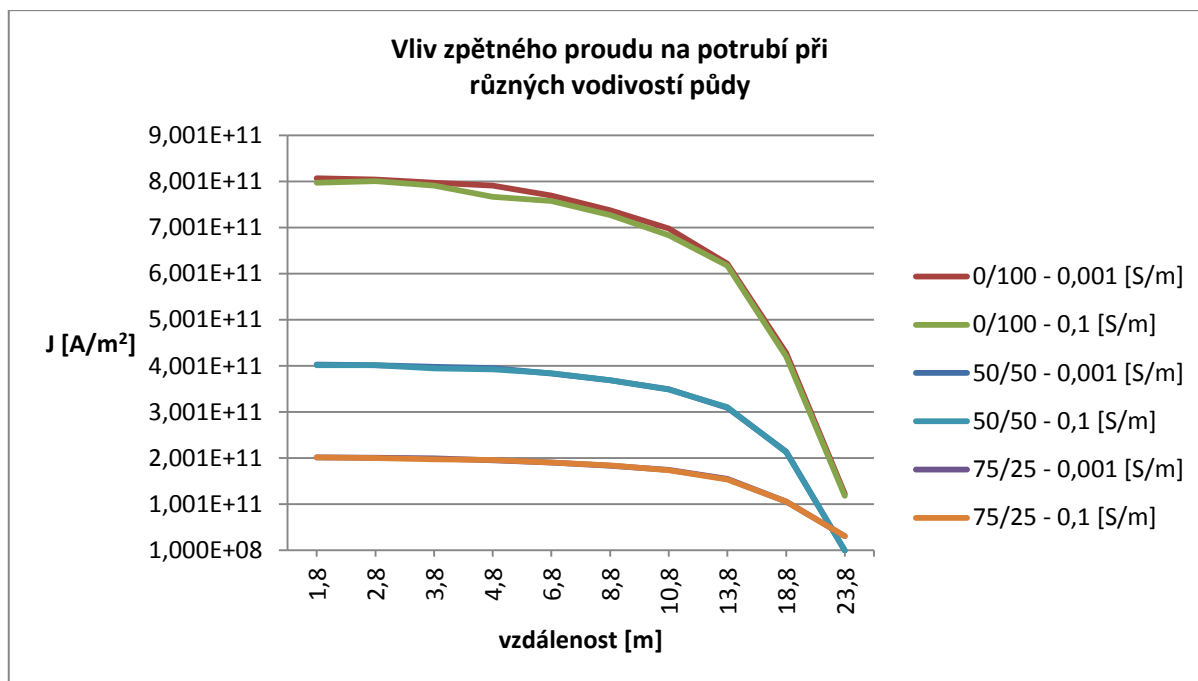
U třetí možnosti je nastaven nejmenší zpětný proud směřující zemní cestou do země. Jak již z předchozích možností vyplynulo vliv zemnicího lana není tak rapidní na velikost celkové proudové hustoty na potrubí.

Na obr. 21 je testována poslední možnost, která má procentní poměr zpětného proudu v poměru 0/100, tudíž zpětný proud je veden pouze zemnicím lanem. Jak bylo v předešlém textu patrné, je i v tomto případě prokazatelné, že vliv zemnicího lana není stejně velký jako průchod zpětného proudu zemní cestou.



Graf. 21 Vliv zpětného proudu zemnicím lanem na potrubí

V tomto odstavci bude předveden vliv změny elektrické vodivosti půdy při zachování předchozích procentních definic zpětného proudu. Jsou vybrány procentní definice zpětných proudů, které jsou stejné jako na obr. 20. Dále je tento model rozšířen o dvě různé elektrické vodivosti půdy. Konkrétně tedy o elektrickou vodivost 0,1 [S/m] a 0,001 [S/m], jedná se tedy o lehké a těžké či skalnaté půdní horizonty. Z obr. 22 je poukázán rozdíl mezi těmito půdami.



Obr. 22 Vliv zpětného proudu pro různé vodivosti

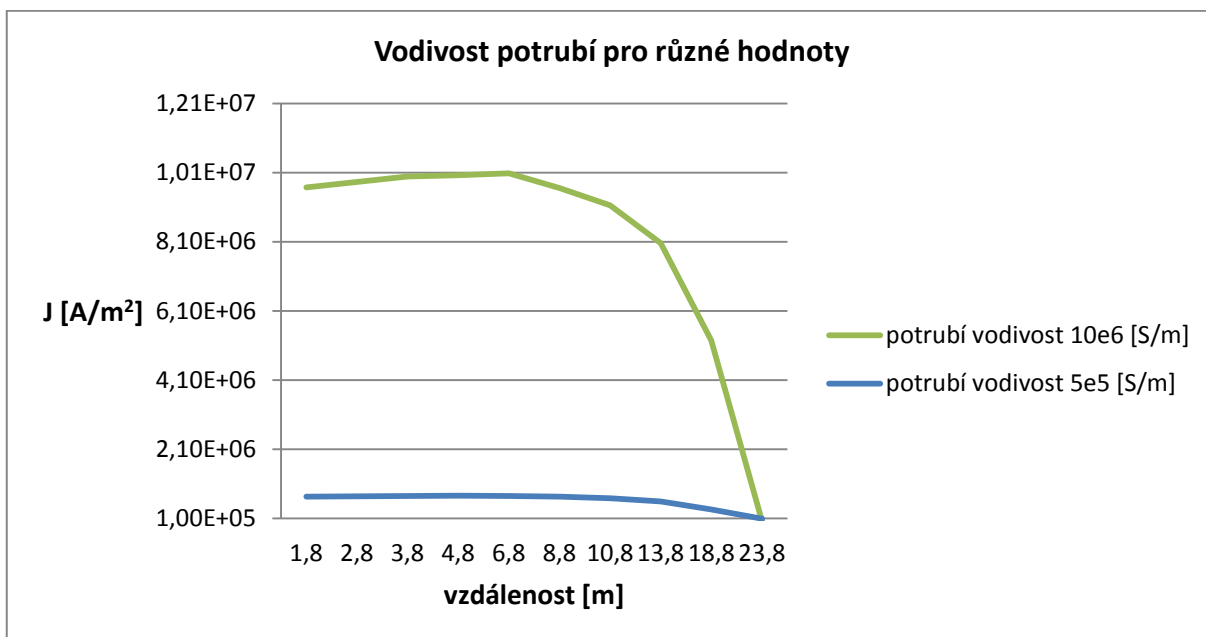
Změna elektrické vodivosti půdy nemá vliv na velikost proudové hustoty na zařízení uložená v zemi.

8.2.5 Vliv elektrické vodivosti potrubí

Potrubí bylo dříve vyráběno hlavně z oceli, nyní je trend jiný. Vodovodní potrubí se vyrábí převážně z plastu. Plynovody jsou však z hlediska bezpečnosti vyráběny stále z oceli. Pro model svůj model jsem vybral ocelové potrubí, neboť se stále jedná o nejrozšířenější materiál.

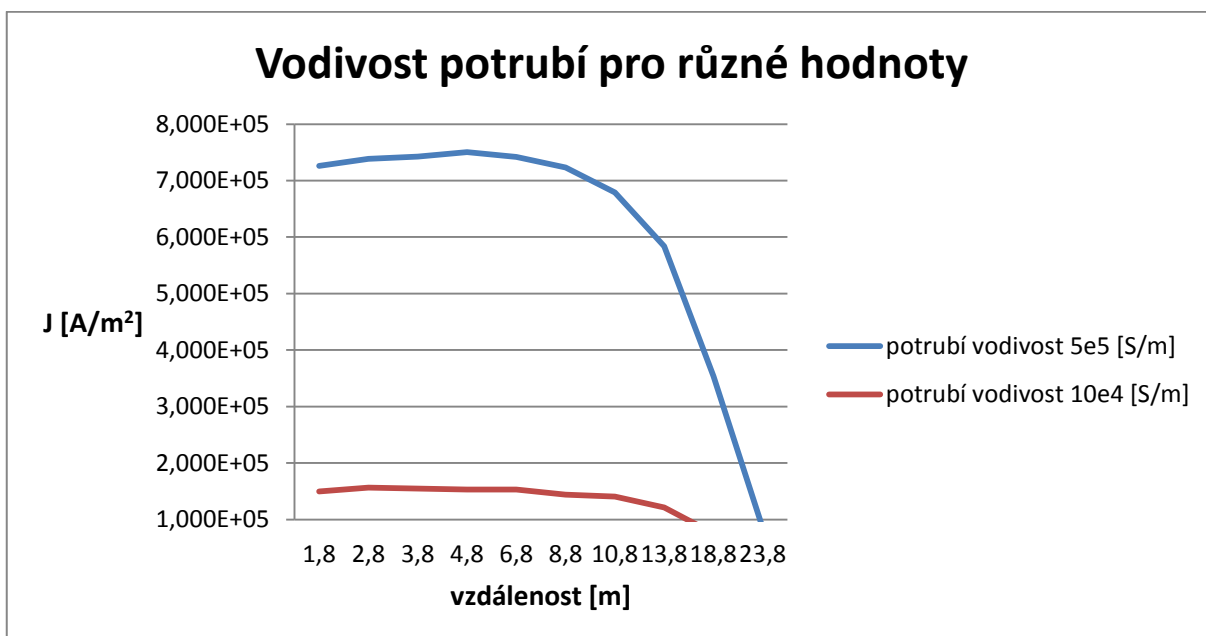
Relativní permeabilita oceli se pohybuje od 5 000 do 10 000, z hlediska feromagnetické látky závisí hodně na čistotě materiálu. Parametry oceli pro výrobu trubek jsou výrobci utajované, tudíž každá firma si drží své know-how. V následném modelu je nastavena elektrická vodivost oceli od $10e4$ do $10e6$ [S/m] při elektrické vodivosti půdy $0,1$ [S/m] s potrubím v hloubce 2 metrů.

Na obr. 23 je ověřena teorie, která předpokládá, že při vyšší elektrické vodivosti potrubí bude vyšší hodnota proudové hustoty.



Obr. 23 Elektrická vodivost potrubí při vyšší elektrické vodivosti

V předešlém textu byl poukázán vliv elektrické vodivosti oceli na potrubí, kterou je otestována na dalším obr. 24.

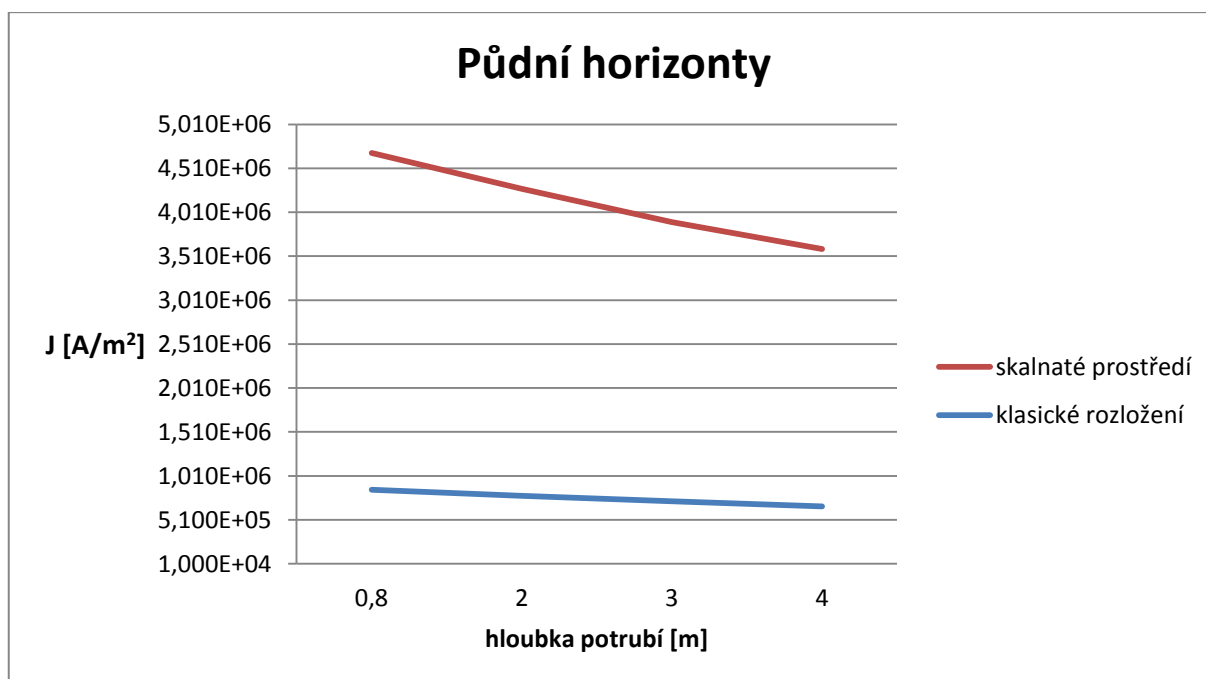


Obr. 24 Elektrická vodivost potrubí pro nižší elektrickou vodivost

8.2.6 Vliv rozložení půdních horizontů

V této části bude testována půda v klasickém rozložení a ve skalnatém podloží. Klasické rozložení půdy je tvořeno jednotlivými vrstvami půdy. Vrstvy půdy jsou poskládány od lehčích půd k těžkým půdám až po skalnatá podloží.

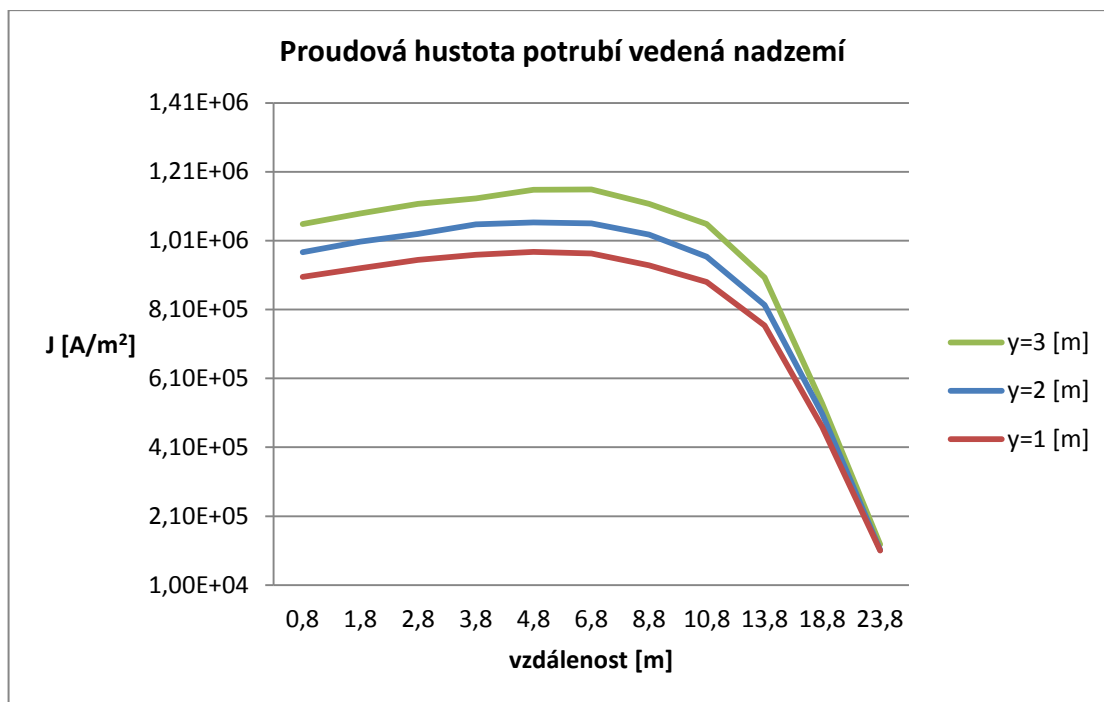
Druhý model je ovlivněn skálou z pravé a spodní strany potrubí, tudíž je narušeno klasické rozložení půdy. Měření modelu probíhalo na vertikální ose, kde potrubí bylo reálně uloženo mezi 1 až 4 metry pod zemí. Z obr. 25 je patrné, že skalnaté prostředí napomáhá k lepší magnetické indukci do potrubí.



Obr. 25 Půdní horizonty

8.2.7 Potrubí vedené nad zemí

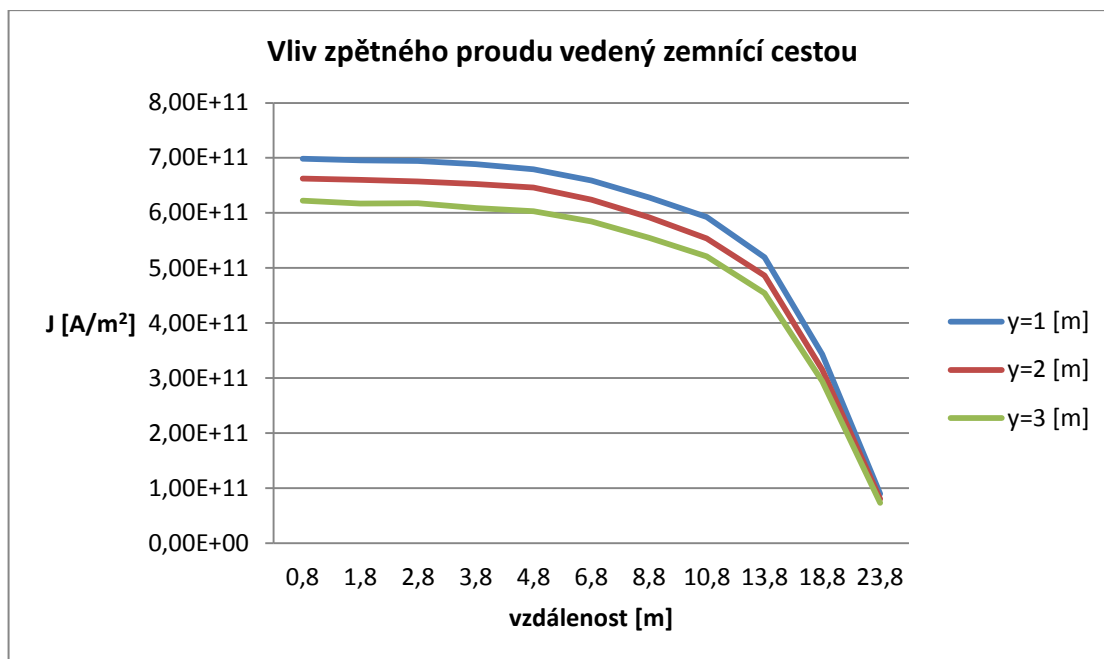
Tento odstavec představuje potrubí, které je vedené nad zemí. Jak již bylo vysvětleno výše, potrubí mohou být vedena nad zemí i pod zemí. Pokud je potrubí vedeno nad zemským povrchem není ovlivněno elektrickou vodivostí půdy. V následujícím obrázku bude ukázán vliv vliv elektromagnetického pole na potrubí umístěné nad zemí. Jedná se o model se o model pro tři výškové úrovně potrubí v rozmezí od 1 do 3 metrů nad zemí, viz obr. 26.



Obr. 26 Potrubí vedené nadzemí

Model bude porovnáván s obr. 16, protože podmínky pro modelování tohoto problému byly stejné. Z obr. 26 je patrné, že pro potrubí vedené nad zemí došlo ke zvýšení elektromagnetické indukce do potrubí, neboť vzdálenost mezi místem zkratu na vedení a potrubím vedeném nad zemí byla menší.

Pro další testování toho modelu se předpokládá vliv zpětného proudu, který byl v předchozím případě veden pouze zemnicím lanem. Pro obr. 27 je nastavení zpětného proudu opačné, tudíž veškerý proud vede zemní cestou. Jak již byl výše testován vliv zpětného proudu vedený zemní cestou je zřejmé, že vliv zpětného proudu vedený zemnicí lanem má menší vliv než zpětný proud vedený zemní cestou.



Obr. 27 Vliv zpětného proudu vedený zemnicí cestou

Na obr. 27 je významně ukázán vliv zpětného proudu procházející zemní cestou. V modelu došlo nejen k navýšení hodnot proudové hustoty na potrubí, ale také z něj vyplynulo, že potrubí, které je vedené nejbliže k zemskému povrchu, nabývá nejvyšších hodnot proudové hustoty.

8.3 Výpočet povrchového jevu v oceli

Pro kontrolu modelu v Agrosu2D je spočítána hloubka vniku elektromagnetického pole do potrubí. Ze vzorce je patrná hloubka magnetické indukce do ocelové vnější stěny potrubí. Koeficient hloubky vniku se značí δ . Vypočítá se dle vzorce:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8000 \cdot 500000}} = 1,11 \text{ mm} \quad (8.1)$$

kde je

- δ – koeficient hloubky vniku
- ω – úhlová rychlost proudu
- μ_r – relativní permeabilita
- γ – elektrická vodivost oceli

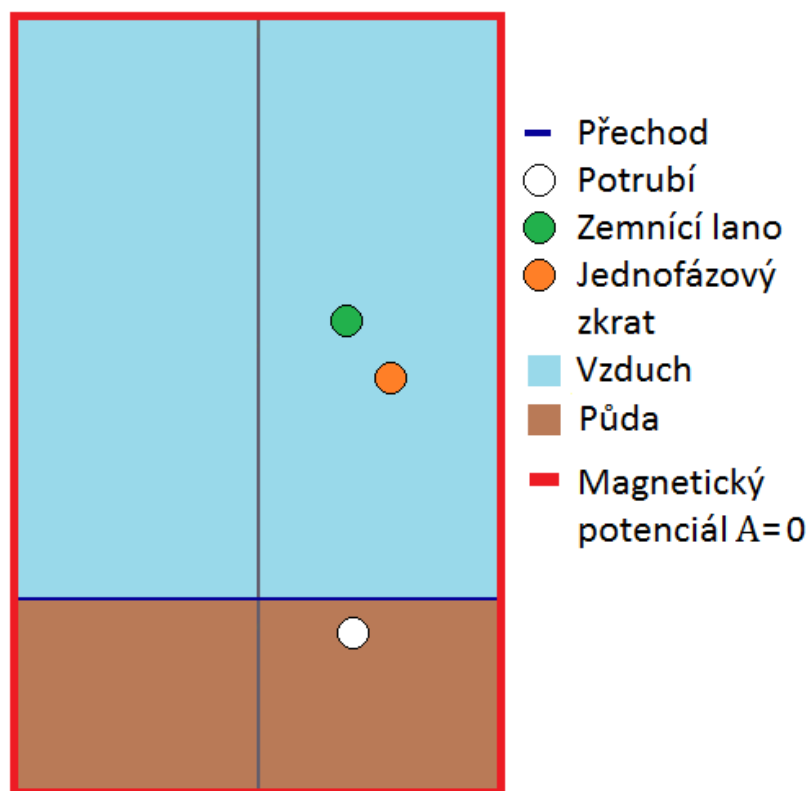
Hloubka se vypočítává ze vztahu vniku o velikosti 1,11 mm. Tento výsledek se shoduje s modelem v Agrosu2D, tudíž pro potrubí s ocelovým krajem stěny o šířce 7 mm je dostačující. Pro stožár typu „Soudek a Kočka“ je použito potrubí s průměrem 273 mm [18].

8.4 Model v Agrosu2D

Druhý model v Agrosu2D je stožár typu „Kočka“ pro 400kV se zemnicím lanem. Zařízení, na kterém je zkoumán vliv jednofázového zkratu je potrubí, které je stejné jako v předchozím případě. Výška stožáru je 24,5 metru včetně zemnicího lana, které se pohybuje 3,5 metry nad vodiči. Zemnicí lano je umístěno na každé straně stožáru tak, aby krylo vodiče před vnějšími vlivy.

8.4.1 Preprocessor

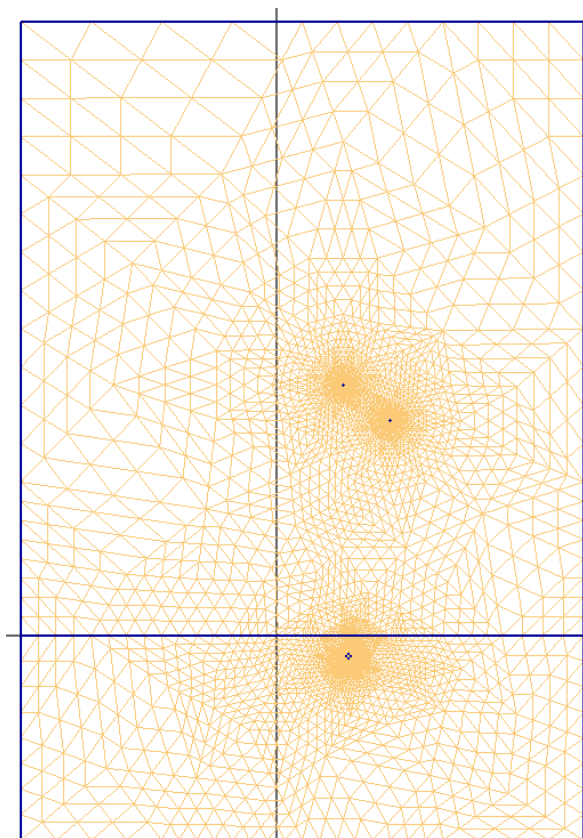
Stejně jako v předchozím případě je dané geometrické uspořádání navrženo v kartézském souřadnicovém systému včetně nastavení materiálových parametrů a okrajových podmínek. Rozvržení pro tento model je patrné z obr. 28.



Obr. 28 Geometrie stožáru typu Kočka

8.4.2 Počáteční síť

V tomto odstavci je představena vytvořená počáteční síť pro stožár typu „Kočka“, která pro výpočet řešení postupuje stejnými kroky jako při vytváření modelu pro stožár „Soudek“.



Obr. 29 Počáteční síť stožáru typu Kočka

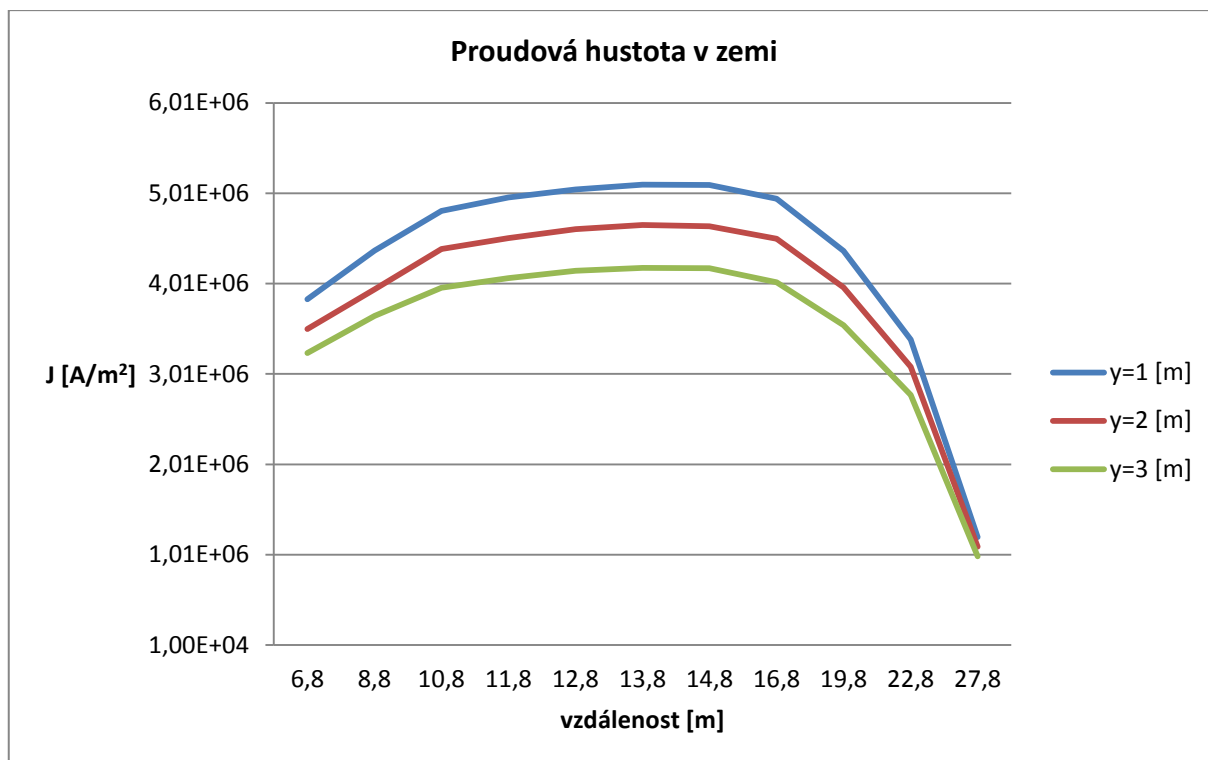
V post-processoru jsou předpokládány stejné vlastnosti řešení modelu „Kočka“ jako v předchozím případě.

8.5 Analýza modelu „Kočka“

Pro model stožáru „Kočka“ jsou modelovány stejné varianty navrhnutých modelů v Agrosu2D jako u stožáru typu „Soudek“, aby mohly být jednotlivé modely následně porovnány co se týče např. možnosti vodivosti půdy, vodivosti oceli, vlivu protékající látky atd.

8.5.1 Vliv hloubky na proudovou hustotu

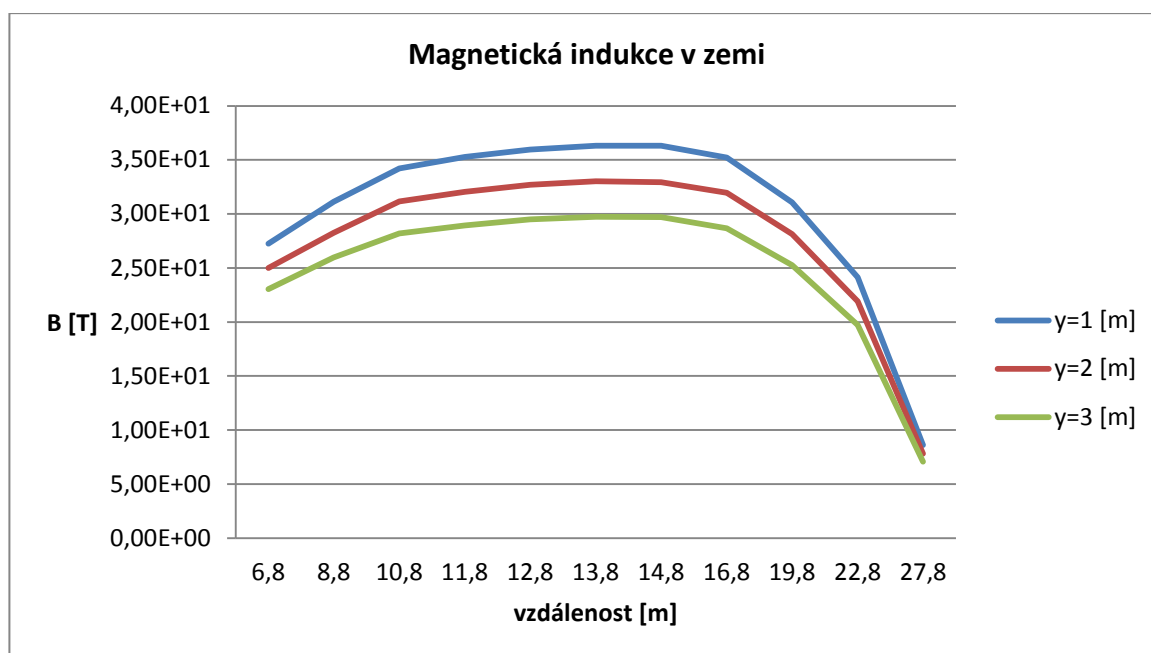
Pro model stožáru typu „Kočka“ je jako první ukázán vliv hloubky na uložené potrubí v zemi při elektrické vodivosti půdy 0,1 [S/m] a potrubím uloženém v 2 metrové hloubce pod zemí.



Obr. 30 Proudová hustota v zemi na stožáru typu Kočka

Na obr. 30 je vidět testování vlivu hloubky proudovou hustotu v zemi. Z modelu je patrný klesající charakter stejně jako u prvního modelu. K nejvyšším hodnotám dochází opět tehdy, pokud potrubí uložíme přímo pod místem poruchy. Jedná se o stožár zvláště vysokého napětí, kterým je vedeno napětí 400kV. Na obr. 30 je patrné navýšení proudové hustoty na potrubí právě z důvodu zvýšeného napětí na vedení.

Pro porovnání je na obr. 31 testován vliv hloubky uložení potrubí na magnetickou indukci. Je opět patrný klesající charakter magnetické indukce jako u proudové hustoty, a proto pro další ukázky budou prezentovány pouze výsledky řešení pro proudovou hustotu.

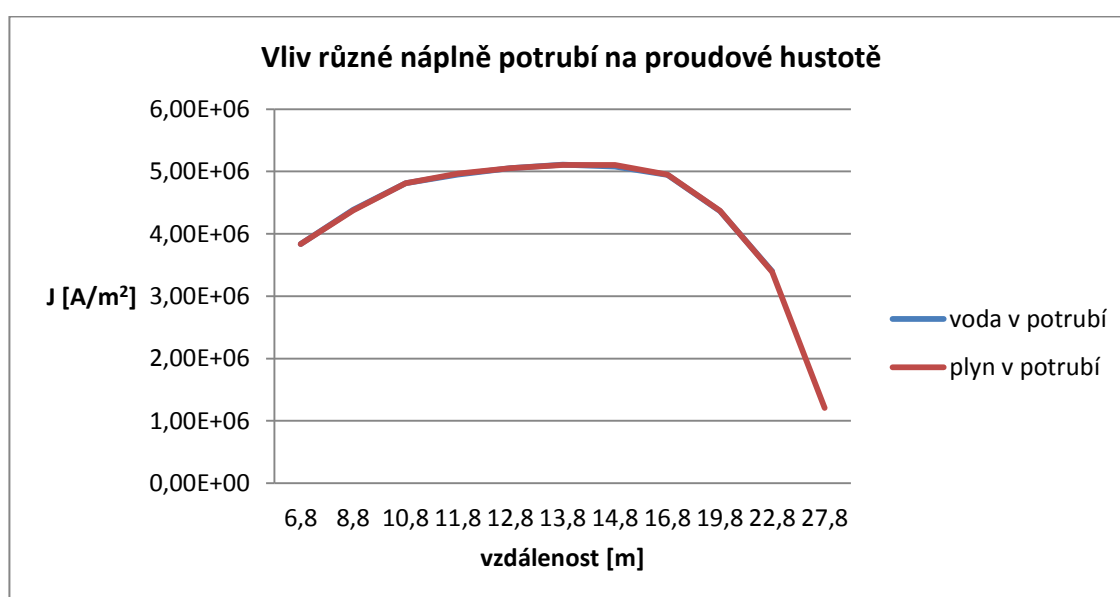


Obr. 31 Vliv hloubky uložení potrubí na magnetickou indukci

8.5.2 Vliv proudové hustoty na náplň potrubí

V tomto odstavci je testován vliv náplně v potrubí. Jako náplň bude použita voda a vzduch (plyn), jedná se tedy o porovnání vodovodního a plynového potrubí. V modelu stožáru typu „Soudek“ jsou výsledky shodné pro oba druhy potrubí. I tento model byl namodelován pro uložení potrubí ve 2 metrové hloubce při elektrické vodivosti půdy 0,1 [S/m].

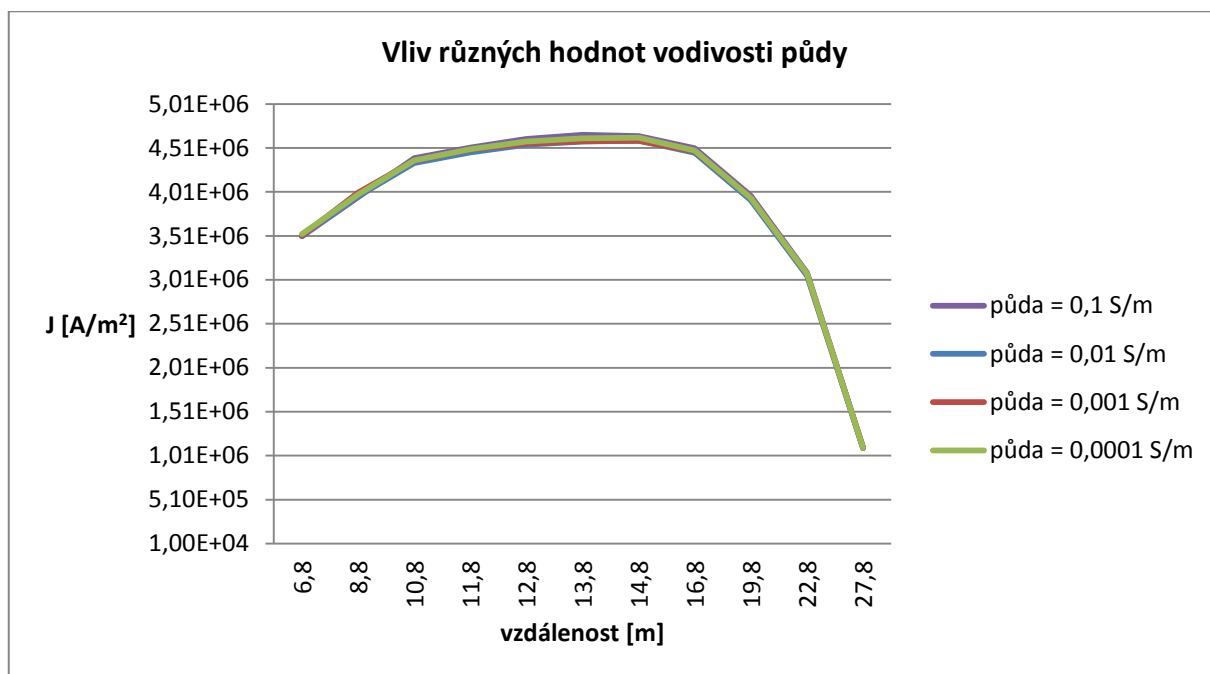
Jako již z testu vyplývá, vliv náplně v potrubí nemá vliv na celkovou proudovou hustotu. Na obr. 32 je ukázán grafický výsledek numerického výsledku.



Obr. 32 Vliv různých náplní v potrubí

8.5.3 Vliv vodivosti půdy na potrubí

Ve třetím modelu stožáru „Kočka“ je ukázán vliv různých elektrických vodivostí půdy. Z obr. 33 je patrné, že vliv různých vodivostí půdy nemá vliv na elektromagnetickou indukci do potrubí.



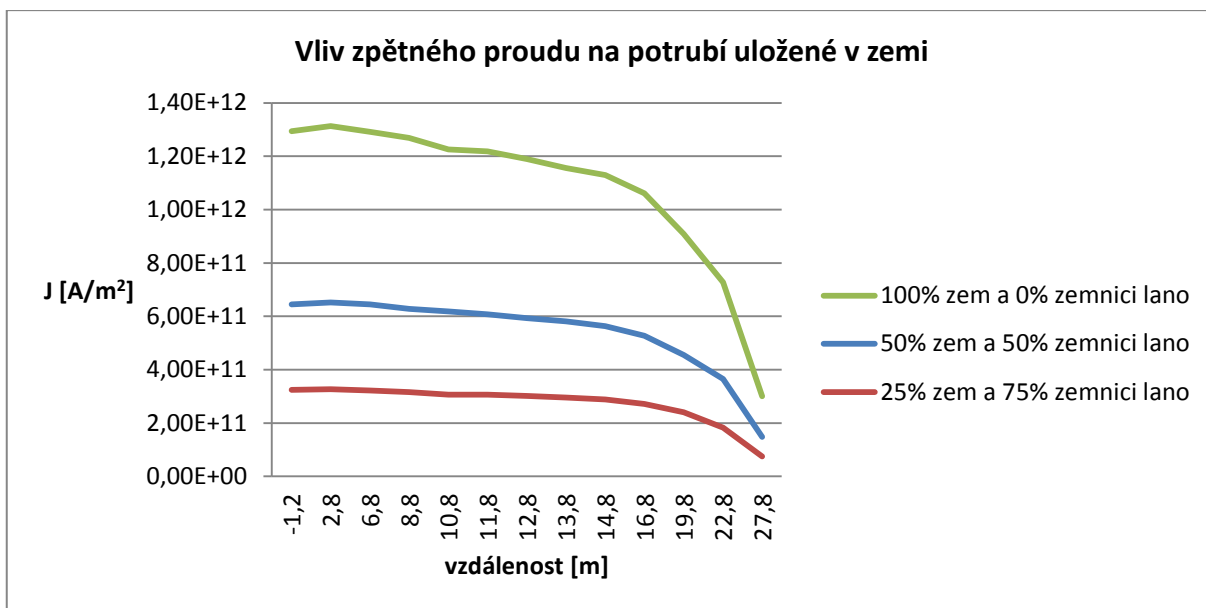
Obr. 33 Vliv různých elektrických vodivostí půdy

8.5.4 Vliv zpětného proudu

V následném modelu bude zkoumáno rozložení zpětného proudu mezi zemní cestou a zemnicím lanem. Podobně jako u stožáru typu „Soudek“ jsou namodelovány čtyři nejpravděpodobnější možnosti zpětných proudů, které mohou nastat při rozložení zpětného proudu v procentním poměru mezi zemní cestou a zemnicím lano v těchto poměrech:

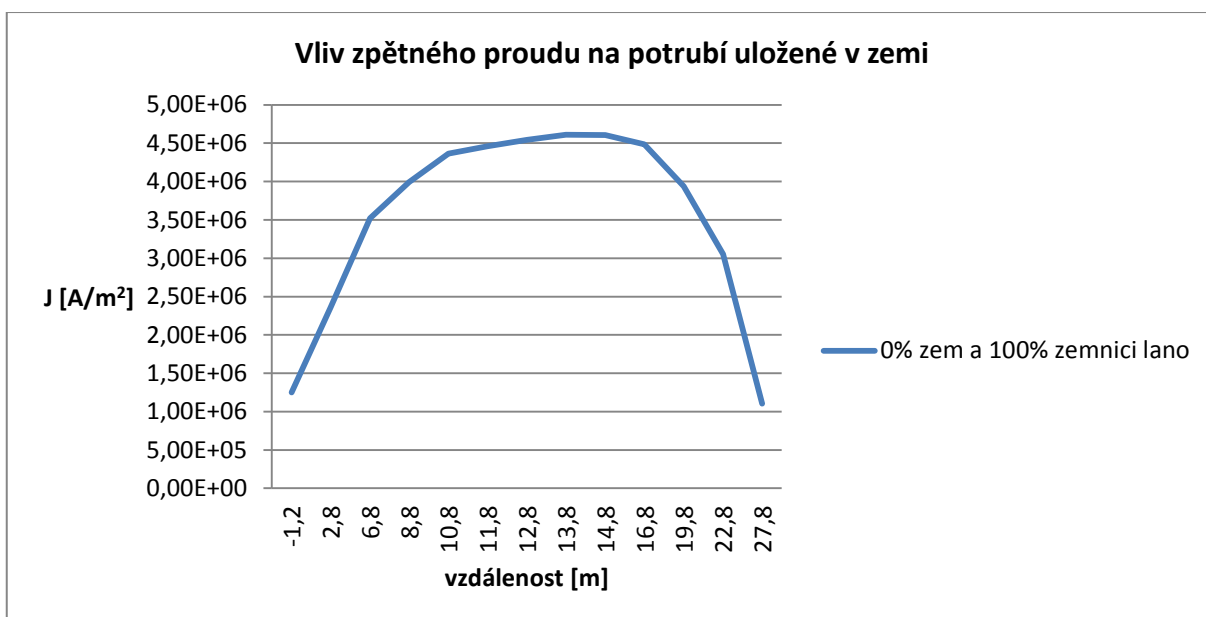
- 100% zemní cestou a 0% zemnicím lanem
- 50% zemní cestou a 50% zemnicím lanem
- 25% zemní cestou a 75% zemnicím lanem
- 0% zemní cestou a 100% zemnicím lanem

V modelu je potrubí uložené ve 2 metrové hloubce při vodivosti 0,1 [S/m].



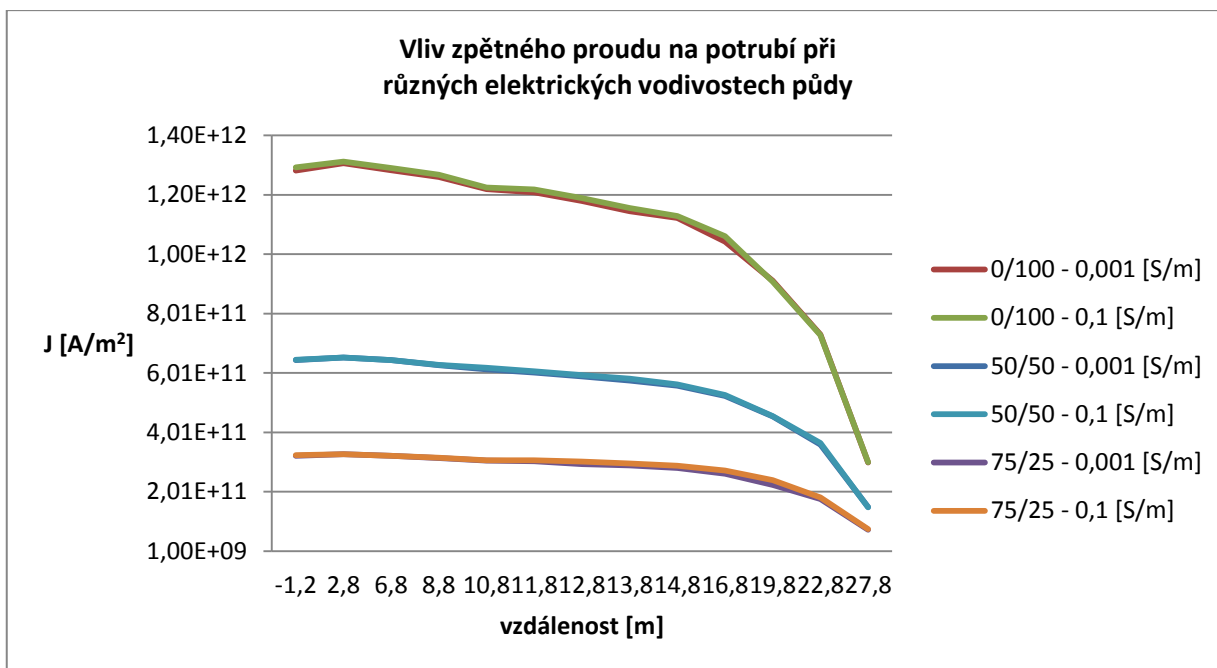
Obr. 34 Vliv různých elektrických vodivostí půdy

Při porovnání stožárů „Soudek“ a „Kočka“ je patrný stejný charakter křivek jako na obr. 34. Jak již bylo vysvětleno, dochází k navýšení maximální hodnoty proudové hustoty z důvodu přenosu zvláště vysokého napětí na vedení.



Obr. 35 Vliv různých elektrických vodivostí půdy

Na obr. 35 je ukázána křivka zpětného proudu vedená zemnicím lanem, která je odlišná od zpětného proudu vedeného zemní cestou. Podobné křivky byly namodelovány také u stožáru typu „Soudek“.

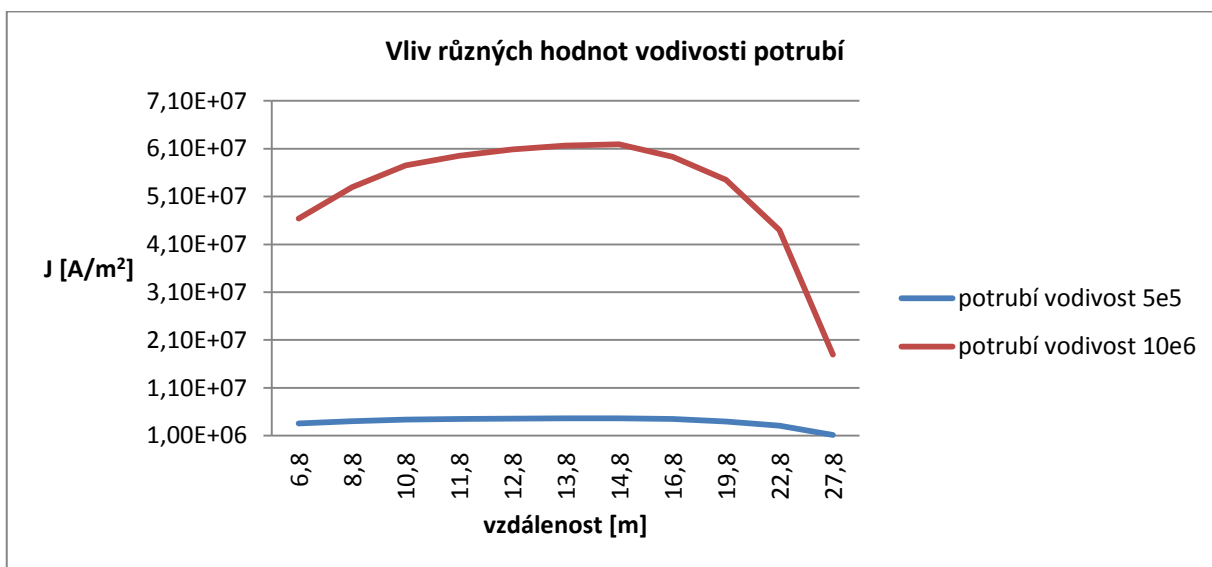


Obr. 36 Porovnání zpětného proudu dle elektrických vodivostí půdy

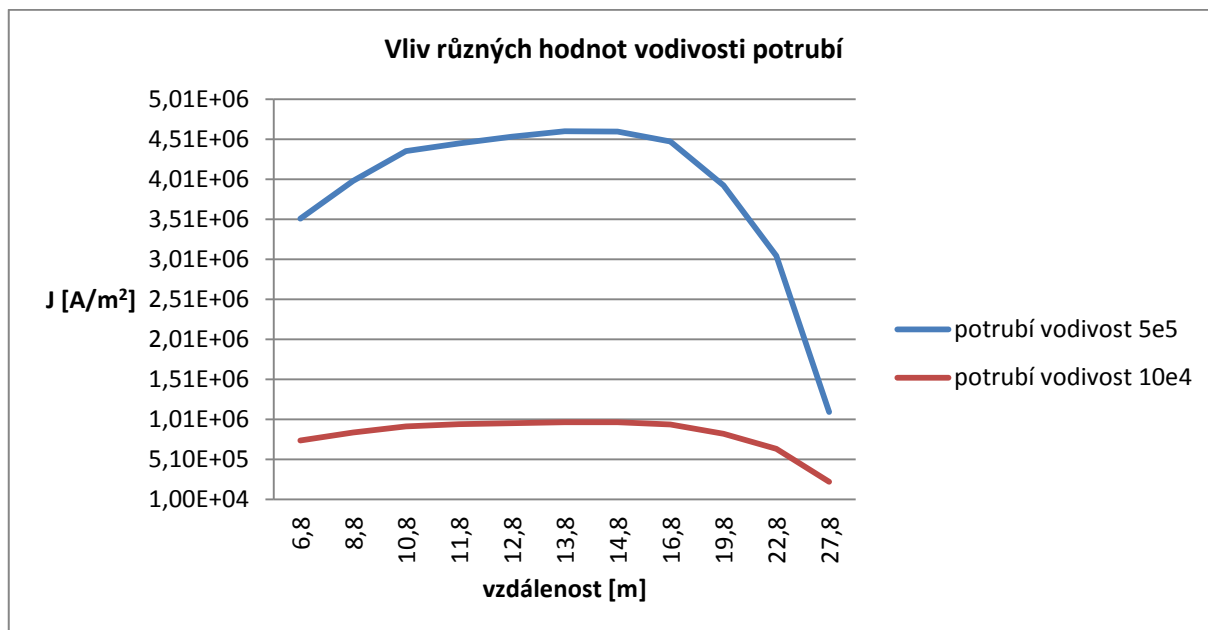
Na obr. 36 je ukázán vliv zpětných proudů závislý na elektrických vodivostech půdy. Vliv různých vodivostí půdy na naměření celkové proudové hustoty není patrný ani z předešlých testů.

8.5.5 Vliv elektrické vodivosti potrubí

Další model testuje vliv různých vodivostí potrubí. Hodnoty elektrické vodivosti potrubí se pohybují od $10e4$ do $10e6$ [S/m]. Jako v modelu stožáru „Soudek“ tak i zde bylo patrné, že s nárůstem elektrické vodivosti potrubí je celková proudová hustota na potrubí vyšší. Na obr. 37 a obr. 38 je ukázáno grafické znázornění výsledků z měření.



Obr. 37 Vliv vyšší elektrické vodivosti potrubí

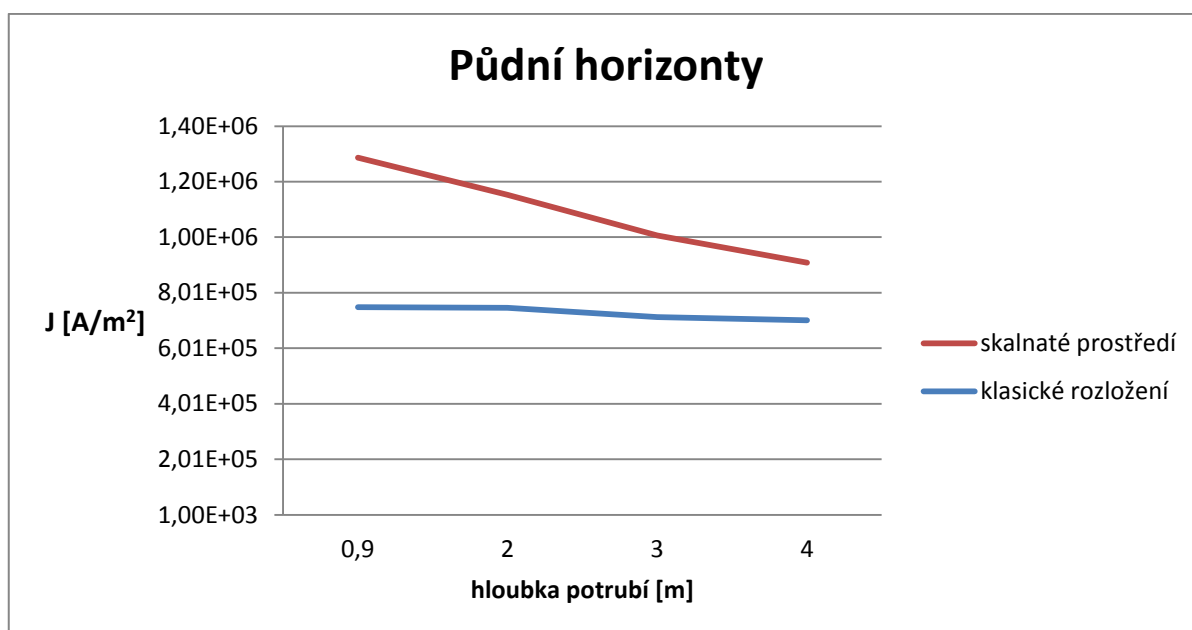


Obr. 38 Vliv nižší elektrické vodivosti potrubí

8.5.6 Vliv rozložení půdních horizontů

Předposlední test modelu „Kočka“ pojednává o vlivu rozložení půdních horizontů. Zde je testováno rozložení půdy v klasickém stylu a rozložení půdy ve skalnatém podloží. Parametry a nastavení programu Agros2D jsou stejné jako při měření na stožáru „Soudek“.

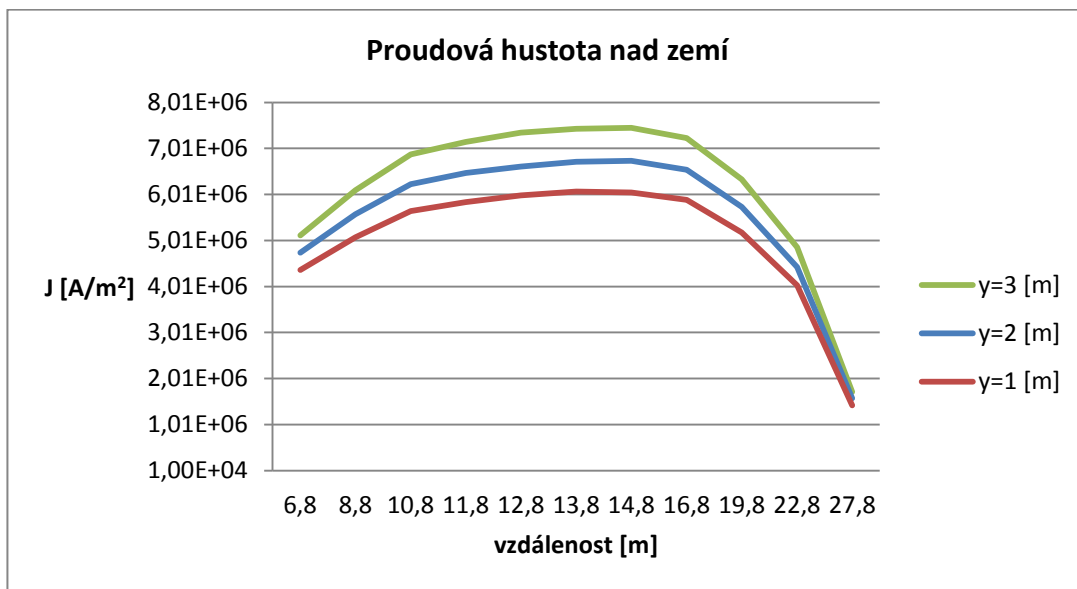
Měření modelu je prováděno na vertikální ose, kde je potrubí uloženo od 1 do 4 metrů pod zemí. Na obr. 39 je ukázáno, že skalnaté prostředí napomáhá k lepší magnetické indukci do potrubí, což je stejné řešení jako u stožáru „Soudek“.



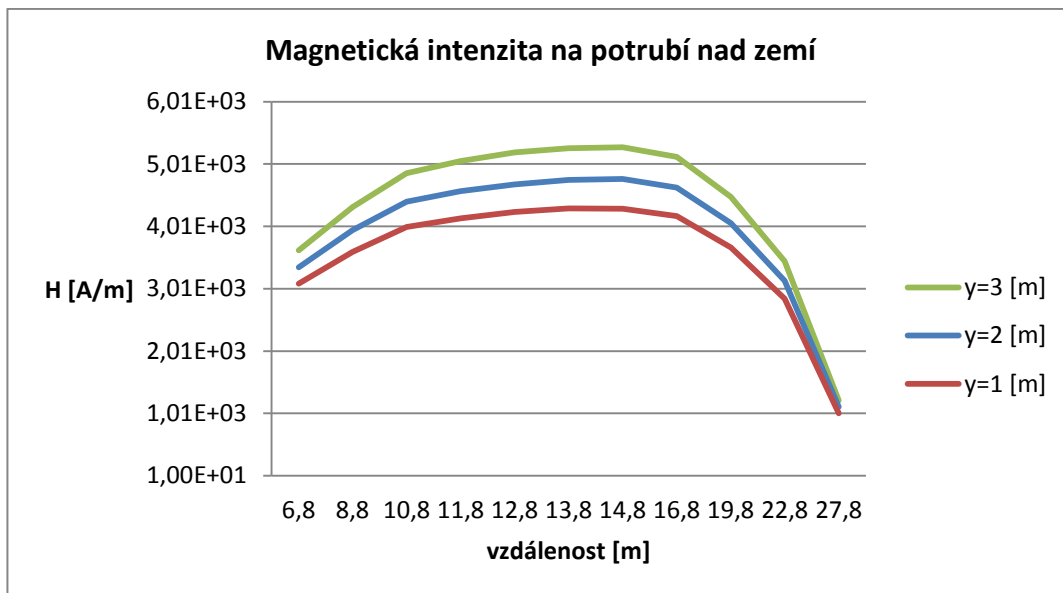
Obr. 39 Rozložení půdních horizontů

8.5.7 Potrubí vedené nad zemí

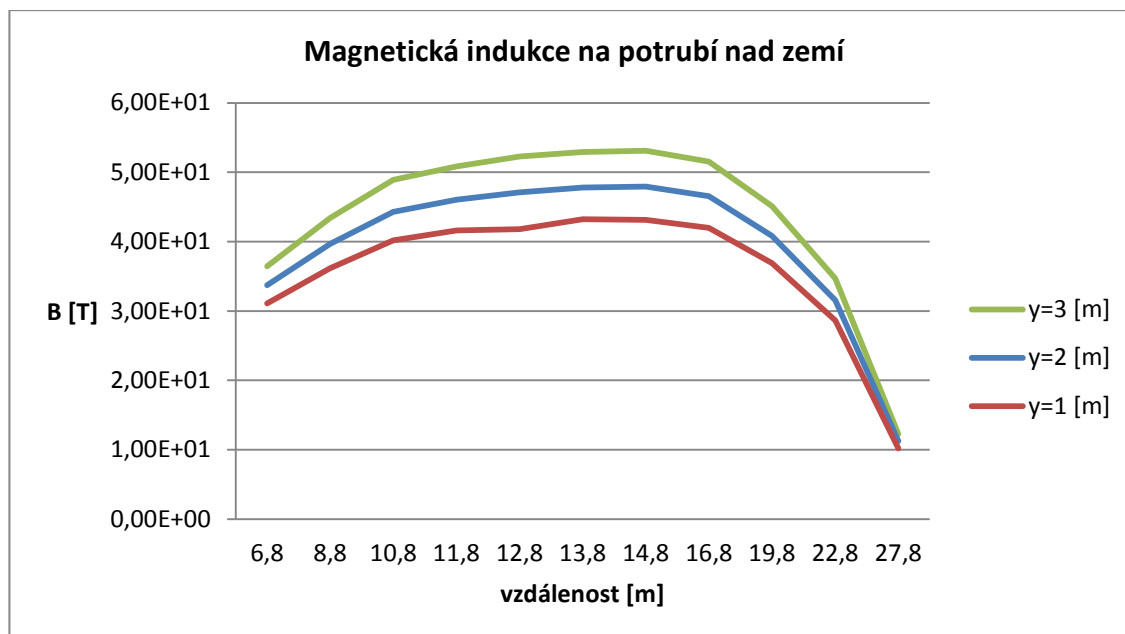
Poslední část je věnována potrubí, které je vedeno nad zemským povrchem. Na obr. 40 je ukázán model pro tři výškové úrovně potrubí v rozmezí od 1 do 3 metrů nad zemí. Zde jsou představeny modely celkové proudové hustoty, magnetické intenzity a magnetické indukce.



Obr. 40 Rozložení půdních horizontů

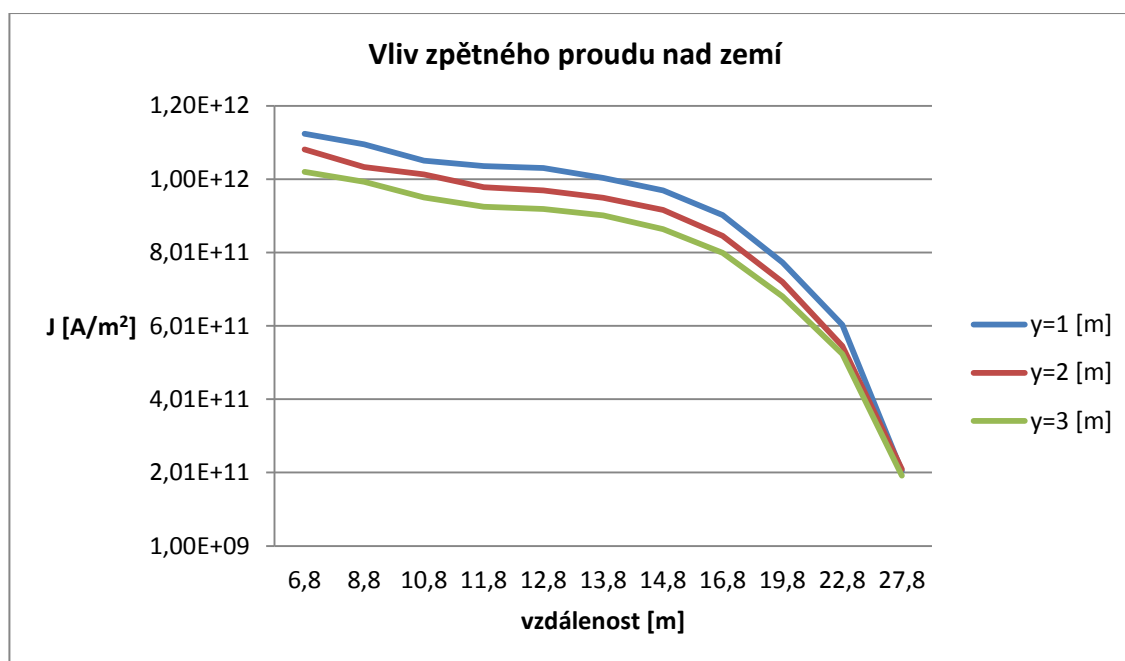


Obr. 41 Rozložení půdních horizontů



Obr. 42 Rozložení půdních horizontů

Z obrázků je patrné, že jednotlivé charakteristiky mají stejný průběh pro všechny měřené proměnné. Jak již bylo řečeno, k nejvyšším hodnotám dochází tehdy, pokud je potrubí přímo pod stožárem. Na obr. 43 je ukázán vliv zpětného proudu, který je vedený zemnicí cestou při porovnání s obr. 40, kde je použito pouze zemnicí lano. Je zde patrný obrovský vliv zpětného proudu vedený zemní cestou.



Obr. 43 Rozložení půdních horizontů

9 Závěr

Práce byla zaměřena na vliv jednofázového zkratu na zařízení na vedení uložená v zemi. Zabýval jsem se zejména řešením elektromagnetického pole na zařízeních uložených v zemi, speciálně se zaměřením na vedení velmi vysokého a zvláště vysokého napětí. Obsahem mé práce je též zaměření na vliv zpětného proudu mezi zemní cestou a zemnicím lanem při jednofázovém zkratu na vedení.

Pro řešení matematického modelu jsem plně využíval výpočetní program Agros2D, který je vyvíjen Západočeskou univerzitou. Předností tohoto programu je jeho snadné a rychlé ovládání společně s jeho volnou licencí, díky čemuž jsem mohl s programem pracovat i z domova.

V své práci jsem se zaměřil dva různé typy stožárů, přesněji na stožáry typu „Soudek“ a „Kočka“. Tyto typy stožárů jsem si vybral hlavně z důvodu jejich odlišných napěťových úrovní. Stožár typu „Soudek“ je ze skupiny velmi vysokého napětí a „Kočka“ ze zvláště vysokého napětí. Součástí mé práce je též zaměření se na zařízení uložená v zemi, mezi něž patří plynové a vodovodní potrubí. Práce nezahrnuje všechna mnou naměřená data z důvodu jejich velkého množství. Ostatní neuvedená data jsou prezentována v příloze. V práci jsou prezentovány pouze vybrané elektromagnetické veličiny.

V závěru jsou shrnuty nejdůležitější vlivy, které mohou mít vliv na zařízení uložená v zemi. Z několika modelů bylo zjištěno, že k nejvyšším naměřeným hodnotám dochází tehdy, pokud je zařízení umístěno přímo pod stožárem. K největšímu vlivu na zařízení dochází při průtoku zpětného proudu zemní cestou. Rozměry vnějšího pláště jsou pro ocelové potrubí dostačující, jelikož hloubka vniku elektromagnetického pole je v jednotkách milimetrů.

Záměrem mé práce bylo zkoumání elektromagnetického vztahu mezi zařízením umístěným v zemi a stožárem.

Seznam literatury

- [1] Karban, P., Mach, F., Kůs, P., Pánek, D., Doležel, I.: *Numerical solution of coupled problems using code Agros2D*, Computing, 2013, Volume 95, Issue 1 Supplement
- [2] KTE/ATE. *Aplikace teoretické elektrotechniky*. 2013. vyd. ZČU Plzeň.
- [3] KARBAN, Pavel. [online]. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>
- [4] BURBAKI, N. [online]. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/wiki/1fZkrat>
- [5] VOKÁL, Ing. Josef. *Výpočty zkratů v technické praxi* [online]. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/Vok_%20zkraty_%20prednaska_textFEL.pdf?version=1
- [6] Vznik zkratů: Základní pojmy. [online]. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/zkrat/dokumenty/REE_pr_zkraty.pdf
- [7] MAYER, Prof. Ing. Daniel, DrSc. *Teorie elektromagnetického pole*. 2001. vyd. Tiskové středisko ZČU
- [8] MAYER, Prof. Ing. Daniel, DrSc. a Ing. Bohuš, CSc. ULRYCH. *Základy numerických řešení elektrických a magnetických polí*. 2001. vyd. SNTL, 1988
- [9] VOJTĚCH, Prof. Dr. Ing. Dalibor. *Elektrochemická protikorozní ochrana*. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/o_elchem.htm#obr14
- [10] GAVENDOVÁ, Lenka. *Pasivace a korozní ochrana kovových materiálů*. 2010. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/269435/prif_b/bc_prace.pdf
- [11] VARGA, Prof. Ing. Augustín, CSc. *Protikorozní ochrana*. [online]. [cit. 2013-12-03]. Dostupné z: <http://people.tuke.sk/augustin.varga/Texty/Protikorozna%20ochrana.pdf>
- [12] ROMÁNEK, Ivo. *ArcelorMittal Tubular Products Ostrava a. s.* [online]. 23.10.2013. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://tvstav.cz/clanek/2810-arcelormittal-tubular-products-ostrava-a-s>
- [13] PROCHÁZKA, Radek. *Stožáry VVN (III): Konstrukční řešení stožárů*. [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4192-stozary-vvn-iii>

- [14] LABOUTKA, Karel a Tomáš SUCHÁNEK. Ocelové trubky závitové běžné a bezešvé. [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/16-ocelove-trubky-zavitove-bezne-a-bezesve>
- [15] Míka, S., Příkryl, P., Brandner, M.: Speciální numerické metody. Numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice, Plzeň, Vydavatelský servis, 2006
- [16] KOUDELKA, Ctirad. MĚŘENÍ REZISTIVITY PŮDY. In: [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Magisterske%20nav/navody/Mereni%20rezistivity.pdf>
- [17] MILKA, Jiří. Energetické problémy indukčních elektrotepelných zařízení: VUT v Brně. In: [online]. 2001 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7624/bpMILKA2011.pdf?sequence=1>

10 Seznam příloh

A Tabulky pro hodnoty stožáru typu „Soudek“

Hodnoty pro vedené potrubí v pod zemí pro jednotlivé výškové úrovně

Tab. 1 Potrubí v 1 metrové hloubce

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	7,82E+05	8,03E+05	8,10E+05	8,16E+05	8,15E+05	7,81E+05	7,47E+05	6,40E+05	3,82E+05	8,74E+04
B [T]	5,58E+00	5,72E+00	5,78E+00	5,82E+00	5,81E+00	5,59E+00	5,31E+00	4,56E+00	2,76E+00	6,41E-01
H [A/m]	5,55E+02	5,69E+02	5,75E+02	5,79E+02	5,77E+02	5,56E+02	5,28E+02	4,54E+02	2,75E+02	6,38E+01

Tab. 2 Potrubí ve 2 metrové hloubce

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	7,26E+05	7,38E+05	7,43E+05	7,51E+05	7,42E+05	7,23E+05	6,79E+05	5,84E+05	3,54E+05	8,46E+04
B [T]	5,17E+00	5,26E+00	5,30E+00	5,35E+00	5,31E+00	5,16E+00	4,85E+00	4,17E+00	2,55E+00	6,07E-01
H [A/m]	5,14E+02	5,23E+02	5,28E+02	5,32E+02	5,28E+02	5,13E+02	4,82E+02	4,15E+02	2,53E+02	6,04E+01

Tab. 3 Potrubí ve 3 metrové hloubce

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	6,68E+05	6,79E+05	6,82E+05	6,86E+05	6,82E+05	6,67E+05	6,25E+05	5,37E+05	3,34E+05	7,68E+04
B [T]	4,75E+00	4,83E+00	4,87E+00	4,90E+00	4,87E+00	4,74E+00	4,45E+00	3,83E+00	2,37E+00	5,54E-01
H [A/m]	4,73E+02	4,81E+02	4,84E+02	4,87E+02	4,84E+02	4,71E+02	4,43E+02	3,81E+02	2,36E+02	5,51E+01

Vodovodní potrubí ve 2 metrové výšce.

Tab. 4 Vodovodní potrubí

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	7,28E+05	7,38E+05	7,44E+05	7,51E+05	7,44E+05	7,26E+05	6,83E+05	5,85E+05	2,34E+05	8,32E+04
B [T]	5,17E+00	5,26E+00	5,31E+00	5,35E+00	5,31E+00	5,17E+00	4,87E+00	4,18E+00	2,58E+00	6,01E-01
H [A/m]	5,14E+02	5,23E+02	5,28E+02	5,33E+02	5,28E+02	5,14E+02	4,84E+02	4,16E+02	1,94E+02	5,98E+01

Hodnoty pro zpětný proud:

- 50% zemní cesta a 50% zemnicí lano

Tab. 5 Potrubí v pod zemí, vodivost půdy 0,1 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	4,02E+11	4,02E+11	3,95E+11	3,93E+11	3,85E+11	3,69E+11	3,49E+11	3,11E+11	2,13E+11	6,059e+10
B [T]	2,86E+06	2,86E+06	2,82E+06	2,80E+06	2,73E+06	2,62E+06	2,48E+06	2,21E+06	1,52E+06	4,325e+05
H [A/m]	2,85E+08	2,84E+08	2,80E+08	2,79E+08	2,72E+08	2,61E+08	2,47E+08	2,20E+08	1,51E+08	4,303e+07

Tab. 6 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,001 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	4,03E+11	4,02E+11	3,98E+11	3,96E+11	3,84E+11	3,69E+11	3,50E+11	3,10E+11	2,14E+11	6,105e+10
B [T]	2,87E+06	2,86E+06	2,83E+06	2,81E+06	2,73E+06	2,63E+06	2,49E+06	2,21E+06	1,52E+06	4,34E+05
H [A/m]	2,85E+08	2,84E+08	2,82E+08	2,80E+08	2,71E+08	2,61E+08	2,47E+08	2,19E+08	1,52E+08	4,32E+07

- 25% zemní cesta a 75% zemnicí lano

Tab. 7 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,1 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	2,02E+11	2,01E+11	1,97E+11	1,96E+11	1,91E+11	1,85E+11	1,74E+11	1,54E+11	1,06E+11	3,06E+10
B [T]	1,44E+06	1,43E+06	1,41E+06	1,40E+06	1,36E+06	1,31E+06	1,24E+06	1,10E+06	7,57E+05	2,18E+05
H [A/m]	1,43E+08	1,42E+08	1,40E+08	1,39E+08	1,35E+08	1,31E+08	1,23E+08	1,09E+08	7,53E+07	2,16E+07

Tab. 8 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,001 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	2,02E+11	2,01E+11	2,00E+11	1,96E+11	1,91E+11	1,84E+11	1,75E+11	1,56E+11	1,06E+11	3,09E+10
B [T]	1,44E+06	1,43E+06	1,42E+06	1,40E+06	1,36E+06	1,31E+06	1,24E+06	1,11E+06	7,58E+05	2,19E+05
H [A/m]	1,43E+08	1,42E+08	1,41E+08	1,39E+08	1,35E+08	1,30E+08	1,24E+08	1,10E+08	7,54E+07	2,18E+07

- 100% zemní cesta a 0% zemnicí lano

Tab. 9 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,1 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	7,97E+11	8,01E+11	7,91E+11	7,67E+11	7,58E+11	7,28E+11	6,84E+11	6,18E+11	4,21E+11	1,19E+11
B [T]	5,70E+06	5,70E+06	5,64E+06	5,52E+06	5,42E+06	5,21E+06	4,91E+06	4,40E+06	3,01E+06	8,55E+05
H [A/m]	5,67E+08	5,67E+08	5,61E+08	5,49E+08	5,39E+08	5,18E+08	4,88E+08	4,38E+08	3,00E+08	8,50E+07

Tab. 10 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,001 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	8,07E+11	8,05E+11	7,98E+11	7,91E+11	7,70E+11	7,38E+11	6,98E+11	6,22E+11	4,28E+11	1,22E+11
B [T]	5,74E+06	5,72E+06	5,67E+06	5,62E+06	5,47E+06	5,25E+06	4,97E+06	4,42E+06	3,05E+06	8,70E+05
H [A/m]	5,71E+08	5,69E+08	5,64E+08	5,59E+08	5,44E+08	5,22E+08	4,94E+08	4,40E+08	3,03E+08	8,65E+07

- 0% zemní cesta a 100% zemní lano

Tab. 11 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,1 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	7,28E+05	7,40E+05	7,50E+05	7,31E+05	7,24E+05	7,07E+05	6,75E+05	5,75E+05	3,57E+05	7,87E+04
B [T]	5,18E+00	5,26E+00	5,33E+00	5,27E+00	5,21E+00	5,09E+00	4,83E+00	4,14E+00	2,56E+00	5,83E-01
H [A/m]	5,15E+02	5,23E+02	5,31E+02	5,25E+02	5,28E+02	5,07E+02	4,81E+02	4,12E+02	2,55E+02	5,80E+01

Tab. 12 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,001 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	7,25E+05	7,37E+05	7,50E+05	7,55E+05	7,45E+05	7,25E+05	6,81E+05	5,87E+05	3,61E+05	8,42E+04
B [T]	5,16E+00	5,25E+00	5,33E+00	5,37E+00	5,32E+00	5,16E+00	4,86E+00	4,19E+00	2,58E+00	6,06E-01
H [A/m]	5,14E+02	5,23E+02	5,31E+02	5,34E+02	5,29E+02	5,13E+02	4,83E+02	4,16E+02	2,56E+02	6,02E+01

Hodnoty pro různé elektrické vodivosti půdy:

Tab. 13 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,01 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	7,17E+05	7,31E+05	7,49E+05	7,51E+05	7,48E+05	7,22E+05	6,82E+05	5,89E+05	3,51E+05	8,37E+04
B [T]	5,13E+00	5,23E+00	5,33E+00	5,35E+00	5,33E+00	5,15E+00	4,86E+00	4,19E+00	2,54E+00	6,04E-01
H [A/m]	5,10E+02	5,20E+02	5,30E+02	5,32E+02	5,30E+02	5,12E+02	4,84E+02	4,17E+02	2,52E+02	6,00E+01

Tab. 14 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,001 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	7,25E+05	7,37E+05	7,50E+05	7,55E+05	7,45E+05	7,25E+05	6,81E+05	5,87E+05	3,61E+05	8,42E+04
B [T]	5,16E+00	5,25E+00	5,33E+00	5,37E+00	5,32E+00	5,16E+00	4,86E+00	4,19E+00	2,58E+00	6,06E-01
H [A/m]	5,14E+02	5,23E+02	5,31E+02	5,34E+02	5,29E+02	5,13E+02	4,83E+02	4,16E+02	2,56E+02	6,02E+01

Tab. 15 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,0001 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	7,26E+05	7,34E+05	7,49E+05	7,51E+05	7,48E+05	7,28E+05	6,85E+05	5,89E+05	3,59E+05	8,32E+04
B [T]	5,17E+00	5,24E+00	5,33E+00	5,35E+00	5,33E+00	5,17E+00	4,87E+00	4,19E+00	2,57E+00	6,02E-01
H [A/m]	5,14E+02	5,21E+02	5,30E+02	5,33E+02	5,30E+02	5,15E+02	4,85E+02	4,17E+02	2,56E+02	5,99E+01

Hodnoty vodivosti potrubí:

Tab. 16 Potrubí v pod zemi, vodivost potrubí 5e5 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	7,26E+05	7,38E+05	7,43E+05	7,51E+05	7,42E+05	7,23E+05	6,79E+05	5,84E+05	3,54E+05	8,46E+04
B [T]	5,17E+00	5,26E+00	5,30E+00	5,35E+00	5,31E+00	5,16E+00	4,85E+00	4,17E+00	2,55E+00	6,07E-01
H [A/m]	5,14E+02	5,23E+02	5,28E+02	5,32E+02	5,28E+02	5,13E+02	4,82E+02	4,15E+02	2,53E+02	6,04E+01

Tab. 17 Potrubí v pod zemi, vodivost potrubí 10e4 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	1,50E+05	1,57E+05	1,55E+05	1,53E+05	1,53E+05	1,44E+05	1,41E+05	1,22E+05	7,54E+04	1,77E+04
B [T]	2,65E+00	2,76E+00	2,74E+00	2,71E+00	2,71E+00	2,56E+00	2,49E+00	2,15E+00	1,33E+00	3,11E-01
H [A/m]	2,63E+02	2,74E+02	2,72E+02	2,70E+02	2,70E+02	2,54E+02	2,47E+02	2,14E+02	1,32E+02	3,10E+01

Tab. 18 Potrubí v pod zemi, vodivost potrubí 10e6 [S/m]

x [m]	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	9,67E+06	9,83E+06	9,98E+06	1,00E+07	1,01E+07	9,65E+06	9,16E+06	8,06E+06	5,24E+06	1,421e+06
B [T]	5,79E+00	5,90E+00	5,99E+00	6,03E+00	6,03E+00	5,84E+00	5,55E+00	4,87E+00	3,17E+00	8,807e-01
H [A/m]	5,76E+02	5,87E+02	5,95E+02	5,99E+02	6,00E+02	5,81E+02	5,52E+02	4,84E+02	3,15E+02	8,760e+01

Hodnoty pro vertikální měření půdy:

Tab. 19 Klasické rozložení půdy

y [m]	0,8	2	3	4
J [A/m ²]	8,52E+05	7,82E+05	7,21E+05	6,63E+05
B [T]	1,56E+00	1,43E+00	1,32E+00	1,21E+00
H [A/m]	1,56E+02	1,42E+02	1,31E+02	1,21E+02

Tab. 20 Skalnaté prostředí

y [m]	0,8	2	3	4
J [A/m ²]	4,68E+06	4,28E+06	3,90E+06	3,59E+06
B [T]	8,59E+00	7,83E+00	7,23E+00	6,67E+00
H [A/m]	8,55E+02	7,79E+02	7,19E+02	6,63E+02

Potrubí vedené nad zemí pro 100% zpětného proudu vedeného zemnicím lanem:

Tab. 21 Potrubí nad zemí ve výšce 1 metr

x [m]	0,8	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	9,05E+05	9,30E+05	9,54E+05	9,69E+05	9,77E+05	9,72E+05	9,38E+05	8,90E+05	7,63E+05	4,69E+05	1,10E+05
B [T]	6,42E+00	6,60E+00	6,77E+00	6,88E+00	6,94E+00	6,91E+00	6,69E+00	6,32E+00	5,42E+00	3,33E+00	7,84E-01
H [A/m]	6,38E+02	6,57E+02	6,73E+02	6,84E+02	6,90E+02	6,88E+02	6,65E+02	6,29E+02	5,40E+02	3,31E+02	7,80E+01

Tab. 22 Potrubí nad zemí ve výšce 2 metr

x [m]	0,8	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	9,76E+05	1,01E+06	1,03E+06	1,06E+06	1,06E+06	1,06E+06	1,03E+06	9,64E+05	8,23E+05	5,07E+05	1,12E+05
B [T]	6,93E+00	7,15E+00	7,31E+00	7,49E+00	7,55E+00	7,53E+00	7,31E+00	6,86E+00	5,87E+00	3,60E+00	8,19E-01
H [A/m]	6,89E+02	7,11E+02	7,28E+02	7,45E+02	7,51E+02	7,49E+02	7,27E+02	6,83E+05	5,84E+02	3,58E+02	8,15E+01

Tab. 23 Potrubí nad zemí ve výšce 3 metr

x [m]	0,8	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	1,06E+06	1,09E+06	1,12E+06	1,13E+06	1,16E+06	1,16E+06	1,12E+06	1,06E+06	9,03E+05	5,37E+05	1,28E+05
B [T]	7,50E+00	7,74E+00	7,94E+00	8,07E+00	8,22E+00	8,22E+00	7,95E+00	7,50E+00	6,41E+00	3,85E+00	1,04E+00
H [A/m]	7,46E+02	7,70E+02	7,90E+02	8,03E+02	8,17E+02	8,18E+02	7,91E+02	7,46E+02	6,37E+02	3,83E+02	1,03E+02

Potrubí vedené nad zemí pro 100% zpětného proudu vedeného zemní cestou:

Tab. 24 Potrubí nad zemí ve výšce 1 metr

x [m]	0,8	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	6,99E+11	6,96E+11	6,94E+11	6,88E+11	6,79E+11	6,59E+11	6,28E+11	5,93E+11	5,19E+11	3,43E+11	8,93E+10
B [T]	5,31E+06	5,29E+06	5,27E+06	5,23E+06	5,16E+06	5,01E+06	4,78E+06	4,22E+06	3,70E+06	2,45E+06	6,38E+05
H [A/m]	5,28E+08	5,26E+08	5,24E+08	5,20E+08	5,13E+08	4,98E+08	4,75E+08	4,20E+08	3,68E+11	2,43E+08	6,34E+07

Tab. 25 Potrubí nad zemí ve výšce 2 metr

x [m]	0,8	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	6,63E+11	6,60E+11	6,57E+11	6,53E+11	6,46E+11	6,24E+11	5,92E+11	5,54E+11	4,86E+11	3,15E+11	8,03E+10
B [T]	4,70E+06	4,69E+06	4,66E+06	4,63E+06	4,58E+06	4,43E+06	4,21E+06	3,95E+06	3,46E+06	2,25E+06	5,73E+05
H [A/m]	4,68E+08	4,66E+08	4,64E+08	4,60E+08	4,56E+08	4,40E+08	4,19E+08	3,93E+08	3,44E+08	2,24E+08	5,70E+07

Tab. 26 Potrubí nad zemí ve výšce 3 metr

x [m]	0,8	1,8	2,8	3,8	4,8	6,8	8,8	10,8	13,8	18,8	23,8
J [A/m ²]	6,22E+11	6,17E+11	6,18E+11	6,09E+11	6,03E+11	5,85E+11	5,55E+11	5,21E+11	4,54E+11	2,94E+11	7,31E+10
B [T]	4,73E+06	4,70E+06	4,69E+06	4,63E+06	4,59E+06	4,44E+06	4,22E+06	3,96E+06	3,45E+06	2,23E+06	5,56E+05
H [A/m]	4,70E+08	4,67E+08	4,67E+08	4,61E+08	4,56E+08	4,42E+08	4,20E+08	3,94E+08	3,43E+08	2,22E+08	5,53E+07

B Tabulky pro hodnoty stožáru typu „Kočka“

Hodnoty pro vedené potrubí v pod zemi pro jednotlivé výškové úrovně

Tab. 27 Potrubí v 1 metrové hloubce

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	3,84E+06	4,37E+06	4,81E+06	4,96E+06	5,05E+06	5,11E+06	5,10E+06	4,95E+06	4,37E+06	3,39E+06	1,21E+06
B [T]	2,73E+01	3,11E+01	3,42E+01	3,53E+01	3,59E+01	3,63E+01	3,63E+01	3,52E+01	3,11E+01	2,41E+01	8,61E+00
H [A/m]	2,71E+03	3,10E+03	3,40E+03	3,51E+03	3,57E+03	3,61E+03	3,61E+03	3,50E+03	3,09E+03	2,40E+03	8,56E+02

Tab. 28 Potrubí v 2 metrové hloubce

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	3,51E+06	3,95E+06	4,39E+06	4,51E+06	4,61E+06	4,66E+06	4,64E+06	4,51E+06	3,97E+06	3,09E+06	1,10E+06
B [T]	2,50E+01	2,82E+01	3,12E+01	3,20E+01	3,27E+01	3,30E+01	3,29E+01	3,20E+01	2,81E+01	2,19E+01	7,82E+00
H [A/m]	2,49E+03	2,81E+03	3,10E+03	3,19E+03	3,25E+03	3,29E+03	3,28E+03	3,18E+03	2,80E+03	2,18E+03	7,78E+02

Tab. 29 Potrubí v 3 metrové hloubce

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	3,24E+06	3,65E+06	3,97E+06	4,07E+06	4,15E+06	4,18E+06	4,18E+06	4,02E+06	3,55E+06	2,78E+06	9,94E+05
B [T]	2,30E+01	2,60E+01	2,82E+01	2,89E+01	2,95E+01	2,97E+01	2,97E+01	2,87E+01	2,53E+01	1,97E+01	7,07E+00
H [A/m]	2,29E+03	2,58E+03	2,80E+03	2,88E+03	2,93E+03	2,96E+03	2,95E+03	2,85E+03	2,51E+03	1,96E+03	7,04E+02

Vodovodní potrubí ve 2 metrové výšce.

Tab. 30 Vodovodní potrubí

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	3,83E+06	4,38E+06	4,81E+06	4,95E+06	5,05E+06	5,11E+06	5,08E+06	4,94E+06	4,36E+06	3,40E+06	1,22E+06
B [T]	2,72E+01	3,12E+01	3,42E+01	3,52E+01	3,59E+01	3,63E+01	3,62E+01	3,52E+01	3,10E+01	2,42E+01	8,65E+00
H [A/m]	2,71E+03	3,10E+03	3,40E+03	3,50E+03	3,57E+03	3,62E+03	3,60E+03	3,50E+03	3,09E+03	2,40E+03	8,61E+02

Hodnoty pro zpětný proud:

- 50% zemní cesta a 50% zemnicí lano

Tab. 31 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,1 [S/m]

x [m]	-1,2	2,8	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	6,45E+11	6,52E+11	6,44E+11	6,28E+11	6,18E+11	6,07E+11	5,93E+11	5,81E+11	5,63E+11	5,27E+11	4,56E+11	3,65E+11	1,48E+11
B [T]	4,58E+06	4,64E+06	4,58E+06	4,48E+06	4,38E+06	4,30E+06	4,21E+06	4,12E+06	4,00E+06	3,74E+06	3,24E+06	2,59E+06	1,06E+06
H [A/m]	4,56E+08	4,62E+08	4,55E+08	4,45E+08	4,36E+08	4,28E+08	4,19E+08	4,09E+08	3,97E+08	3,72E+08	3,22E+08	2,58E+08	1,05E+08

Tab. 32 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,001 [S/m]

x [m]	-1,2	2,8	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	6,44E+11	6,52E+11	6,44E+11	6,27E+11	6,13E+11	6,02E+11	5,89E+11	5,76E+11	5,59E+11	5,23E+11	4,55E+11	3,60E+11	1,49E+11
B [T]	4,58E+06	4,64E+06	4,58E+06	4,47E+06	4,36E+06	4,28E+06	4,19E+06	4,10E+06	3,98E+06	3,72E+06	3,24E+06	2,57E+06	1,06E+06
H [A/m]	4,55E+08	4,62E+08	4,55E+08	4,45E+08	4,34E+08	4,26E+08	4,17E+08	4,07E+08	3,96E+08	3,70E+08	3,22E+08	2,56E+08	1,06E+08

- 25% zemní cesta a 75% zemnicí lano

Tab. 33 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,1 [S/m]

x [m]	-1,2	2,8	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	3,24E+11	3,27E+11	3,22E+11	3,15E+11	3,06E+11	3,06E+11	3,02E+11	2,95E+11	2,88E+11	2,72E+11	2,40E+11	1,82E+11	7,48E+10
B [T]	2,30E+06	2,32E+06	2,29E+06	2,24E+06	2,18E+06	2,18E+06	2,15E+06	2,10E+06	2,05E+06	1,93E+06	1,71E+06	1,30E+06	5,32E+05
H [A/m]	2,29E+08	2,31E+08	2,28E+08	2,23E+08	2,17E+08	2,17E+08	2,13E+08	2,09E+08	2,04E+08	1,92E+08	1,70E+08	1,29E+08	5,29E+07

Tab. 34 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,001 [S/m]

x [m]	-1,2	2,8	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	3,22E+11	3,27E+11	3,22E+11	3,15E+11	3,06E+11	3,04E+11	2,94E+11	2,90E+11	2,81E+11	2,61E+11	2,23E+11	1,76E+11	7,24E+10
B [T]	2,29E+06	2,32E+06	2,29E+06	2,24E+06	2,18E+06	2,15E+06	2,09E+06	2,06E+06	2,00E+06	1,86E+06	1,60E+06	1,27E+06	5,22E+05
H [A/m]	2,28E+08	2,31E+08	2,28E+08	2,23E+08	2,17E+08	2,14E+08	2,08E+08	2,04E+08	1,99E+08	1,85E+08	1,59E+08	1,27E+08	5,19E+07

- 100% zemní cesta a 0% zemnicí lano

Tab. 35 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,1 [S/m]

x [m]	-1,2	2,8	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	1,29E+12	1,31E+12	1,29E+12	1,27E+12	1,23E+12	1,22E+12	1,19E+12	1,16E+12	1,13E+12	1,06E+12	9,09E+11	7,28E+11	3,01E+11
B [T]	9,20E+06	9,33E+06	9,18E+06	9,01E+06	8,74E+06	8,64E+06	8,45E+06	8,22E+06	8,02E+06	7,52E+06	6,48E+06	5,19E+06	2,14E+06
H [A/m]	9,15E+08	9,28E+08	9,14E+08	8,97E+08	8,68E+08	8,59E+08	8,40E+08	8,18E+08	7,98E+08	7,48E+08	6,44E+08	5,16E+08	2,12E+08

Tab. 36 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,001 [S/m]

x [m]	-1,2	2,8	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	1,28E+12	1,31E+12	1,28E+12	1,26E+12	1,22E+12	1,21E+12	1,18E+12	1,15E+12	1,12E+12	1,04E+12	9,12E+11	7,31E+11	3,00E+11
B [T]	9,16E+06	9,31E+06	9,16E+06	8,99E+06	8,71E+06	8,60E+06	8,41E+06	8,18E+06	8,00E+06	7,45E+06	6,49E+06	5,20E+06	2,13E+06
H [A/m]	9,11E+08	9,26E+08	9,11E+08	8,94E+08	8,66E+08	8,55E+08	8,36E+08	8,14E+08	7,95E+08	7,41E+08	6,45E+08	5,18E+08	2,12E+08

- 0% zemní cesta a 100% zemnicí lano

Tab. 37 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,1 [S/m]

x [m]	-1,2	2,8	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	1,25E+06	2,36E+06	3,52E+06	3,99E+06	4,37E+06	4,46E+06	4,54E+06	4,61E+06	4,61E+06	4,48E+06	3,94E+06	3,05E+06	1,10E+06
B [T]	8,90E+00	1,68E+01	2,50E+01	2,84E+01	3,11E+01	3,18E+01	3,24E+01	3,28E+01	3,28E+01	3,19E+01	2,80E+01	2,18E+01	7,84E+00
H [A/m]	8,85E+02	1,67E+03	2,49E+03	2,83E+03	3,09E+03	3,17E+03	3,23E+03	3,27E+03	3,26E+03	3,17E+03	2,79E+03	2,17E+03	7,80E+02

Tab. 38 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,001 [S/m]

x [m]	-1,2	2,8	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	1,25E+06	2,38E+06	3,52E+06	4,01E+06	4,35E+06	4,48E+06	4,57E+06	4,62E+06	4,62E+06	4,48E+06	3,93E+06	3,06E+06	1,10E+06
B [T]	8,90E+00	1,69E+01	2,51E+01	2,85E+01	3,10E+01	3,19E+01	3,25E+01	3,29E+01	3,28E+01	3,19E+01	2,80E+01	2,18E+01	7,83E+00
H [A/m]	8,85E+02	1,68E+03	2,49E+03	2,84E+03	3,08E+03	3,18E+03	3,23E+03	3,27E+03	3,27E+03	3,17E+03	2,78E+03	2,17E+03	7,79E+02

Hodnoty pro různé elektrické vodivosti půdy:

Tab. 39 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,01 [S/m]

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	3,51E+06	3,96E+06	4,34E+06	4,46E+06	4,55E+06	4,58E+06	4,59E+06	4,46E+06	3,92E+06	3,06E+06	1,09E+06
B [T]	2,49E+01	2,82E+01	3,09E+01	3,17E+01	3,23E+01	3,26E+01	3,27E+01	3,17E+01	2,79E+01	2,17E+01	7,79E+00
H [A/m]	2,48E+03	2,81E+03	3,07E+03	3,16E+03	3,22E+03	3,25E+03	3,25E+03	3,15E+03	2,77E+03	2,16E+03	7,75E+02

Tab. 40 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,001 [S/m]

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	3,51E+06	4,00E+06	4,36E+06	4,49E+06	4,56E+06	4,59E+06	4,59E+06	4,47E+06	3,94E+06	3,07E+06	1,10E+06
B [T]	2,50E+01	2,85E+01	3,10E+01	3,20E+01	3,25E+01	3,27E+01	3,27E+01	3,18E+01	2,80E+01	2,19E+01	7,83E+00
H [A/m]	2,49E+03	2,83E+03	3,09E+03	3,18E+03	3,23E+03	3,26E+03	3,25E+03	3,17E+03	2,79E+03	2,17E+03	7,79E+02

Tab. 41 Potrubí v pod zemi, vodivost půdy 0,0001 [S/m]

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	3,53E+06	3,98E+06	4,37E+06	4,50E+06	4,58E+06	4,62E+06	4,63E+06	4,48E+06	3,94E+06	3,08E+06	1,10E+06
B [T]	2,51E+01	2,84E+01	3,11E+01	3,20E+01	3,26E+01	3,29E+01	3,29E+01	3,19E+01	2,80E+01	2,19E+01	7,82E+00
H [A/m]	2,49E+03	2,82E+03	3,09E+03	3,18E+03	3,24E+03	3,27E+03	3,27E+03	3,17E+03	2,79E+03	2,17E+03	7,78E+02

Hodnoty vodivosti potrubí:

Tab. 42 Potrubí v pod zemi, vodivost potrubí 5e5 [S/m]

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	3,52E+06	3,99E+06	4,37E+06	4,46E+06	4,54E+06	4,61E+06	4,61E+06	4,48E+06	3,94E+06	3,05E+06	1,10E+06
B [T]	2,50E+01	2,84E+01	3,11E+01	3,18E+01	3,24E+01	3,28E+01	3,28E+01	3,19E+01	2,80E+01	2,18E+01	7,84E+00
H [A/m]	2,49E+03	2,83E+03	3,09E+03	3,17E+03	3,23E+03	3,27E+03	3,26E+03	3,17E+03	2,79E+03	2,17E+03	7,80E+02

Tab. 43 Potrubí v pod zemi, vodivost potrubí 10e4 [S/m]

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	7,46E+05	8,48E+05	9,23E+05	9,51E+05	9,63E+05	9,75E+05	9,73E+05	9,45E+05	8,30E+05	6,44E+05	2,29E+05
B [T]	1,31E+01	1,49E+01	1,62E+01	1,67E+01	1,70E+01	1,72E+01	1,71E+01	1,66E+01	1,46E+01	1,13E+01	4,02E+00
H [A/m]	1,31E+03	1,48E+03	1,62E+03	1,66E+03	1,69E+03	1,71E+03	1,70E+03	1,65E+03	1,45E+03	1,13E+03	4,00E+02

Tab. 44 Potrubí v pod zemi, vodivost potrubí 10e6 [S/m]

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	4,64E+07	5,30E+07	5,75E+07	5,95E+07	6,08E+07	6,17E+07	6,19E+07	5,93E+07	5,45E+07	4,40E+07	1,79E+07
B [T]	2,78E+01	3,18E+01	3,47E+01	3,58E+01	3,66E+01	3,71E+01	3,73E+01	3,56E+01	3,28E+01	2,64E+01	1,07E+01
H [A/m]	2,77E+03	3,16E+03	3,45E+03	3,56E+03	3,64E+03	3,69E+03	3,71E+03	3,54E+03	3,26E+03	2,62E+03	1,07E+03

Hodnoty pro vertikální měření půdy:

Tab. 45 Klasické rozložení půdy

y [m]	0,9	2	3	4
J [A/m ²]	7,50E+05	7,47E+05	7,13E+05	7,02E+05
B [T]	1,32E+00	1,37E+00	1,31E+00	1,29E+00
H [A/m]	1,31E+02	1,36E+02	1,30E+02	1,28E+02

Tab. 46 Skalnaté prostředí půdy

y [m]	0,9	2	3	4
J [A/m ²]	1,29E+06	1,15E+06	1,01E+06	9,09E+05
B [T]	2,35E+00	2,11E+00	1,84E+00	1,67E+00
H [A/m]	2,34E+02	2,10E+02	1,83E+02	1,66E+02

Potrubí vedené nad zemí pro 100% zpětného proudu vedeného zemnicím lanem:

Tab. 47 Potrubí nad zemí ve výšce 1 metr

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	4,37E+06	5,08E+06	5,65E+06	5,85E+06	5,99E+06	6,07E+06	6,06E+06	5,89E+06	5,18E+06	4,03E+06	1,43E+06
B [T]	3,11E+01	3,62E+01	4,02E+01	4,16E+01	4,18E+01	4,32E+01	4,32E+01	4,20E+01	3,69E+01	2,86E+01	1,02E+01
H [A/m]	3,09E+03	3,60E+03	4,00E+03	4,14E+03	4,24E+03	4,30E+03	4,29E+03	4,18E+03	3,67E+03	2,85E+03	1,01E+03

Tab. 48 Potrubí nad zemí ve výšce 2 metr

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	4,74E+06	5,58E+06	6,23E+06	6,48E+06	6,61E+06	6,72E+06	6,74E+06	6,55E+06	5,74E+06	4,43E+06	1,58E+06
B [T]	3,37E+01	3,97E+01	4,43E+01	4,60E+01	4,71E+01	4,78E+01	4,80E+01	4,66E+01	4,08E+01	3,15E+01	1,12E+01
H [A/m]	3,35E+03	3,95E+03	4,41E+03	4,58E+03	4,68E+03	4,75E+03	4,77E+03	4,63E+03	4,06E+03	3,14E+03	1,12E+03

Tab. 49 Potrubí nad zemí ve výšce 3 metr

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	5,12E+06	6,10E+06	6,88E+06	7,15E+06	7,35E+06	7,44E+06	7,46E+06	7,24E+06	6,34E+06	4,87E+06	1,72E+06
B [T]	3,64E+01	4,34E+01	4,89E+01	5,08E+01	5,23E+01	5,29E+01	5,31E+01	5,15E+01	4,51E+01	3,47E+01	1,23E+01
H [A/m]	3,62E+03	4,32E+03	4,86E+03	5,06E+03	5,20E+03	5,27E+03	5,28E+03	5,12E+03	4,49E+03	3,45E+03	1,22E+03

Potrubí vedené nad zemí pro 100% zpětného proudu vedeného zemní cestou:

Tab. 50 Potrubí nad zemí ve výšce 1 metr

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	1,12E+12	1,10E+12	1,05E+12	1,04E+12	1,03E+12	1,00E+12	9,70E+11	9,03E+11	7,74E+11	6,03E+11	2,04E+11
B [T]	8,04E+06	7,85E+06	7,56E+06	7,44E+06	7,34E+06	7,15E+06	6,92E+06	6,43E+09	5,50E+06	4,30E+09	1,64E+06
H [A/m]	8,00E+08	7,81E+08	7,53E+08	7,40E+08	7,30E+08	7,11E+08	6,88E+08	6,40E+08	5,48E+08	4,28E+08	1,63E+08

Tab. 51 Potrubí nad zemí ve výšce 2 metr

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	1,08E+12	1,03E+12	1,01E+12	9,79E+11	9,70E+11	9,50E+11	9,17E+11	8,46E+11	7,21E+11	5,46E+11	2,10E+11
B [T]	7,69E+06	7,42E+06	7,24E+06	7,03E+06	6,92E+06	6,76E+06	6,53E+06	6,03E+06	5,14E+06	3,93E+06	1,49E+06
H [A/m]	7,65E+08	7,38E+08	7,20E+08	6,99E+08	6,88E+08	6,72E+08	6,50E+08	6,00E+08	5,11E+08	3,91E+08	1,48E+08

Tab. 52 Potrubí nad zemí ve výšce 3 metr

x [m]	6,8	8,8	10,8	11,8	12,8	13,8	14,8	16,8	19,8	22,8	27,8
J [A/m ²]	1,02E+12	9,94E+11	9,51E+11	9,25E+11	9,20E+11	9,02E+11	8,65E+11	8,00E+11	6,81E+11	5,24E+11	1,93E+11
B [T]	7,27E+06	7,09E+06	6,81E+06	6,65E+06	6,55E+06	6,40E+06	6,16E+06	5,69E+06	4,83E+06	3,72E+06	1,37E+06
H [A/m]	7,23E+08	7,05E+08	6,78E+08	6,61E+08	6,52E+08	6,36E+08	6,13E+08	5,66E+08	4,81E+08	3,70E+08	1,36E+08